

POSTĘPY

nauki i techniki

Advances in Science and Technology

6/2011

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. Wojciech Ozgowicz, prof. PŚI – Politechnika Śląska w Gliwicach
- Dr hab. inż. Dorota Wójcicka-Migasiuk, prof. PL – Politechnika Lubelska
- Dr inż. Paweł Chojnacki – 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

Anna Arasimowicz, Robert Piekarski POMIAR NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH METODĄ USUWANIA WARSTW W TECHNOLOGICZNYCH WARSTWACH WIERZCHNICH.....	5
Maciej Augustyniak, Mateusz Barczewski, Jacek Andrzejewski WYKORZYSTANIE OPTYCZNYCH NARZĘDZI WSPÓLRZĘDNOŚCIOWEJ TECHNIKI POMIAROWEJ W BADANIACH DEFORMACJI WYSTĘPUJĄCYCH W PRZETWÓRSTWIE TWORZYW POLIMEROWYCH.....	14
Elżbieta Bączek, Jerzy Danielak, Barbara Staniewicz-Budnik BADANIA JAKOŚCI ŚCIERNIC W ASPEKCIE ZGODNOŚCI Z WYMAGANIAMI BEZPIECZEŃSTWA.....	22
Marek Binienda URZĄDZENIE DO AZOTOWANIA NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH O MAŁYCH PRZEKROJACH W PLAZMIE WYSOKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI.....	29
Waldemar Polowski, Piotr Bednarski, Daniel Toboła OBRÓBKA WYKOŃCZENIOWA NARZĘDZIAMI DIAMENTOWYMI DO NAGNIATANIA ŚLIZGOWEGO.....	40
Michał Dobrzyński, Piotr Marszałek WYBRANE ASPEKTY ZUŻYCIA OSTRZY SKRAWAJĄCYCH WYKONANYCH Z PcBN.....	50
Krzysztof Netter, Michał Gubański OBROTOWY PRZYRZĄD PODZIAŁOWY O PODZIALE DYSKRETNYM.....	58
Arkadiusz Gola, Marta Osak MODELOWANIE PODSYSTEMU OBRABIAREK W ESP CZĘŚCI KLASY KORPUS Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU ENTERPRISE DYNAMICS.....	66
Marcin Gapski, Piotr Koniorczyk, Monika Wielgosz, Janusz Zmywaczyk ESTYMACJA CIEPŁA WŁAŚCIWEGO I PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ PMMA ORAZ PTFE PRZY UŻYCIU WYBRANYCH TECHNIK ODWROTNYCH.....	74
Michał Wieczorowski, Piotr Znaniecki ROBOTYZACJA POMIARÓW WYKONYWANYCH SKANEREM OPTYCZNYM.....	81
Piotr Sęk, Bogdan Antoszewski POWIERZCHNIA Z TEKSTURĄ - TOPOGRAFIA I ENERGIA POWIERZCHNIOWA.....	88
Krzysztof Mrozek, Andrzej Gessner OPTYMALIZACJA NADDATKÓW OBRÓBKOWYCH WIELKOGABARYTOWYCH ODLEWÓW ŻELIWNÝCH.....	96

Łukasz Czerech, Andrzej Werner KOREKCJA ODCHYLEK OBRÓBKOWYCH PROFILI KRZYWOLINIOWYCH WYTWARZANYCH NA FREZARKACH CNC.....	104
Damian Śmierchalski, Tomasz Daniluk WERYFIKACJA WYMIAROWA PIERWSZEJ WYPRASKI W SYSTEMIE SKANOWANIA 3D.....	113
Martin Jakubčík, Darina Kumičáková COMPUTER AIDED DESIGN OF UNCONVENTIONAL ROBOTIC DEVICES.....	120
Ján Kardoš, Nadežda Čuboňová UTILIZATION DATABASE SYSTEM USING THE PROTOCOL STEP.....	127
Tomáš Michalčík, Nadežda Čuboňová DATA TYPES IN THE EXPRESS LANGUAGE.....	134
Matúš Košinár, Ivan Kuric MONITORING OF CNC MACHINE TOOL ACCURACY.....	145
Magdalena Olszewska, Adam Gąska PORÓWNANIE RÓŻNYCH URZĄDZEŃ METROLOGICZNYCH WYKORZYSTYWANYCH W ZASTOSOWANIACH BIOMEDYCZNYCH.....	155
Mateusz Kania, Mirosław Ferdynus WIRTUALNE PROTOTYPOWANIE UKŁADU STEROWANIA POCHYLANIA I PRZECHYLANIA ŚMIGŁOWCA JEDNOWIRNIKOWEGO W UKŁADZIE KLASYCZNYM.....	164
Łukasz Giersberg, Andrzej Łukaszewicz WYKORZYSTANIE WSPÓŁCZESNYCH TECHNIK WYTWARZANIA W RZEŹBIARSTWIE. INŻYNIERIA ODWROTNA NA POZIOMIE SYSTEMÓW CAM....	172
Edward Lisowski, Paweł Kot, Andrzej Młyniec UTILIZATION OF PLASTIC MATERIALS FOR PRODUCTION OF LOADED ELEMENTS OF PNEUMATIC SERVOS.....	179
Henryk Figiel, Bartosz Proniewski PROJEKTOWANIE I KONSTRUKCJA CEWEK NADAWCZO-ODBIORCZYCH DO OBRAZOWANIA MAGNETYCZNO-REZONANSOWEGO W POLU O INDUKCJI 0,088 T.....	189
Włodzimierz Przybylski ZASTOSOWANIE OBRÓBKI NAGNIATANIEM W TECHNOLOGII SIŁOWNIKÓW HYDRAULICZNYCH.....	196

Anna Arasimowicz ¹⁾, Robert Piekarski ²⁾

POMIAR NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH METODĄ USUWANIA WARSTW W TECHNOLOGICZNYCH WARSTWACH WIERZCHNICH

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki pomiaru naprężeń własnych w technologicznych warstwach wierzchnich (TWW) za pomocą metody usuwania warstw. Badania przeprowadzono dwoma wariantami tej metody: usuwanie warstwy wierzchniej zrealizowane zostało poprzez roztrawianie elektrochemiczne oraz pomiar grubości usuniętej warstwy i zmian strzałki ugięcia; w drugim przypadku warstwa wierzchnia została usunięta mechanicznie docieraniem, a naprężenia własne określone na podstawie pomiarów grubości usuniętej warstwy wierzchniej i zmiany strzałki ugięcia próbki.

Słowa kluczowe: naprężenia własne, warstwa wierzchnia, docierania, usuwanie WW.

Z inżynierskiego punktu widzenia, jednym z najważniejszych parametrów wytwarzanego detalu jest stan warstwy wierzchniej (WW). Odpowiada on za długość i jakość jego pracy oraz współpracę z innymi elementami. W opisie warstwy wierzchniej (WW) istotnym parametrem, oprócz jej stanu struktury oraz rozkładu mikrotwardości, jest stan naprężeń własnych pozostałych po obróbkach wykańczających.

W wyniku działania zewnętrznych czynników mechanicznych, cieplnych, chemicznych oraz przemian strukturalnych zachodzą w materiale odwracalne i nieodwracalne zmiany powodujące odpowiednio odkształcenia sprężyste i plastyczne. W konsekwencji ich wystąpienia powstają naprężenia własne (NW), które, po usunięciu obciążeń zewnętrznych, równoważą się wzajemnie wewnątrz pewnego obszaru WW. Są one funkcją obciążeń zewnętrznych, struktury wewnętrznej materiału obrabianego, rodzaju obróbki i kształtu elementu obrabianego, przemian fazowych wywołanych obróbką oraz oddziaływania nieobrobionego rdzenia na WW [1].

W celu odróżnienia zasięgu oddziaływań NW, dzieli się je na trzy rodzaje (patrz rys. 1), tj.:

- naprężenia I-go rodzaju (σ' – makronaprężenia), występujące w całym kontinuum badanego przedmiotu. Ich powstawanie wywołane jest makro-wpływem wielu czynników zewnętrznych, takich jak: zróżnicowanie struktury wewnętrznej wywołane obróbką oraz nierównomierne stygnięcie WW na różnych głęboko-

¹⁾ Instytut Technik Wytwarzania, Zakład Obróbek Wykańczających i Erozyjnych, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska.

²⁾ Instytut Mechaniki i Poligrafii, Zakład Mechaniki i Technik Uzbrojenia, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska.

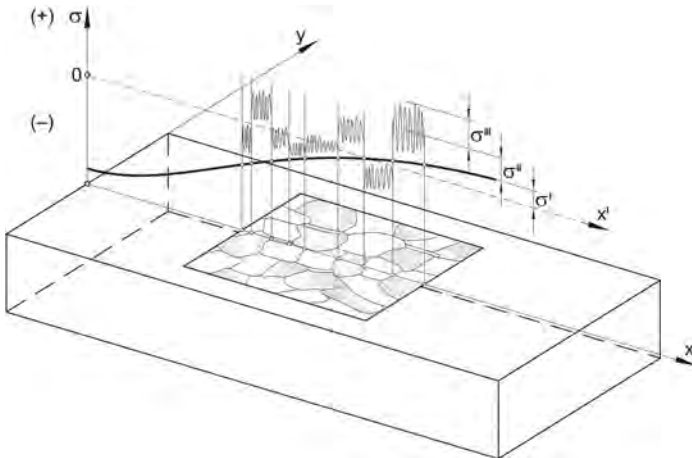
kościach. Naprężenia te w głównym stopniu wywołują zmiany gabarytów obrabianego przedmiotu oraz pęknięcia w WW,

- naprężenia II-go rodzaju (σ'' – mikronaprężenia), występujące w obszarze kilku sąsiednich ziaren oraz ich granic, są spowodowane zmianą orientacji ziaren wobec siebie oraz różnicą objętości właściwej pomiędzy nimi,
- naprężenia III-go rodzaju (σ''' – subnaprężenia), działające w obszarze kilku odległości atomowych i wywołane licznymi defektami w strukturze sieci krystalicznej po obróbce (wakanse, atomy międzywęzłowe, dyslokacje, uskoki sieci i rozwarstwienia).

Ze względu na powstawanie NW dzieli się je na: NW pochodzenia mechanicznego, cieplnego i strukturalnego.

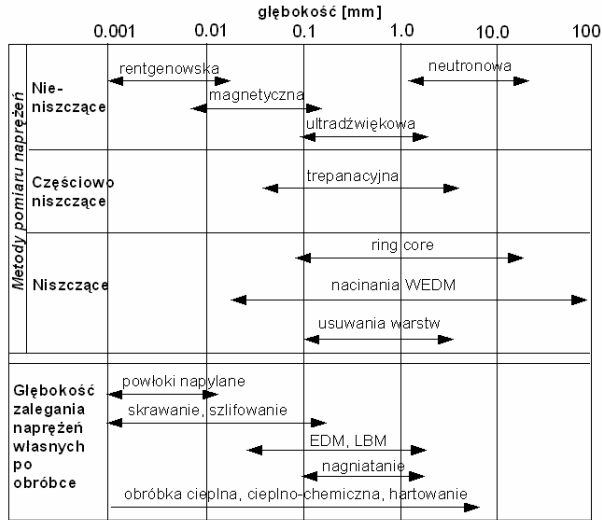
Wielkość NW determinuje kształt przedmiotu po obróbce, tj. jeżeli ich wielkość jest zbliżona do granicy wytrzymałości, a grubość materiału dostatecznie mała to obserwuje się odkształcenia makroskopowe całego ciała. W przypadku materiałów o znacznych rozmiarach w stosunku do wielkości WW obserwuje się zmiany kształtu tylko na powierzchni. Po przekroczeniu granicy wytrzymałości materiału następuje jego degradacja, charakteryzująca się pęknięciem/pęknięciami WW oraz znaczną zmianą struktury wewnętrznej warstw przypowierzchniowych [2, 3].

Istotną cechą NW występujących w WW jest określenie ich znaku, tj. czy mają charakter rozciągający (+), czy ściskający (-), przy czym opisuje się je jako naprężenia normalne, bądź styczne. W niniejszej pracy autorzy koncentrują się na pomiarze jednoosiowych naprężeń normalnych I-go rodzaju przy zastosowaniu dwóch metod trepanacyjnych polegających na ciągłym, „papierosowym” sposobie usuwania cienkich warstw przypowierzchniowych (rys. 1).



Rys. 1. Poziom i wielkość naprężeń własnych (σ' , σ'' , σ''') 1-go, 2-go i 3-go rodzaju
Fig. 1. The level and size of residual stresses (σ' , σ'' , σ''') of 1-st, 2-nd and 3-rd order

Aby określić naprężenia własne, pozostałe po procesie wytwarzania, opracowano wiele metod badawczych – nieniszczących, takich jak metoda dyfrakcji rentgenowskiej, ultradźwiękowa, prądów wirowych itp., jak i niszczących, m.in. metoda ring-core, metody usuwania warstw, metoda Oppela i inne (rys. 2).

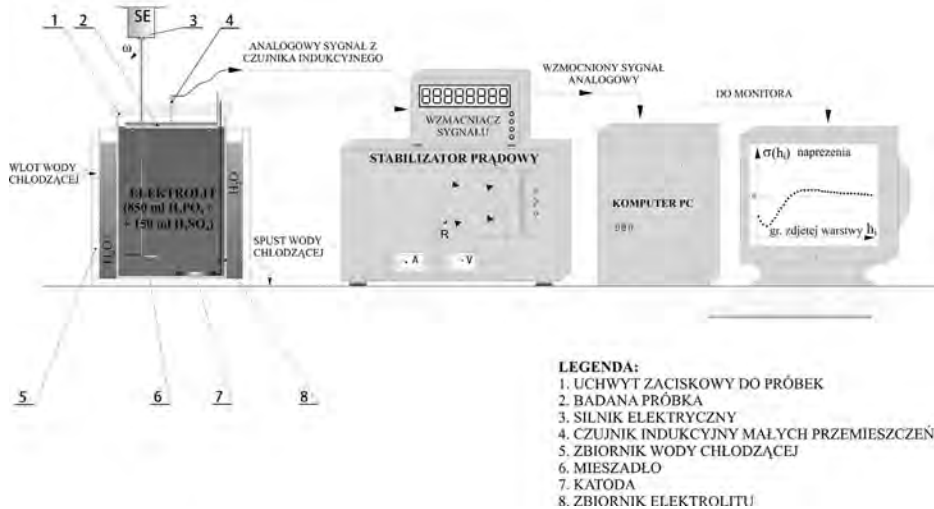


Rys. 2. Zakres występowania naprężeń własnych w WW oraz stosowane metody ich pomiaru

Fig. 2. The range of residual stresses distribution in surface layer and methods of its measurement

Sprawdzoną metodą wyznaczania rozkładu naprężeń własnych, służącą również do wzorcowania nieniszczących metod porównawczych, jest metoda usuwania warstw (MUW) – Waismana-Phillipsa [1, 4]. Polega ona na pomiarze strzałki ugięcia trawionej próbki płaskiej o przekroju prostokątnym, leżącej swobodnie na dwóch podporach. Proces trawienia polega najczęściej na chemicznym, bądź elektrochemicznym usuwaniu materiału próbki. Ten drugi proces, wykorzystywany w opisanych poniżej badaniach, jest krótkotrwały i pozwala na szybkie trawienie próbki. Niestety, podczas usuwania WW generowane są niekorzystne efekty związane z pasywacją warstwy usuwanej, nagłą zmianą strzałki ugięcia tuż po załączeniu napięcia zasilania oraz grzaniem się próbki i elektrolitu, itp. Te wszystkie zjawiska, choć zakłócają pomiar naprężeń, są w odpowiedni sposób zredukowane i ostatecznie nie wpływają znacząco na końcowe wyniki badań. Należy dodać, że MUW jest metodą dającą powtarzalne wyniki pomiaru NW i precyzyjnie określa ich rozkład oraz znak w funkcji usuwanej warstwy. Omawiana metoda jest metodą niszczącą, pracochłonną, energochłonną, czasochłonną i środkochłonną. Pozwala tylko na pomiar naprężeń normalnych 1-go rodzaju, a ich rozkłady mierzy się maksymalnie do kilku milimetrów w głąb WW. Proces elek-

trochemicznego usuwania warstwy może powodować nierównomierne trawienie WW, co prowadzi do zaburzenia wyników badań (unikana się tego przez zastosowanie szeregu sposobów korekcyjnych, co do zasilania prądowego, chłodzenia elektrolitu oraz sposobu zamocowania próbki podczas usuwania WW). Metoda ta nie pozwala na trawienie dowolnych kształtów próbek (stosuje się najczęściej cienkie próbki o przekroju prostokątnym, stałym na ich długości) (rys. 3).

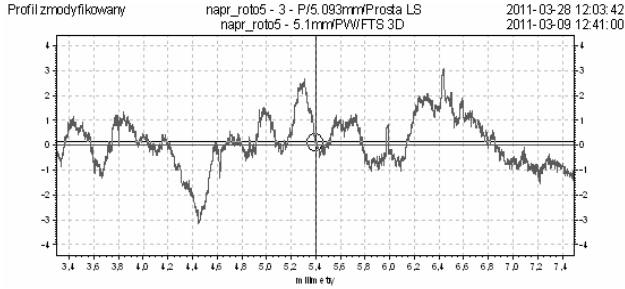


Rys. 3. Schemat ideowy stanowiska do pomiaru naprężeń własnych na cienkich próbkach o przekroju prostokątnym, obrabianych elektrochemicznie

Fig. 3. The diagram of residual stress measuring in thin specimens with rectangular cross-section, treated with electrochemical etching method

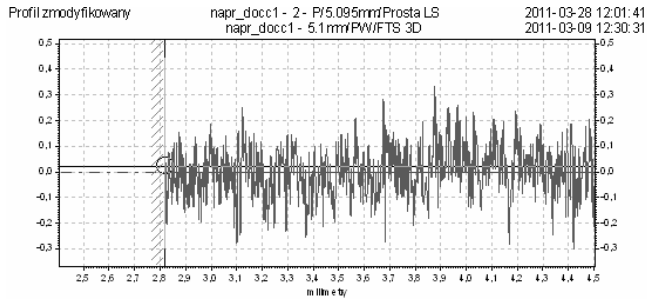
Mierzone NW mają charakter wypadkowych, zebranych z powierzchni usuwanej, co pozwala także na uśrednianie wyników z powierzchni mocno zdefektowanych po intensywnych obróbkach. Należy dodać, że MUW uwzględnia w opisie naprężenia pochodzące od warstw wcześniej usuniętych. Ponadto, poprawnie prowadzony proces elektrochemicznego usuwania warstw jest quasi-stacjonarny i przewidywalny, co pozwala szacować wyniki NW praktycznie od samego początku powierzchni zewnętrznej próbki. Trawiona WW usuwana jest w sposób „papierosowy”, co daje równomierny ubytek materiału grubości próbki [5, 6].

W dalszej pracy autorów, klasyczna metoda usuwania warstw posłużyła jako sprawdzająca nową metodę pomiarową naprężeń własnych, opracowywaną w Zakładzie Obróbek Wykańczających i Erozyjnych Politechniki Warszawskiej, w której do usuwania WW zastosowano docieranie (MUWD). Z założenia ma ona służyć do pomiaru NW w warstwach wierzchnich o dużej niejednorodności składu i struktury oraz znacznej chropowatości, powstających m. in. po takich obróbkach jak stopowanie elektroiskrowe, EDM, LBM.

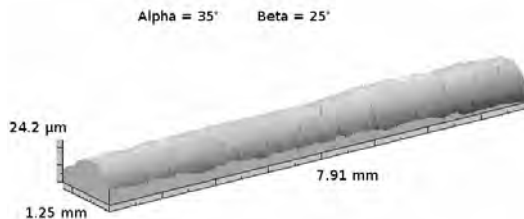


Rys. 4. Profilogram chropowatości po roztworzeniu elektrochemicznym
Fig. 4. The surface roughness profile after electrochemical etching

Poniżej przedstawiono profilogramy chropowatości po roztworzeniu elektrochemicznym i po docieraniu, wykonane na profilometrze skaningowym Taylor Hobson. Docieranie pozwala uzyskać większą gładkość i płaskość powierzchni. Chropowatość Ra po docieraniu wynosi $0,0728\mu\text{m}$, gdy po trawieniu jest to ok. $0,8238\mu\text{m}$ (rys. 4, 5). Natomiast błędy kształtu w kierunku prostopadłym do osi próbki są rzędu $10\mu\text{m}$ po trawieniu i $1\mu\text{m}$ po docieraniu (rys. 6, 7). Ponadto obróbka docieraniem pozwala uniknąć podtrawiania powierzchni bocznej próbki, co ma znaczenie szczególnie przy badaniach wykonywanych na cienkich próbkach, o grubości poniżej $1,5\text{mm}$.

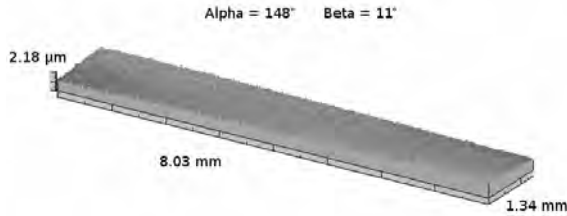


Rys. 5. Profilogram chropowatości po docieraniu
Fig. 5. The surface roughness profile after lapping



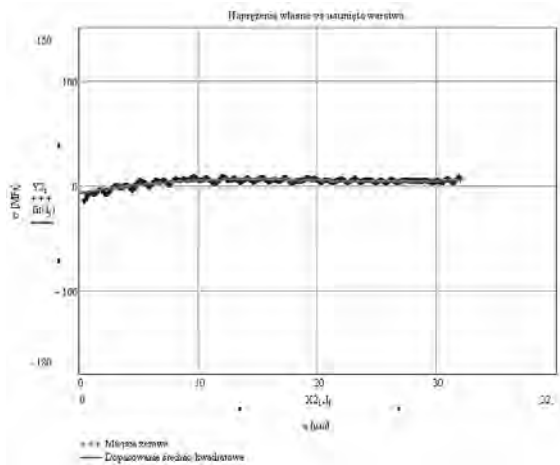
Rys. 6. Obraz stereometryczny powierzchni po obróbce elektrochemicznej
Fig. 6. Surface after electrochemical etching – 3D view

Metoda usuwania warstw MUWD jest metodą niszczącą, polegającą na delikatnym, mechanicznym usuwaniu WW za pomocą tarczy docierającej, o specjalnej konstrukcji, w której diamentowe ziarno ściernie jest związane żywicą w postaci wysepek.



Rys. 7. Obraz stereometryczny powierzchni po obróbce docieraniem
Fig. 7. Surface after lapping – 3D view

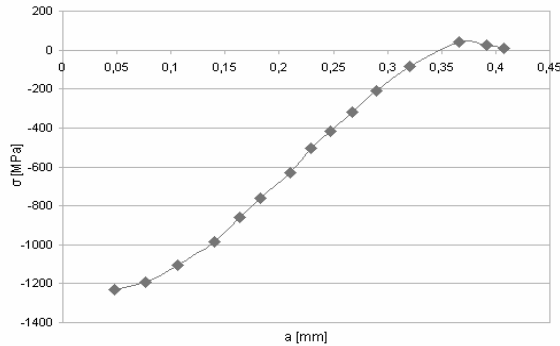
Naprężenia własne wywołane usuwaniem warstwy przy użyciu tych tarcz są nieznaczne, gdyż metoda MUWD praktycznie ich nie generuje i nie wpływają one na końcowy wynik pomiarów. Rys. 8 przedstawia rozkład NW wyznaczonych MUW w próbce nienaprężonej, która została poddana procesowi docierania na tarczy ze spojonym ziarnem diamentowym o średniej wielkości $25 \mu\text{m}$ [7]. Maksymalna ich wartość wynosi ok. 7 MPa , a głębokość zalegania nie przekracza $4 \mu\text{m}$.



Rys. 8. Rozkład naprężeń własnych w próbce po docieraniu
Fig. 8. Residual stress distribution in the specimen after lapping

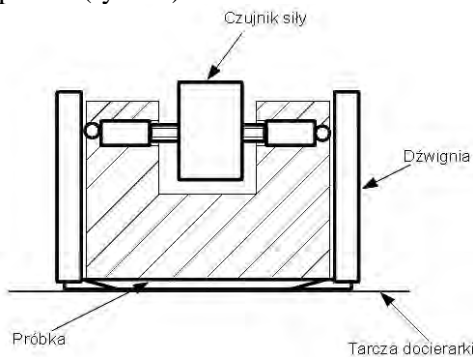
Podczas wstępnych badań nad MUWD, badana próbka była mocowana w specjalnym uchwycie, umożliwiającym wyprostowanie jej (proces docierania zachodzi na płaskich elementach), następnie usuwanie warstw odbywało się przy

użyciu luźnego ziarna ściernego, podawanego na żeliwny docierak [8]. Po usunięciu warstwy materiału, rzędu kilkunastu μm , próbka była odmocowywana w celu zmierzenia strzałki ugięcia i grubości usuniętej warstwy. Ten cykl był powtarzany do momentu usunięcia całej WW zawierającej naprężenia własne, a co za tym idzie, wyprostowania się próbki. Na podstawie danych pomiarowych, korzystając z tych samych wzorów jak w przypadku MUW, wyznaczano rozkład naprężeń własnych w WW. Poniżej zamieszczono rozkład naprężeń własnych w próbce Almena po obróbce zgniotem powierzchniowym roto peen (rys. 9). Głębokość zalegania NW oraz ich rozkład ma charakter typowy dla tej obróbki, występujący w próbkach Almena [9].



Rys. 9. Rozkład naprężeń własnych w próbce po obróbce roto peen, wyznaczone MUWD
Fig. 9. Residual stress distribution in the specimen after roto peen

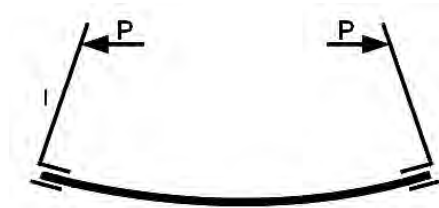
Docelowo opracowywana jest metoda pomiaru NW, w której nie będzie konieczne wyjmowanie próbki z przyrządu w celu wykonania pomiarów, a cały proces badań będzie zmechanizowany. Do tego celu skonstruowano specjalny przyrząd, zaopatrzony w czujniki siły oraz czujniki przemieszczeń liniowych do pomiaru grubości usuwanej warstwy, w którym smukła próbka jest mocowana w specjalnych gniazdach wykonanych w dźwigniach służących do wyprostowania próbki (rys. 10).



Rys. 10. Schemat przyrządu do docierania prostej próbki
Fig. 10. The device scheme for lapping the straight sample

Napężenia własne w WW powodują wyginania się próbki. Jej końce są sztywno mocowane w dwóch dźwigniach (rys. 11), do których prostopadle do osi dźwigni przykładana jest siła P , przekazywana przez czujnik pomiarowy, wymagana do wyprostowania próbki na czas docierania (rys. 12). W trakcie obróbki ścierniej zmienia się przekrój poprzeczny próbki, a co za tym idzie, zmniejsza się siła niezbędna do utrzymania próbki w stanie wyprostowanym.

Przy użyciu czujnika przemieszczenia mierzona jest grubość usuwanej warstwy wierzchniej. Rejestracja grubości usuwanej warstwy i sił utrzymujących próbkę w stanie wyprostowanym pozwala na wyznaczenie rozkładu naprężeń własnych w technologicznych warstwach wierzchnich.



Rys. 11. Schemat układu dźwigni – próbka przed jej wyprostowaniem
Fig. 11. The scheme of the levers – sample before straighten



Rys. 12. Schemat układu dźwigni – próbka po jej wyprostowaniu
Fig. 12. The scheme of the levers – sample after straighten

WNIOSKI

Docieranie daje wysokie płaskości i gładkości powierzchni, co może mieć duże znaczenie przy badaniu naprężeń własnych w WW o dużej niejednorodności oraz chropowatości wyjściowej, które się źle roztwarzają (np. po EDM, LBM, stopowaniu elektroiskrowym).

Docieranie jako obróbka stosowana do usuwania WW wprowadza do WW znikome naprężenia dodatkowe, co nie wpływa znacząco na badany stan naprężeń własnych.

Oprzyrządowanie zastosowane do wyznaczania NW z zastosowaniem docierania jest stosunkowo proste, nie wymaga stosowania żrących substancji, jest przyjazna dla przeprowadzającego badania i dla środowiska.

PIŚMIENNICTWO

1. Waisman I. L., Phillips A.: Simplified Measurement of Residual Stresses, Proc. of the Society Experimental Stress Analysis, t. XI, 1952, nr 2, str. 102.
2. Hebda M., Wachal A.: Trybologia, WNT, Warszawa 1980.
3. Birger I. A.: Ostatočné naprężeniâ, Mašgiz, Moscva 1963.
4. Piekarski R.: Zastosowanie metody prądów wirowych do pomiaru naprężeń własnych wywołanych wybranymi obróbkami powierzchniowymi, praca doktorska, OWPW, str. 106, Warszawa, 2001 r.
5. Piekarski R.: Wyznaczanie naprężeń własnych w warstwie wierzchniej elementów maszyn ze stali 42CrMo4 poddanych kulowaniu strumieniowemu, Mechanik, 2005, nr 5, s. 102-106.
6. Nowicki B., Pierzynowski R., Piekarski R., Spadło S.: Badania stanu warstwy wierzchniej spoiw ściernic diamentowych po obróbce elektrodami szczotkowymi, Prace Nauk. Inst. Bad. i Ekspertyz Nauk. w Gorzowie, XX Konf. nt. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej – WW'02, Gorzów Wlkp. – Poznań, 2002.
7. Arasimowicz A., Nowicki B.: Measurement of residual stress in surface layer of considerable non-homogeneity. Proceedings of the 5th International Conference on Advances In Production Engineering, Warsaw 2010, str. 204-211.
8. Arasimowicz A., Nowicki B.: Nowy sposób pomiaru naprężeń własnych metodą usuwania warstw w niejednorodnych warstwach wierzchnich, Inżynieria maszyn, R. 12, z. 2-3, Obróbka erozyjna; teoria i eksperyment, str. 5-14, Wrocław 2009.
9. Winter P. M.: The use of „3M” Brand roto peen products in conditioning metal surfaces., 3M Company St. Paul, Minnesota, October 1, 1968.

RESIDUAL STRESS MEASUREMENT IN TECHNOLOGICAL SURFACE LAYER WITH LAYER REMOVAL METHOD

Summary

The results of residual stress measurement in surface layer with successive layer removal method are presented in this paper. The study has been made with two variants of this method: removing the surface layer has been realized by electrochemical etching, and measuring the thickness of the layer and deflection changes; in the second case, the surface layer had been mechanically removed with lapping, and residual stress distribution has been determined on the basis of the measurement of the removed layer thickness and the deflection relating to it.

Keywords: residual stresses, surface layer, lapping, removing surface layer.

Maciej Augustyniak¹⁾, Mateusz Barczewski²⁾, Jacek Andrzejewski³⁾

WYKORZYSTANIE OPTYCZNYCH NARZĘDZI WSPÓŁRZĘDNOŚCIOWEJ TECHNIKI POMIAROWEJ W BADANIACH DEFORMACJI WYSTĘPUJĄCYCH W PRZETWÓRSTWIE TWORZYW POLIMEROWYCH

Streszczenie: W artykule przedstawiono praktyczny aspekt zastosowania nowoczesnych narzędzi współrzędnościowej techniki pomiarowej w przetwórstwie tworzyw sztucznych. Na przykładzie skanera 3D ATOS II firmy GOM przeanalizowano możliwość i zasadność użytkowania tychże narzędzi w badaniach tworzyw polimerowych. W związku z zastosowaniem różnych parametrów procesu wtryskiwania tworzyw polimerowych otrzymujemy różne stopnie krystaliczności materiału, które obserwować możemy w postaci deformacji geometrii wyrobów poddanych analizie metrologicznej. Obserwacja tychże deformacji oraz późniejsza analiza pozwala określić wpływ przykładowych parametrów procesu na dokładność geometryczną wyprasek.

Słowa kluczowe: współrzędnościowa technika pomiarowa, deformacje, tworzywa polimerowe, skaner 3D.

WSTĘP

Współrzędnościowa technika pomiarowa (WTP) stanowi jedną z głównych dziedzin rozwoju nowoczesnej metrologii. W pomiarach wielkości geometrycznych, związanych z elementami części maszyn, WTP zaczyna odgrywać coraz istotniejszą rolę i jest powszechnie spotykana, gdyż fundamentem rozwoju innowacyjnego przedsiębiorstwa produkcyjnego jest ciągle doskonalenie, w tym również produkowanie wyrobów coraz to dokładniejszych. Maszyny pomiarowe oparte na technice współrzędnościowej pozwalają mierzyć dowolnie ukształtowaną geometrię wyrobów, a oprogramowanie, będące na ich wyposażeniu, pozwala przeprowadzać kompleksową analizę geometryczno-wymiarową.

Współrzędnościowe maszyny pomiarowe to obecnie najbardziej rozpowszechnione uniwersalne urządzenia pomiarowe. Wykorzystywane są zarówno w procesie sterowania produkcją, jak również w systemach kontroli jakości w różnych gałęziach przemysłu. Stanowią one jednocześnie niezbędny i kluczowy element dla zapewnienia dokładności i jakości produkcji oraz możliwość kontroli i sterowania jakością produkowanych elementów [6].

Do niedawna głównym nurtem rozwoju WTP były stykowe (klasyczne) maszyny pomiarowe. Jednak w ostatnim okresie zauważa się zainteresowanie przed-

¹⁾ Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych.

²⁾ Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, Zakład Tworzyw Sztucznych.

³⁾ Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, Zakład Tworzyw Sztucznych.

siębiorstw w zastosowaniach optycznych narzędzi pomiarowych techniki współrzędnościowej. To skłania do przeanalizowania tychże narzędzi pod względem ich zastosowań w praktyce.

Powszechność stosowania tworzyw polimerowych jako materiałów konstrukcyjnych skłania do coraz dokładniejszego opisu procesów przetwórczych oraz wpływu ich parametrów na właściwości kształtowanych wyrobów. Materiały te znajdują szerokie zastosowanie dzięki łatwości formowania wieloseryjnych wyrobów przy znacznym zmniejszeniu kosztów produkcji w odniesieniu do innych grup materiałów. Zaletą tworzyw polimerowych jest ich mała gęstość, odporność na korozję, duże możliwości modyfikacji umożliwiające nadawanie im żądanych właściwości oraz łatwość ich przetwarzania i formowania. Jedną z najbardziej rozpowszechnionych i intensywnie rozwijanych technologii kształtowania termoplastycznych tworzyw polimerowych jest wtryskiwanie. Zakładając, że geometria formy odwzorowuje ukształtowanie wyrobu w niezmienny sposób, na ostateczną jego dokładność wymiarową znaczący wpływ mają parametry procesu. Spośród nich szczególne znaczenie mają: temperatura formy, temperatura przetwarzanego polimeru, ciśnienie wtrysku oraz wynikający z nich pośrednio czas przebywania wypraski w formie.

W przypadku tworzyw semikrystalicznych stopień krystaliczności, tj. procentowa zawartość tworzywa o strukturze uporządkowanej, w znaczący sposób wpływa na właściwości gotowego wyrobu. Na stopień krystaliczności polimeru mają zarówno wpływ warunki przetwórcze (w szczególności temperatura formy) jak i celowe modyfikowanie polimeru poprzez dodanie nukleantów, tj. zarodków krystalizacji heterogenicznej. Wprowadzanie nukleantów będące równoznaczne ze zwiększeniem ilości zarodków krystalizacji prowadzi do zmiany struktury polimeru skutkującej zmniejszeniem wielkości wydzieleń fazy krystalicznej, a co za tym idzie polepszeniem właściwości wytrzymałościowych gotowego wyrobu. Wzrost ilości fazy krystalicznej spowodowany kształtowaniem wyrobu w podwyższonej temperaturze prowadzi do zwiększenia skurczu przetwórczego mogącego prowadzić do zmian wymiarów formowanego wyrobu [4, 5].

WSPÓLRZĘDNOŚCIOWA TECHNIKA POMIAROWA

W pomiarach wielkości geometrycznych, dotyczących elementów maszynowych, zaczyna dominować współrzędnościowa technika pomiarowa. Umożliwia ona wyznaczenie wymiarów, przestrzennie ukształtowanych części maszyn, ze stosunkowo wysoką dokładnością i w czasie dostosowanym do rytmu ich wytwarzania. Technika ta, jakościowo odmienna od dotychczasowych metod pomiaru, charakteryzuje się procedurami pomiarowymi opartymi na wartościach współrzędnych lokalizowanych punktów pomiarowych, które są podstawą wyznaczania wszystkich geometrycznych figur, z których składa się element maszyny. Na przykład, wyznaczanie średnicy otworu odbywa się przez wyznaczenie co najmniej czterech wartości punktów tego okręgu w miejscach dowolnie, chociaż w

miarę równomiernie, rozmieszczonych. Aproksymacja okręgiem średniokwadratowym umożliwia wyznaczenie średnicy lub promienia okręgu oraz współrzędnych jego środka. Skraca to czas pomiaru w stosunku do metod klasycznych, w których, jak w przypadku długościomierza, niezbędne było usytuowanie końcówki pomiarowej w osi mierzonego otworu, co czyniło pomiar pracochłonnym, bowiem polegał on na wyznaczeniu średnicy jako odległości końcówki między przeciwległymi ściankami otworu [3].

Opis i charakterystyki narzędzi pomiarowych są dość istotne, gdyż służą do przedstawienia i odpowiedniego sformułowania ich przydatności do wykonywania pomiarów, bez względu na zakres wartości sprawdzanych wielkości i oczekiwanej dokładności pomiarów. Współrzędnościowa technika pomiarowa stosowana w maszynach pomiarowych polega na wyznaczeniu współrzędnych punktów (x_i, y_i, z_i) tworzących zarys rzeczywisty, ustalonych względem układu współrzędnych (x, y, z) maszyny pomiarowej [1].

Technika współrzędnościowa zmienia filozofię pomiaru w stosunku do metod klasycznych, a jej zrozumienie i poznanie powinno wchodzić w skład podstawowego wykształcenia współczesnego inżyniera związanego z budową maszyn, automatyką, robotyką, a szczególnie z metrologią [3].



Rys. 1. Optyczny skaner 3D ATOS II firmy GOM.

Fig. 1. Optical 3D scanner ATOS II from GOM Company.

OPTYCZNY SKANER 3D

Zasada działania optycznego skanera ATOS II (rys.1) bazuje na triangulacji. Projektor głowicy dokonuje projekcji sekwencji prążków mory na mierzony obiekt, a dwie kamery rejestrują przebieg tych prążków. Poprzez rozwiązanie równań transformacji optycznej, system z określoną dokładnością oblicza współ-

rzędne dla każdego pojedynczego piksela kamery. Rezultatem poszczególnych pomiarów jest chmura punktów, ilość tych punktów jest zależna od rozdzielczości kamer (od 0,8 do 8mln punktów). Mierząc dany element, system składa poszczególne chmury punktów, bazując na punktach referencyjnych, których odległości między sobą się nie zmieniają w czasie pomiarów. Po pomiarach następuje proces poligonizacji, którego rezultatem jest powierzchniowy model składający się na siatkę trójkątów, który bazuje na wcześniej zebranej chmurze punktów. Taki model poddany zostaje analizie wymiarowej. Systemu tego teoretycznie nie ogranicza wielkość skanowanych elementów.

Opisany skaner wraz z oprogramowaniem znajduje się na wyposażeniu Zakładu Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej.

MATERIAŁY, METODYKA PRZETWÓRSTWA I POMIARÓW

Do badań wykorzystano komercyjny izotaktyczny polipropylen o nazwie handlowej Moplen HP500J o gęstości 900kg/m^3 oraz wskaźniku szybkości płynięcia $\text{MFI}=3,2\text{g}/10\text{min}$ ($230^\circ\text{C}/2,16\text{kg}$). Jako nukleant powodujący modyfikację struktury i właściwości zastosowano benzoesan sodu w dalszej części opracowania oznaczany jako NaBz.

W przypadku materiału modyfikowanego osnowa polimerowa została wymieszana z nukleantem w ilości 1% wag. NaBz, w procesie dwukrotnego wytłaczania na wylączarce jednoślindakowej z wykorzystaniem ślimaka o specjalnej konstrukcji (wyposażonego w strefę intensywnego mieszania). Granulat, niezbędny w kolejnym etapie wtrysku, otrzymywany był metodą ciągłej paletyzacji, z wylóczyny utwardzonej uprzednio w wannie chłodzącej. Przygotowanie tworzywa odbywała się na prostym granulatorze frezowym.

Tabela . 1. Parametry przetwarzania iPP; wtryskarka ENGEL ES 80/20 HLS

Table. 1. Parameters of processing iPP; injection machine ENGEL ES 80/20 HLS

Ciśnienie wtrysku:	70 [MPa]	Ciśnienie docisku:	55 [MPa]
Prędkość obrotowa ślimaka:	105 [obr/min]	Ciśnienie uplastyczniania:	1,5 [MPa]
Skok ślimaka:	65 [mm]	Prędkość wtrysku:	100 [mm/s]
Temperatury układu uplastyczniania:	Dysza: $210\text{ }^\circ\text{C}$; III Strefa: $230\text{ }^\circ\text{C}$; II Strefa: $215\text{ }^\circ\text{C}$; I Strefa: $195\text{ }^\circ\text{C}$		

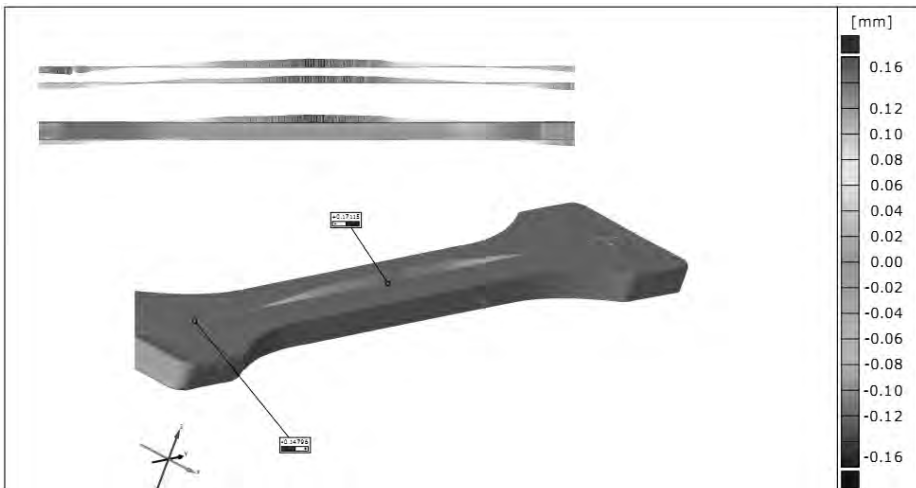
Wypraski kształtowane były w procesie wtryskiwania z wykorzystaniem wtryskarki hydraulicznej ENGEL ES 80/20 HLS przy zmiennej temperaturze formy wynoszącej w kolejnych próbach odpowiednio 20, 40, 60 i 80°C . Pozostałe parametry procesu przetwórczego przedstawione zostały w Tabeli 1.

W przypadku wtryskiwania polipropylenu modyfikowanego NaBz udział fazy krystalicznej jest większy co powoduje zwiększenie skurczu przetwórczego przy niezmiennych pozostałych parametrach procesu.

Pomiary z wykorzystaniem skanera optycznego zostały wykonane głowicą o polu pomiarowym 75x75mm. Wyniki zaprezentowano w postaci mapy odchyłek oraz przekrojów inspekcyjnych w charakterystycznych punktach (rys. 2, 3 i 4). Jako element referencyjny przyjęto próbkę wtryskiwaną w temperaturze formy wynoszącej 20°C.

WYNIKI BADAŃ

Ze względu na dużą objętość wyników zaprezentowane zostały przykładowe odkształcenia o największych wartościach oraz ilustracje oddające charakterystykę pracy z oprogramowaniem firmy GOM.

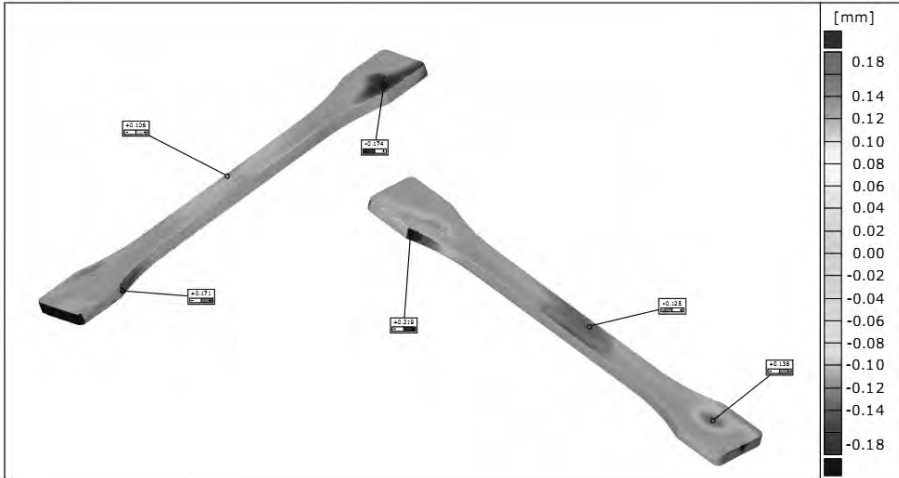


Rys. 2. Wzdłużny przekrój inspekcyjny z oznaczeniem punktów o maksymalnych i minimalnych odchyłkach względem modelu referencyjnego.

Fig. 2. Longitudinal inspection section with the designation of the points of maximum and minimum deviations of the reference model.

Na rysunku nr 2 zaprezentowano przykład przekroju inspekcyjnego w orientacji wzdłużnej z oznaczeniem punktów minimalnej i maksymalnej odchyłki. Opisany przekrój powstał poprzez nałożenie modelu zeskanowanej próbki polipropylenowej wtryskiwanej w temperaturze 40°C na zeskanowany model próbki polipropylenowej w temperaturze 20°C (element referencyjny). Zauważyć można znaczne wygięcie wyroby wykonanego z PP wtryskiwanego w temperaturze 40°C.

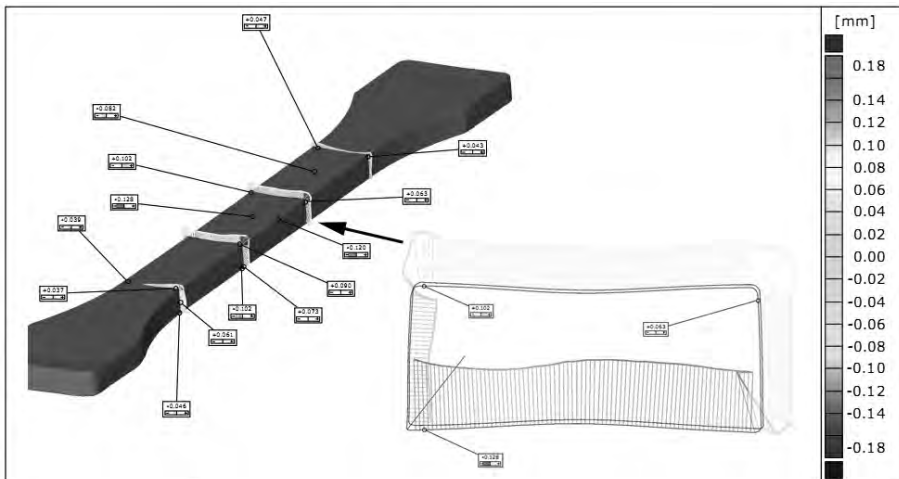
Rysunek nr 3 to prezentacja globalnej mapy odchyłek (w dwóch położeniach) wyroby wykonanego z PP wtryskiwanego w temperaturze 80°C w odniesieniu do elementu referencyjnego. Widoczne punkty to lokalne maksima i minima zaobserwowanych deformacji z oznaczeniem ich wartości.



Rys. 3. Mapa odchyłek z oznaczeniem punktów charakterystycznych analizowanego elementu, przedstawionego w dwóch położeniach.

Fig. 3. Deviations map with a characteristic points of the analyzed element, shown in two positions.

Wyniki pomiaru na rysunku nr 4 zaprezentowane zostały jako poprzeczne przekroje inspekcyjne w czterech (równomiernie oddalonych od siebie) miejscach badanego elementu. Przekroje inspekcyjne powstały poprzez nałożenie modelu próbki wykonanej z PP wtryskiwanej w temperaturze 80°C na element referencyjny. Oznaczone zostały również punkty minimalne i maksymalne odchyłki z prezentacją jej wartości.



Rys. 4. Poprzeczne przekroje inspekcyjne z oznaczeniem punktów charakterystycznych. W dolnym prawym rogu, powiększenie jednego z przekrojów.

Fig. 4. Cross inspection section of the marked landmarks. In the lower right corner, magnification of one of the sections.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Ważne i decydujące znaczenie ma we współczesnej metrologii sprzęt pomiarowy. Dotyczy to szczególnie pomiarów stosowanych w budowie i eksploatacji maszyn oraz różnego rodzaju urządzeń mechanicznych. Jak wykazują dotychczasowe obserwacje, jakość wytwarzania i warunki praktycznego stosowania takich wyrobów są w dużej mierze uzależnione od stosowanej techniki pomiarowej, w której stosuje się nowoczesne narzędzia pomiarowe [1].

Z przeprowadzonych badań wynika, że technika współrzędnościowa to nowoczesne i przyszłościowe narzędzie w procesie kształtowania dokładności wykonania wyrobu. Podstawową przewagą współrzędnościowych maszyn pomiarowych nad innymi przyrządami pomiarowymi jest ich dokładność i możliwość pomiaru dowolnej geometrii wyrobu. Te cechy pozwalają zastosować WTP do badań wymagających dużej dokładności oraz wszędzie tam, gdzie zależy nam na kompleksowej ocenie spełnienia wymagań geometrycznych [2].

Optyczne metody pomiaru z wykorzystaniem techniki współrzędnościowej cechują się: skróceniem czasu pomiaru i późniejszej analizy, brakiem konieczności programowania maszyny. Co najważniejsze ilość danych dostarczonych do analizy metrologicznej zmierzonego elementu jest nieporównywalnie większa niż w tradycyjnych metodach pomiaru. Późniejsze przeprowadzenie działań inspekcyjnych dostarcza kompleksowych informacji dotyczących geometrii i jej odchyłek od znamionowego profilu wyrobu. Ponadto niepewność pomiaru optycznych skanerów 3D jest na poziomie, który w zupełności pokrywa potrzeby dokładności formowania wyrobów w przetwórstwie tworzyw sztucznych. Te wszystkie cechy warunkują skuteczne i zasadne zastosowanie optycznych narzędzi współrzędnościowej techniki pomiarowej w geometrycznych pomiarach części wykonanych z tworzyw sztucznych. Ponadto cecha tworzyw polipropylenowych czyli ich mała gęstość a przez to ich mała sztywność, w metrologii jest ich wadą, gdyż nawet najmniejszy nacisk pomiarowy prowadzi do odkształceń, co uniemożliwia uzyskanie wiarygodnych wyników lub prowadzi do konieczności projektowania specjalnego oprzyrządowania. Ta bariera nie dotyczy optycznych narzędzi współrzędnościowej techniki pomiarowej.

PIŚMIENNICTWO

1. Adamczak S.: Pomiary geometryczne powierzchni. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008, s. 219, 269.
2. Grzelka M., Augustyniak M.: Wykorzystanie WTP w analizie wpływu nawęglania na dokładność geometryczną w procesie kształtowania wyrobu. Materiały konferencyjne wydane jako praca zbiorowa pod redakcją Jerzego Śładka i Władysława Jakubca pt. Postępy w metrologii współrzędnościowej. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2010, s.157-158.

3. Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994, s. 7.
4. Sterzyński T.: Nucleation by Additives In Semi-Crystalline Polymers: Effects on Mechanical Behaviour [w Performance of plastics, Praca zbiorowa], Hanser Verlag, Munich 2001, rozdział 12.
5. Sterzyński T.: Processing and property improvement in isotactic polipropylen by heterogeneous nucleation. Polimery 2000, nr 45, s. 786-791.
6. Pachała A., Grzelka M.: Program dla sprawdzania dokładności maszyn współrzędnościowych wzorcem stopniowym z wykorzystaniem oprogramowania PC-DMIS, „Pomiary, Automatyka, Kontrola” nr 1/2010 s.70-72

THE USE OF OPTICAL TOOLS OF COORDINATE MEASURING TECHNIQUE IN THE STUDY OF DEFORMATION OCCURRING IN POLYMER PROCESSING

Summary

This paper presents a practical aspect of the application of modern coordinate measuring technique in plastics processing. On the example of the 3D scanner ATOS II GOM's analysis of the possibility and appropriateness of use of these tools in the researches of polymeric materials. In connection with the use of different parameters of the injection molding of polymeric materials receive different degrees of crystallinity of the material which we can observe as geometry deformation in the metrological analysis. Observation of these deformations and the subsequent analysis of the sample allows to determine the impact of process parameters on the accuracy of the geometric moldings.

Keywords: CMM, deformations, plastics, 3D scanner.

Elżbieta Bączek, Jerzy Danielak, Barbara Staniewicz-Budnik ¹⁾

BADANIA JAKOŚCI ŚCIERNIC W ASPEKTCIE ZGODNOŚCI Z WYMAGANIAMI BEZPIECZEŃSTWA

Streszczenie: W referacie przedstawiono wyniki badań ściernic z elektrokorundu o spoiwie żywicznym, wzmocnionych siatką z włókniny pod względem bezpieczeństwa. Zostały one wykonane w ramach projektu inżynierskiego, w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania. Badania wytrzymałościowe narzędzi na rozrywanie pod względem siły odśrodkowej przeprowadzono na unikatowym stanowisku WRS 26, zaprojektowanym i wykonanym w IZTW. Korzyścią wynikającą z tych badań jest przede wszystkim większa konkurencyjność narzędzi posiadających certyfikat.

Słowa kluczowe: ściernice elektrokorundowe, metody badań, wytrzymałość na rozrywanie.

WSTĘP

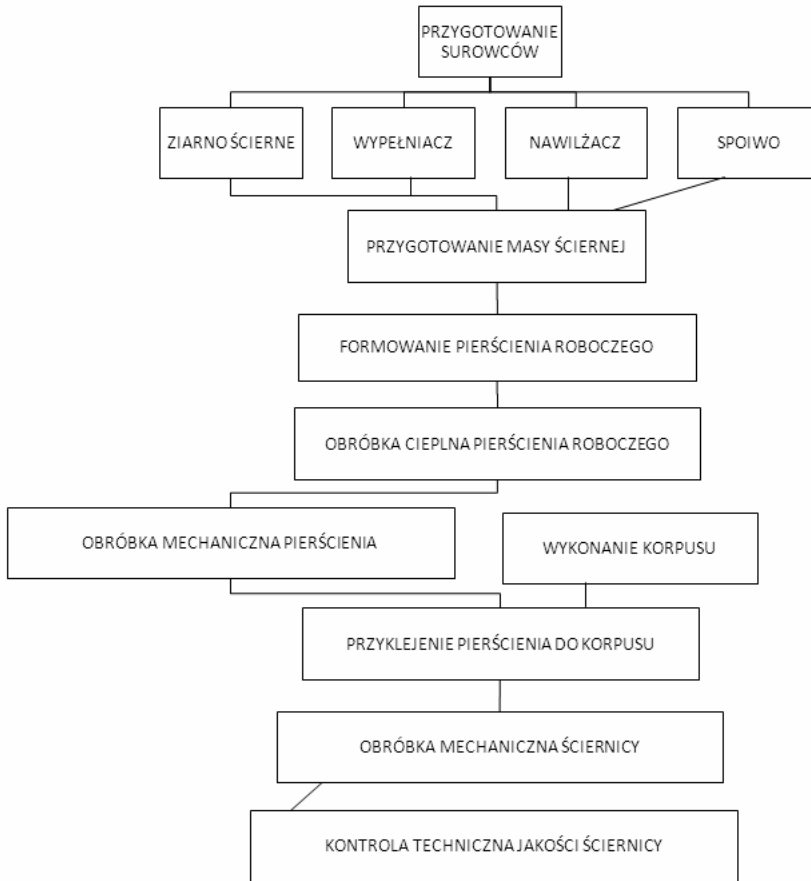
Proces technologiczny wytwarzania narzędzi ściernych obejmuje kilka czynności [4], takich jak: przygotowanie surowców, przygotowanie masy ścierniej zawierającej ziarno ściernie, spoiwo, modyfikatory i dodatki, przygotowanie korpusu, formowanie pierścienia roboczego, obróbkę cieplną pierścienia roboczego, obróbkę mechaniczną pierścienia, przyklejenie pierścienia do korpusu (w przypadku ściernic z korpusem), obróbkę mechaniczną ściernicy, oraz kontrolę techniczną jakości ściernicy. Ponieważ konwencjonalne narzędzia ściernie powinny być skonstruowane i wykonane w taki sposób, aby wytrzymały siły i obciążenia przewidywane podczas użytkowania zgodnie z przeznaczeniem, to nie powinny wykazywać widocznych wad lecz spełniać wymagania podane w normie PN – EN 12413:2008. Poszczególne fazy procesów technologicznych wytwarzania narzędzi ściernych przedstawiono schematycznie na rysunku 1 [1].

W przypadku narzędzi ściernych supertwardych, poddawanych podczas operacji obróbkowych wysokim naprężeniom istotny jest dobór odpowiedniego współczynnika bezpieczeństwa oraz minimalnych prędkości obwodowych granicznych w zależności od typu szlifierki, sposobu szlifowania i maksymalnej prędkości roboczej. Powinny one również odpowiadać dodatkowym wymogom zawartym w normie PN – EN 13236:2003.

Zarówno konwencjonalne jak i supertwarde materiały ściernie, z których wykonywane są narzędzia ściernie muszą charakteryzować się określonymi właściwościami dostosowanymi zarówno do obrabianego materiału jak i rodzaju proce-

¹⁾ Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków.

su. Właściwości te określa charakterystyka materiału ściernego oraz charakterystyka narzędzia [3, 4].



Rys. 1. Schemat procesów technologicznych wytwarzania narzędzi ściernych [1]

Fig. 1. The scheme of the technological processes of the abrasive tools manufacturing [1]

METODYKA BADAŃ

Badanie przeprowadzono w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie, w Laboratorium Badań Narzędzi Ściernych i polegało na weryfikacji zgodności wyrobu z wymaganiami bezpieczeństwa.

Do badania użyto 3 ściernic płaskich konwencjonalnych do przecinania typu 41 Ø230x2x22,2 95A 46 T BF INOX ze spoiwem żywicznym wzmocnionym siatką z włókniny, o wymiarach: średnica zewnętrzna $D = 230\text{mm}$, grubość warstwy ściernej $T = 2\text{mm}$, średnica otworu $H = 22,2\text{mm}$. Badane ściernice wykonane były z elektrokorundu 95A o wielkości ziarna 46, twardości T i przeznaczone

do pracy z podwyższonymi prędkościami $v = 80\text{m/s}$ przy maksymalnej prędkości roboczej 6650min^{-1} .

Przeprowadzone badania bezpieczeństwa obejmowały: cechowanie, weryfikację wymagań ogólnych, badania wielkości geometrycznych, badania niewyważenia statycznego, jak również badania wytrzymałości dynamicznej na rozrywanie przy podwyższonej prędkości obrotowej. Badanie wytrzymałościowe przeprowadzono na unikatowym stanowisku WRS 26 zaprojektowanym i wykonanym w IZTW [2].

Zgodnie z normą PN – EN 12413:2008 sprawdzenie elementów cechowania polegało na:

- sprawdzeniu miejsca cechowania,
- sprawdzeniu wyglądu etykiety związanej z narzędziem,
- sprawdzeniu wymiarów etykiety i kolorowych pasków,
- sprawdzeniu zawartości świadectw i atestów materiałowych zgodnie z oznakowaniem na etykiecie oraz sposobu określenia materiałów i charakterystyki własności fizykomechanicznych wg danych producenta,
- sprawdzeniu świadectw przeprowadzenia badania próbnej prędkości obwodowej, tj. miejsca przeprowadzenia tych badań, sposobu ich wykonania, sposobu mocowania i wartości próbnej prędkości obwodowej.

Weryfikacja wymagań ogólnych została przeprowadzona zgodnie z normą PN – ISO 525:2001 poprzez:

- kontrolę wzrokową, polegającą na sprawdzeniu ściernic ze względu na widoczne wady,
- określenie wzmocnienia ściernic materiałem włóknistym, w wyniku oględzin: ilości siatek zawartych w ściernicach, rodzaju splotu zastosowanego w siatce, rodzaju materiału siatki, rozmieszczenia wzmocnienia w ściernicach,
- określenie gęstości ρ [g/cm^3] i masy ściernicy m [g].

Kontrolę wymagań wymiarowych ściernicy wykonano poprzez pomiar:

- średnicy zewnętrznej D ,
- średnicy otworu H ,
- wysokości T .

Ponadto sprawdzono tolerancję wykonania ściernic $T_{H_{recc}} \leq T_H$, bicie promieniowe T_{br} [mm] i bicie osiowe T_{bo1} , T_{bo2} [mm], masę zastępczą niewyważenia statycznego m_{dop} [g] oraz niewyważenie statyczne $U_{dop} \leq U_p$.

Wymagania wytrzymałościowe weryfikowano na podstawie doboru odpowiedniego współczynnika bezpieczeństwa według PN – EN 12413:2008. Badanie wytrzymałości dynamicznej na rozrywanie ściernic obejmowało pomiar prędkości obrotowej rozerwania narzędzia oraz obliczenie prędkości obwodowej rozerwania. Było to badanie niszczące narzędzie pod działaniem siły odśrodkowej, wykonywane poprzez zwiększenie prędkości obrotowej badanego narzędzia. Podczas badania sprawdzano przy jakiej prędkości obwodowej v_{br} narzędzie ulega rozerwaniu i czy osiąga najmniejszą wymaganą prędkość graniczną $v_{br_{min}}$, jak również określano

największą zarejestrowaną prędkość obrotową n_{max} . Podczas próby na wytrzymałość przy obciążeniu siłą odśrodkową, prędkość obrotową zwiększano w sposób ciągły do momentu rozerwania ściernicy, bądź też osiągnięcia największej oczekiwanej albo możliwej do uzyskania prędkości obrotowej. Prędkość obrotową mierzono z dokładnością $<\pm 1\%$. Z wartości prędkości obrotowej n_{br} , przy której nastąpiło rozerwanie próbki lub z wartości największej zmierzonej prędkości obrotowej n_{max} , podczas której próbka nie uległa zniszczeniu oraz z wielkości średnicy zewnętrznej ściernicy D obliczono prędkość obwodową rozerwania v_{br} , [m/s], zgodnie ze wzorem [7]:

$$v_{br} = \frac{\pi \cdot D_{sr} \cdot n_{br}}{60 \cdot 10^3} \quad (1)$$

gdzie:

- D_{sr} – wartość średnia średnicy zewnętrznej ściernicy, mm,
- n_{br} – prędkość obrotowa rozerwania ściernicy, obr./min.

WYNIKI BADAŃ

Wyniki końcowe badań są zapisem danych charakterystycznych zawartych na etykietach przedstawionych do badań narzędzi ściernych.

Tabela 1. Poprawność cechowania ściernic typu 41 Ø230x2x22,2 95A 46 T BF INOX
Table 1. Correctness of marking the grinding cut-off wheels of type 41 Ø230x2x22,2 95A 46 T BF INOX

Sprawdzenie cechowania	Wymagania	Wynik badania
Sprawdzenie miejsca cechowania	na wyrobie lub etykietce związanej z wyrobem	na etykietce
- kolorowy pasek	czerwony	Czerwony
- szerokość paska	5÷20 mm	13,4 mm
Sprawdzenie cechowania:		
- symbol kształtu	41	41
- kolejność podawania wymiarów	$D \times U \times H...$	$D \times U \times H$
- średnica zewnętrzna	230	230
- wysokość	≤ 4	2
- średnica otworu	22,23	22,23
- kolejność podawania oznaczeń własności fizykomechanicznych	np. A30R BF	A46 T BF
- rodzaj ścierniwa	A- elektrokorund	A
- wielkość ziarna	24	46
- twardość	E	T
- spoiwo	BF – żywiczne, wzmocnione	BF
- dopuszczalna prędkość robocza (obwodowa) v_s	max. 80 m/s	80 m/s
- maksymalna prędkość obrotowa ściernicy n_s	6.600 obr./min, RPM, 1/min	6.600 1/min
- deklaracja zgodności	EN 12413	ISO 9001:2008 EN 12413
- ograniczenie stosowania	niedozwolone szlifowanie boczne	tylko do cięcia oraz 6 szt. znaków informacyjnych
- data produkcji	+	Data ważności V 09/2013
- zastosowanie	+	INOX

Dla ściernic typu 41 Ø230x2x22,2 95A 46 T BF INOX wyniki badania poprawności cechowania przedstawiono w tabeli 1, badania wymagań ogólnych ściernic w tabeli 2, a dokładność wymiarowo-kształtową zestawiono w tabeli 3. Z kolei tabela 4 zawiera wyniki pomiaru dopuszczalnego niewyważenia ściernic, a tabela 5 wytrzymałości dynamicznej na rozerwanie. Sprawdzenie tolerancji wykonania zestawiono w tabeli 6.

Tabela 2. Wyniki badań wymagań ogólnych ściernic

Table 2. The results of examination the grinding wheels general requirements

Sprawdzenie wyglądu zewnętrznego	Wymagania	Wynik badania
- barwa ściernicy	jednolita	jednolita.
- wymiary siatki wzmacniającej	X×Y×Z	0,8×4,15×4,4, mm
- ilość siatek	-	2
- rodzaj splotu	plócienny, panama, obtaczany (skręcony)	splot panama
sprawdzenie pęknięć	niedopuszczalne	brak
uszkodzenia	-	brak
Sprawdzenie gęstości i masy	Wymagania	Wynik pomiaru
- gęstość r , g/cm ³	- gęstość – średnia, wg przeprowadzonych obliczeń 1,78 g/cm ³	śc. 1 – 1,75 śc. 2 – 1,82 śc. 3 – 1,77
- masa, g	- masa – średnia, wg przeprowadzonych pomiarów 188,6 g	śc. 1 – 189,2 śc. 2 – 186,4 śc. 3 – 190,2

Tabela 3. Dokładność wymiarowo-kształtowa ściernic typu 41

Table 3. The grinding wheels of type 41 dimensional and shape accuracy

Sprawdzenie wymiarów	Wymagania	Wynik pomiaru
- średnica zewnętrzna D , mm	230 _{-0,1} ^{+0,5} mm	śc. 1 – 229,7 śc. 2 – 229,2 śc. 3 – 229,2
- wysokość T , mm	2 _{-0,3} ^{+0,3} mm	śc. 1 – 2,6 śc. 2 – 2,5 śc. 3 – 2,6
- średnica otworu H , mm	22,23 ₀ ^{+0,16} mm	śc. 1 – 22,53 śc. 2 – 22,45 śc. 3 – 22,53

Tabela 4. Wyniki pomiaru dopuszczalnego niewyważenia ściernic typu 41

Table 4. The grinding wheels of type 41 permissible unbalance measurement results

Sprawdzenie dopuszczalnego niewyważenia	Wymagania	Wynik pomiaru
- masa zastępcza niewyważenia m_2 , g - dla $k = 0,20$	2,75 g	śc. 1 – 1,30 śc. 2 – 1,60 śc. 3 – 1,47

Tabela 5. Wyniki badania wytrzymałości dynamicznej na rozerwanie

Table 5. The results of the grinding wheels bursting strength tests

Sprawdzenie wytrzymałości dynamicznej na rozerwanie dla $v_s = 80$ m/s	Wymagania dla $S_{br} = 3,5$	Wynik pomiaru
- najniższa prędkość obwodowa rozerwania v_{br} , m/s	150	śc. 1 – 167,1 śc. 2 – 182,1 śc. 3 – 175,2
- wymagana, najmniejsza prędkość obrotowa rozerwania n_{brmin} , obr/min	12.500	śc. 1 – 13900 śc. 2 – 15185 śc. 3 – 14607
Sbr – współczynnik bezpieczeństwa ze względu na rozerwanie pod wpływem siły odśrodkowej.		

Tabela 6. Wyniki sprawdzenia tolerancji wykonania ściernic

Table 6. The results of examination the grinding wheels manufacturing tolerances

Sprawdzenie tolerancji wykonania	Wymagania	Wynik pomiaru
- tolerancja bicia promieniowego T_{br} , mm	1,0 mm	śc. 1 – 0,56 śc. 2 – 0,15 śc. 3 – 0,60
- tolerancja bicia osiowego $T_{bo/s}$, mm	1,0 mm	śc. 1 – 0,26 śc. 2 – 0,55 śc. 3 – 0,16
- tolerancja bicia osiowego $T_{bo/l}$, mm	1,0 mm	śc. 1 – 0,65 śc. 2 – 0,58 śc. 3 – 0,07
- nierównoległość T_n , mm	0,3 mm	śc. 1 – 0,20 śc. 2 – 0,29 śc. 3 – 0,16

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań ściernic typu 41 Ø230x2x22,2 95A 46 T BF INOX na zgodność z wymaganiami bezpieczeństwa w Laboratorium Badań Narzędzi Ściernych, w IZTW stwierdzono, że:

- ściernice wykazały zgodność z wymaganiami poprawności cechowania oraz z wymaganiami ogólnymi,
- dopuszczalne niewyważenie i nierównoległości powierzchni czołowych ściernic było w granicach tolerancji wykonania,
- w zakresie wymagań geometrycznych ściernice wykazały niezgodność, co skłania do podjęcia dalszych działań korygujących, mających na celu zatwierdzenie zgodności wyrobów z wymaganiami bezpieczeństwa.

Szczególna precyzja wykonania narzędzi ściernych przyczynia się do poprawności ich wykonania w zakresie wymagań geometrycznych oraz zatwierdzenia zgodności tych wyrobów z wymaganiami bezpieczeństwa.

PIŚMIENNICTWO

1. Kajino H., Ichida Y., Sato R., Kiminami H.: Enhancement of Grinding Performance Based on Improvement of Uniformity in Structure in Vitrified Bonded cBN Wheels. Materiały konferencyjne z konferencji organizowanej przez American Society for Precision Engineering. 26 – 31.10.2003, Portland, Oregon.
2. Danielak J., Wilk W., Mielnicki W., Kowalczyk A., Bączek E.: Badania narzędzi obrotowych pod kątem bezpieczeństwa. Agenda Wydawnicza SIMP. Warszawa, 2011. Mechanik, nr 2/2011, s. 106 – 110.
3. Staniewicz – Brudnik B.: Ściernice z regularnego azotku boru ze spoiwem ceramicznym – nowe możliwości w obróbce ścierniej. Agenda Wydawnicza SIMP. Warszawa, 2010. Mechanik, nr 8 – 9/2010, s. 576 – 577.
4. Jankowski E., Skupiński S.: Materiały i wyroby ściernie. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne. Warszawa, 1971.

THE INVESTIGATION OF QUALITY OF ROTARY GRINDING WHEELS IN ASPECT OF COMPATIBILITY WITH SAFETY REQUIREMENTS

Summary

In the paper it has been presented the research results of terms of safety of the rotary grinding wheels with resin bond reinforced by fibers network which was carried out in the frame of engineering project, at the Institute of Advanced Manufacturing Technology. The investigation of the tools strength in terms of the centrifugal force were carried out on the unique stands of WRS 26, designed and built in the IZTW.

The advantages of this research-tests is better competitiveness of the tools with certificate.

Keywords: electrocorundum abrasive wheels, research tests, strength in terms of the centrifugal force.

Marek Binienda ¹⁾

URZĄDZENIE DO AZOTOWANIA NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH O MAŁYCH PRZEKROJACH W PLAZMIE WYSOKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

Streszczenie: Metody obróbki cieplno chemicznej narzędzi skrawających i części maszyn o małych przekrojach nie są znane. Uzyskanie twardej warstwy wierzchniej z zachowaniem ostrych krawędzi tnących jest niemożliwe do zrealizowania za pomocą żadnej ze znanych metod. Badania wstępne dotyczące azotowania w plazmie w.cz. pozwoliły na uzyskanie twardych warstw w bardzo krótkim czasie. Azotowanie drobnych narzędzi skrawających i części maszyn o małych przekrojach w plazmie w.cz. wydaje się wielce atrakcyjnym i pożytecznym dla wykorzystania w praktyce produkcyjnej. Niniejszy artykuł przedstawia innowacyjne urządzenie na bazie generatora do azotowania w plazmie w.cz. o pierścieniowym charakterze wyładowania. Wysoka koncentracja energii tego wyładowania pozwala na uzyskanie w bardzo krótkim czasie trwałej warstwy azotowanej o grubości 150µm i twardości 1100HV bez fazy γ' . Stanowisko do azotowania pozwala, w sposób powtarzalny, na uzyskanie wielokrotnego wzrostu trwałości narzędzi skrawających poprzez wytworzenie umocnionej warstwy wierzchniej przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej udarności i niskiej twardości rdzenia.

Słowa kluczowe: azotowanie, plazma, wyładowanie pierścieniowe.

PRZEGLĄD METOD AZOTOWANIA POD KĄTEM PRZYDATNOŚCI DO UMACNIANIA POWIERZCHNI NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH O MAŁYCH ROZMIARACH

W znanym sposobie azotowania gazowego [13] obrabiane elementy nagrzewane są w atmosferze częściowo zdysocjowanego amoniaku lub w mieszaninie amoniaku, azotu i argonu przy nadciśnieniu w stosunku do ciśnienia atmosferycznego. Wadą metody jest to, że warstwy wierzchnie otrzymane w procesie charakteryzują się kruchością.

Inny sposób to azotowanie przy ciśnieniu od 3÷10hPa, w atmosferze zjonizowanej mieszaniny gazów azotu, argonu i wodoru. Jonizacja mieszaniny następuje po przyłożeniu stałego napięcia 700÷1500V pomiędzy obrabiane części i elementy stanowiące katodę, a komorę reaktora (anoda). Metodę tę cechuje rozpylenie warstwy azotowej obrabianych elementów, a szczególnie ich ostrych krawędzi, co uniemożliwia jej zastosowanie do umacniania narzędzi skrawających.

W innej metodzie [10], obrabiany element nagrzewa się indukcyjnie lub płomieniowo. Przedmiot obrabiany jest anodą, a wzbudnik lub palnik doprowadzają-

¹ Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka.

cy podgrzany gaz - katodą. Wskutek podwyższonej temperatury i wysokiej różnicy potencjałów następuje lawinowa jonizacja azotu. Sposób ten nie nadaje się do azotowania przedmiotów o skomplikowanych kształtach ze względu na stosowane w nim podgrzewanie i wysokie napięcie ~100kV.

Azotowanie przeprowadzać można także przy ciśnieniu atmosferycznym. Jonizacja azotu następuje poprzez doprowadzenie sygnału elektrycznego o częstotliwości 100÷480MHz, o amplitudzie 10÷300kV. Niedogodnością tego sposobu jest brak możliwości uzyskania warstw azotowanych bez faz γ' (Fe_4N) i ϵ (Fe_2N) jak również tworzenie się nadtopień na powierzchniach azotowanych.

Kolejnym sposobem ulepszenia cieplno-chemicznego jest azotowanie w plazmie w.cz. w reaktorze o ścianach przepuszczalnych dla pola elektromagnetycznego [6]. Proces przebiega w atmosferze azotu lub mieszaniny azotu z argonem, wodorem i amoniakiem. Jonizacja gazu następuje w polu elektromagnetycznym cewki przy ciśnieniu amoniaku 0,01÷800hPa, przy wyładowaniu o charakterze liniowym bądź pierścieniowym. Obrabiane elementy o większej masie mogą być wstępnie podgrzewane indukcyjnie.

Konkludując, w przypadku narzędzi skrawających o małych rozmiarach metoda azotowania powinna spełniać następujące warunki:

- nie powodować odkształceń obrabianych narzędzi,
- nie nadtopić powierzchni,
- nie rozpylać krawędzi,
- wyeliminować obróbkę wykańczającą powierzchni,
- zapewnić możliwości uzyskania utwardzonej warstwy wierzchniej również w trudno dostępnych miejscach.

Warunkiem koniecznym przeprowadzenia procesu obróbki cieplno-chemicznej jest obecność gazu reakcyjnego. Rozpuszczalność azotu cząsteczkowego (N_2) w stopach żelaza jest pomijalnie mała. Niezbędne jest zatem uzyskanie wysoce reakcyjnego azotu w postaci jedno, dwu lub trzykrotnie zjonizowanego.

PLAZMA

Plazma jest stanem materii charakteryzującym się wysokim stopniem zjonizowania gazu. Stosuje się podział na plazmę wysokotemperaturową i niskotemperaturową w zależności od stanu energetycznego cząstek występujących w plazmie. W tym celu wprowadzono energetyczną skalę temperatur [14]. Dla cząsteczki gazu dwuwymiarowego prawdziwe jest równanie:

$$E = k \cdot T \quad (1)$$

gdzie: E – energia, k – stała Boltzmanna, T – temperatura [K].

Stąd dla $E=1\text{eV}$ zachodzi zależność:

$$T = \frac{E}{k} = \frac{1eV}{k} = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} J}{1,381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}} \approx 11600K \quad (2)$$

W energetycznej skali temperatur 1eV odpowiada temperatura 11 600K. W oparciu o tę skalę, wysokotemperaturową nazywana jest plazma o energii cząstek osiągającej setki elektronowoltów, zaś niskotemperaturową o energii cząstek mniejszej od kilku elektronowoltów.

Stopień jonizacji jest zależny od rozkładu temperatur w plazmie, który waha się od około 10000K w środku wyładowania do około 5000K na obrzeżach. W tych warunkach większość pierwiastków jest częściowo lub całkowicie zjonizowana.

Tabela 1. Stany skupienia azotu

Stan stały	Stan ciekły	Stan gazowy	Plazma
Azot	Azot (LN ₂)	Azot (N ₂)	N ₂ → N ⁺ + N ⁺ + 2e ⁻
T < -210 °C	-210 °C < T < -195,8 °C	T > -195,8 °C	T > 5 000 °C
Molekuły uwięzione w sieci krystalicznej	Cząsteczki uwolnione, w ruchu	Cząsteczki uwolnione, w ruchu, w większym obszarze	Mieszanina cząsteczek, atomów, swobodnych jonów dodatnich i elektronów w dużym obszarze

W przypadku azotu, w obszarze wyładowania plazmowego występuje mieszanina atomów azotu, swobodnych jonów dodatnich i elektronów. Znajdują się one w stanie wzbudzonego oraz rekombinują, pozbywając się energii w postaci promieniowania o określonej długości fali, charakterystycznej dla danego pierwiastka. Stany skupienia azotu przedstawia tabela 1.

Idea azotowania stali w plazmie wysokiej częstotliwości o pierścieniowym charakterze wyładowania jednocześnie spełnia dwa warunki: jonizację azotu cząsteczkowego i wyeliminowanie niekorzystnych zjawisk zachodzących podczas procesu azotowania wymienionych w poprzednim podrozdziale.

WYBÓR METODY WYTWARZANIA PLAZMY

Istnieje wiele sposobów wytwarzania plazmy niskotemperaturowej. Elektryczne generatory plazmy (plazmotrony) służą do zamiany energii pola elektrycznego w energię plazmy. Podział plazmotronów ze względu na charakter wyładowania jest następujący:

- plazmotrony z wyładowaniem łukowym,
- plazmotrony elektrodowe wysokiej częstotliwości,
- plazmotrony bezelektrodowe wysokiej częstotliwości:
 - pojemnościowe,
 - indukcyjne.

W indukcyjnym plazmotronie w.cz. gaz roboczy przepływa przez rurę kwarcową, która otoczona jest cewką indukcyjną (wzbudnik). Plazma wytwarzana jest zmiennym polem magnetycznym, które indukuje w gazie wirowe pole elektryczne (prądy Foucaulta). Prądy te tworzą wiry obejmujące linie sił pola magnetycznego, zgodnie z równaniem Maxwella:

$$\text{rot } j = -\sigma \frac{\delta B}{\delta t} \quad (3)$$

gdzie:

j – gęstość prądu wirowego, B – indukcja pola magnetycznego, σ - przewodność elektryczna.

Przepływ prądów wirowych zgodnie z prawem Joule'a-Lenza prowadzi do wytwarzania dużej ilości ciepła.

$$Q = \frac{I^2}{\sigma} \cdot t \quad (4)$$

gdzie:

Q – ciepło na oporze rzeczywistym $R = \frac{1}{\sigma}$, I – natężenie skuteczne prądu, t – czas przepływu prądu

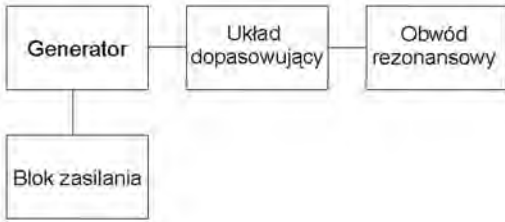
W konsekwencji następuje jonizacja gazu wewnątrz rury kwarcowej. Powstała plazma zamknięta jest w polu cewki, która dostarcza energii elektrycznej do podtrzymania plazmy w analogiczny sposób jak przy nagrzewaniu indukcyjnym. Tak więc generator wysokiej częstotliwości stanowi fundamentalną część stanowiska do azotowania w plazmie wysokiej częstotliwości.

GENERATOR WIELKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

Podstawowym parametrem generatora w.cz. jest częstotliwość pracy. Z uwagi na dużą moc generatora używanego w plazmotronie istnieje konieczność ekranowania w celu ograniczenia emisji zakłóceń. Mimo to generator powinien pracować z częstotliwością z zakresu pasm nie objętych licencjonowaniem ISM (ang. Industrial, Scientific, Medical). Warunki te spełnia generator pracujący w częstotliwościach 27,12MHz lub 40,68MHz. Schemat blokowy generatora mocy przedstawia rysunek 1.

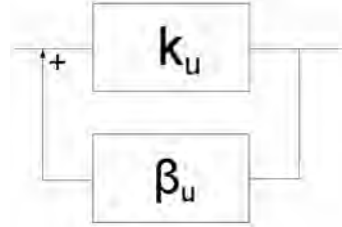
Generator mocy może być zbudowany z wykorzystaniem techniki półprzewodnikowej lub lampowej. Dostępne są elementy półprzewodnikowe mocy, które są w stanie pracować na wybranych częstotliwościach przy mocach dochodzących do 1kW. Są to dla elementów półprzewodnikowych parametry zbliżone do granicznych, a zatem cena ich jest wysoka. Dopuszczalna temperatura pracy tranzystorów jest do trzech razy niższa w stosunku do lamp zaś odporność na nieprzewidziane sytuacje jest w przypadku lamp dużo wyższa. Kolejnym parame-

trem przemawiającym na korzyść lampy jest liniowość charakterystyki. Przy mocach większych od 1kW wybór lampy mocy wydaje się być lepszym rozwiązaniem.



Rys. 1. Schemat blokowy zespołu generatora plazmotronu indukcyjnego

Fig.1. Block diagram of the assembly of the inductive plasmotron's generator



Rys. 2. Schemat blokowy generatora ze sprzężeniem zwrotnym

Fig. 2. Block diagram of the oscillator with positive feedback

Warunkiem wystąpienia generacji dla wzmacniacza z rysunku 2 o wzmocnieniu napięciowym k_u oraz obwodu sprzężenia zwrotnego o transmitancji β_u jest jednocześnie spełnienie dwóch warunków:

warunku amplitudy:

$$|k_u \cdot \beta_u| = 1 \quad (5)$$

oraz warunku zgodności fazy:

$$\phi_k + \phi_\beta = 2 \cdot n \cdot \pi \quad (6)$$

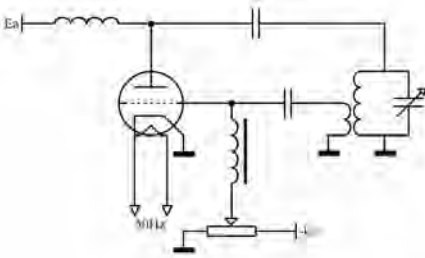
Generator lampowy

Generatory lampowe do plazmotronów indukcyjnych w.cz. są najczęściej układami jednolampowymi, samowzbudnymi LC. Oparte są one na bazie klasycznych układów Meissnera, Hartleya i Colpitsa [15]. W urządzeniu przedstawionym na rysunku 3 generator w układzie Meissnera zbudowany jest na bazie triody mocy.

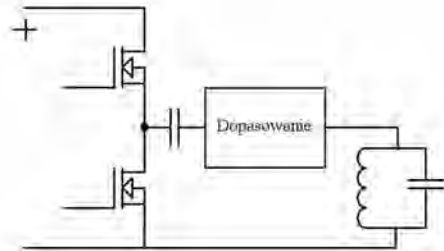
W obwodzie siatki lampy włączone jest ujemne napięcie blokujące siatkę w chwili załączenia napięcia anodowego. W tym stanie nie jest spełniony warunek amplitudy. Generator rozpocznie oscylację dopiero po odblokowaniu lampy. W urządzeniach bardziej złożonych stosuje się układy wielostopniowe. Pierwszym stopniem jest generator samowzbudny małej mocy ze stabilizacją częstotliwości. Kolejne stopnie stanowią wzmacniacz wstępny i wzmacniacz mocy. Wzmacniacze mocy budowane są przeważnie na bazie tetrod mocy, które dzięki dodatkowej siatce (ekranującej) umożliwiają uzyskanie większego wzmocnienia i wyższej częstotliwości pracy [15].

Lampy generacyjne o mocach powyżej 1kW wymagają chłodzenia wymuszonym przepływem powietrza lub wody. Najbardziej rozpowszechnione jest mniej skomplikowane chłodzenie powietrzem. Lampa umieszczana jest w kanale

powietrzynym. Wymagania dotyczące przepływu powietrza i doboru wentylatora można wyznaczyć na podstawie danych katalogowych lampy. Dla ochrony lampy przed uszkodzeniem termicznym należy stosować układy podtrzymujące zasilanie wentylatora w przypadku zaniku napięcia w sieci.



Rys.3. Lampowy generator mocy w.cz.
Fig. 3. Tube RF power oscillator



Rys. 4. Wzmacniacz mocy w.cz. w układzie przeciwobnym
Fig. 4. Push-pull RF power amplifier

Włączanie generatora lampowego musi odbywać się w ściśle określonej kolejności. Jest ona następująca:

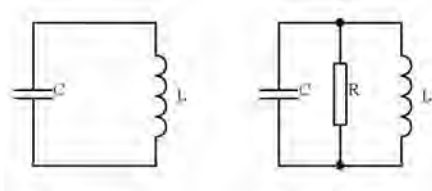
- włączenie sytemu chłodzenia,
 - włączenie żarzenia lampy generacyjnej,
 - Następnie po około 5 minutach:
 - włączenie napięcia blokującego w obwodzie siatki sterującej,
 - włączenie napięcia anodowego,
 - włączenie napięcia w obwodzie siatki ekranującej (tetroda).
- Wyłączenie generatora przebiega w odwrotnej kolejności.

Generator półprzewodnikowy

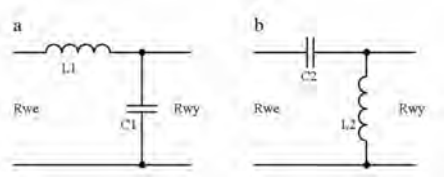
Wyprodukowanie nowej generacji tranzystorów MOSFET spowodowało pojawienie się opartych na nich konstrukcji bloków generatorów. Przykładem takich tranzystorów są pary komplementarne produkowane przez firmę Microsemi [18] o oznaczeniach ARF 446/447. Podzespoły te są przeznaczone do budowy wzmacniaczy selektywnych w.cz. pracujących w klasie C dla częstotliwości z zakresu ISM: 13,56MHz, 27,12MHz jak i 40,68MHz. Rysunek 4 przedstawia typowy układ przeciwobnego wzmacniacza mocy. Szeregowy kondensator odcina składową stałą prądu stanowiąc jednocześnie zwarcie dla składowej zmiennej. Układ dopasowujący zapewnia optymalny transfer mocy do obciążenia. Powinien być tak dobrany, aby stanowił jednocześnie blokadę dla wyższych harmonicznych.

Obwód rezonansowy

Idealny obwód rezonansowy składa się wyłącznie z kondensatora i cewki. Rzeczywiste elementy obwodu wprowadzają straty: cewka posiada niewielką rezystancję szeregową, a kondensator upływność, którą można przedstawić jako dużą rezystancję równoległą. Dodatkowe straty w obwodzie spowodowane są zjawiskiem naskórkowości występującym przy wysokich częstotliwościach. Jeżeli do wnętrza cewki wprowadzona zostanie próbka podlegająca obróbce cieplnochemicznej, to energia spożytkowana na nagrzewanie próbki również stanowi źródło strat w obwodzie. Wszystkie te straty tłumią rezonans. Na rysunku 5 są one reprezentowane przez równoległą rezystancję R.



Rys. 5. Obwód rezonansowy
Fig. 5. Resonant circuit



Rys. 6. Filtr typu L
Fig. 6. L-match network

W rezonansie prądy płynące przez cewkę i kondensator mają tę samą amplitudę lecz przeciwną fazę i znoszą się wzajemnie. Zatem, w stanie rezonansu, jedynym obciążeniem rejestrowanym na zaciskach źródła mocy wysokiej częstotliwości jest wypadkowa rezystancja strat obwodu.

Układ dopasowujący

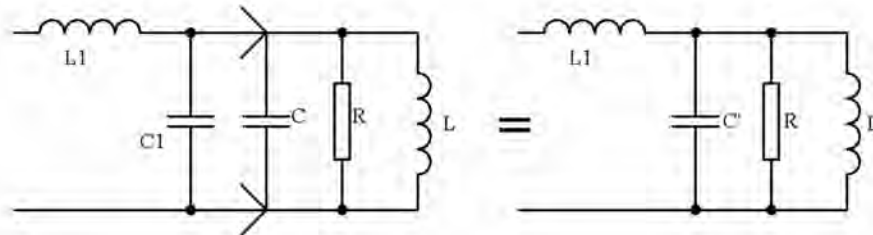
Układ dopasowujący ma za zadanie dopasowanie rezystancji obwodu wyjściowego źródła mocy do wysokiej rezystancji obwodu LC w stanie rezonansu. Największa moc jest przenoszona, gdy rezystancje te są równe. W przypadku różnych wartości rezystancji należy zastosować transformację. Do tego celu stosowane są elementy L i C w różnych konfiguracjach. Transformacja może być zrealizowana na wiele sposobów. Każdy z nich posiada wady i zalety. Dopasowanie poprzez:

- odczep cewki (autotransformator) - charakteryzuje się prostym doбором transformacji poprzez zmianę miejsca odczepu (zmiana stosunku zwojów), możliwością wykonania uzwojeń z ułamkową częścią zwojów; brak separacji galwanicznej
- uzwojenie sprzęgające, w tym transformatory w.cz. z rdzeniami ferrytowymi – charakteryzuje się łatwą zmianą transformacji przez zmianę liczby zwojów zarówno w uzwojeniu pierwotnym jak i wtórnym, odpornością na zakłócenia, możliwością zarówno symetrycznego jak i niesymetrycznego obciążania, separacją galwaniczną; kłopotliwa jest eksperymentalna zmiana transformacji,

- dzielniki pojemnościowe, realizujące podział pojemności w gałęzi z kondensatorem – charakteryzuje je łatwy dobór współczynnika transformacji; kłopotliwa jest eksperymentalna zmiana sprzężenia,
- filtry LC takie jak filtr typu L, π , T itp. – charakteryzują się prostą budową i łatwym doбором transformacji.

Filtr dopasowujący w generatorach mocy plazmotronów powinien charakteryzować się przede wszystkim możliwością zmian transformacji. Rezystancja obciążenia obwodu rezonansowego plazmotronu jest wyższa od rezystancji wyjściowej lampowego źródła sygnału mocy w.cz. i dużo wyższa w stosunku do oporności wyjściowej źródła tranzystorowego. Rezystancja ta jest wypadkową strat w obwodzie rezonansowym i w związku z tym jest zależna zarówno od wielkości wsadu przeznaczanego do obróbki cieplno-chemicznej jak i jego rodzaju. Zatem eksperymentalna zmiana wsadów wymusza konieczność zmiany transformacji. Filtr typu L charakteryzuje się prostą budową i łatwym doбором sprzężenia.

Wyróżnia się dwa typy filtrów typu L, przedstawione na rys. 6: z indukcyjnością w gałęzi poprzecznej dla $R_{wy} > R_{we}$ (rys. 6a) lub z pojemnością w gałęzi poprzecznej dla $R_{wy} < R_{we}$ (rys. 6b). Rysunek 7 przedstawia filtr typu L wraz z obwodem rezonansowym oraz schemat zastępczy, w którym dwie równoległe pojemności zastąpione są jedną, będącą ich sumą.



Rys. 7. Schemat zastępczy dopasowanego obwodu rezonansowego
Fig. 7. LCRL model of the work coil arrangement

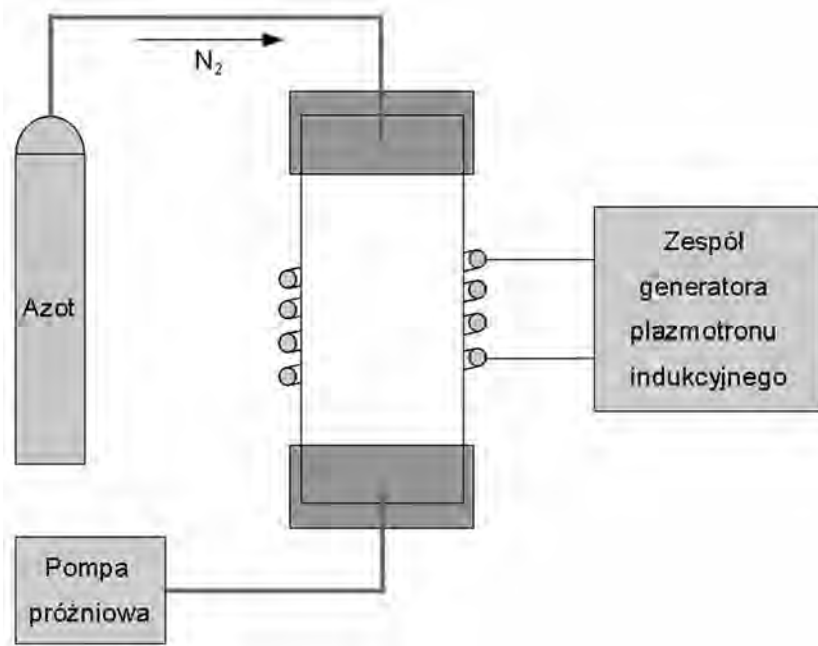
W konsekwencji otrzymuje się obwód rezonansowy LC' - z roboczą cewką wyładowczą zwaną również wzbudnikiem, przestrajającym kondensatorem C' oraz z rezystancją obciążenia R reprezentującą straty w obwodzie - z dopasowaniem rezystancji zrealizowanym za pomocą cewki L_1 . Reasumując, szeregowo cewka (L_1) filtra typu L zapewnia:

- realizację dopasowania rezystancji w rezonansie,
- progresywny wzrost reaktancji indukcyjnej $x_L = 2\pi fL$ stanowiącej barierę dla wyższych harmonicznych,
- zniwelowanie szkodliwych indukcyjności połączeń wyjścia generatora z obwodem rezonansowym, które stają się częścią cewki,

- łatwą modyfikację dopasowania poprzez wymianę cewki bądź zastosowanie wariometru.

STANOWISKO DO AZOTOWANIA NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH O MAŁYCH PRZEKROJACH W PLAZMIE WYSOKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

Plazmotron przedstawiony na rysunku 8 składa się z zespołu generatora w.cz., rury roboczej, pompy próżniowej, butli z gazem roboczym. Rura robocza wykonana ze szkła kwarcowego jest uszczelniona z obydwu końców.



Rys. 8. Schemat blokowy stanowiska do azotowania w plazmie w.cz. o pierścieniowym charakterze wyładowania

Fig. 8. Block diagram of the laboratory stand for nitriding in RF annular glow discharge plasma

Odpowiednie ciśnienie jest utrzymywane przy użyciu pompy próżniowej. Rura robocza znajduje się wewnątrz cewki (wzbudnika) wyjściowego obwodu rezonansowego generatora mocy. Wyładowanie pierścieniowe następuje wewnątrz komory. Kluczowe znaczenie ma dobór parametrów procesu takich jak ciśnienie, czas trwania procesu i częstotliwość pracy generatora.

Istotnym problemem jest odprowadzanie ciepła. Komora wyładowcza musi być wykonana z izolatora odpornego na udary cieplne. Dlatego rury robocze budowane są ze szkła kwarcowego, które odznaczają się temperaturą topnienia wyż-

szą od 1500K. Słabe przewodnictwo cieplne utrudnia odprowadzanie ciepła i może spowodować przegrzanie i w konsekwencji zniszczenie rury. W takim przypadku stosuje się system chłodzenia rury - powietrzny lub wodny.

Gazem roboczym jest azot o wysokiej czystości 99,999%, w związku z tym nie ma potrzeby stosowania dodatkowych systemów oczyszczających.

PODSUMOWANIE

Azotowanie narzędzi skrawających w plazmie w.cz. o pierścieniowym charakterze wyładowania jest sposobem na szybkie i tanie uzyskanie umocnionej warstwy wierzchniej bez fazy γ' . Proces ten zapewnia wielokrotny wzrost trwałości narzędzi. W konsekwencji wzrasta ich żywotność co jest powodem znacznych oszczędności.

Przedstawione urządzenie do azotowania pozwoli poznać wpływ określonych parametrów, takich jak ciśnienie, częstotliwość pracy generatora oraz czas ekspozycji azotowanych próbek na własności warstwy azotowanej.

Szerokie wykorzystanie w przemyśle narzędzi skrawających o niewielkich rozmiarach wykonanych ze stali i wysokie wymagania w zakresie ich jakości wymuszają opracowywanie nowych technologii podwyższenia ich trwałości. Uzasadnia to celowość prowadzenia badań na stanowisku do azotowania w celu opracowania optymalnych warunków obróbki cieplno chemicznej w plazmie o pierścieniowym charakterze wyładowania z wykorzystaniem innowacyjnego zespołu urządzeń.

PIŚMIENNICTWO

1. Haś Z.: Pat. Nr 126128, Pat. Nr. 127-132.
2. Haś Z.: Pat. nr: P191906.
3. Haś Z.: Pat. nr: P178378.
4. Haś Z.: Pat. Nr nr: P185738.
5. Haś Z., Kula P.: Nitrovac'79 nowa technologia obróbki cieplno-chemicznej elementów maszyn i narzędzi. Inżynieria Materiałowa Nr 5 1983.
6. Haś Z., Piotrowski B.: Pat. Nr 192988.
7. Larisch B., Brusky U., Spies H. J.: Plasma nitriding of stainless steels at low temperatures. Surface and Coatings Technology, Volume: 116-119, September, 1999, pp. 205-211.
8. Michler T., Grischke M., Bewilogua K., Dimigen H.: Properties of duplex coatings prepared by plasma nitriding and PVD Ti-C:H deposition on X20Cr13 ferritic stainless steel. Thin Solid Films, Volume: 322, Issue: 1-2, June 8, 1998, pp. 206-212.
9. Musil J., Vlcek J., Ruzicka M.: Recent progress in plasma nitriding. Vacuum, Volume: 59, Issue: 4, December, 2000, pp. 940-951.
10. Pelczyński T., Pat. nr: P87885: Sposób jonowego azotowania metali i ich stopów i urządzenia do jonowego azotowania metali i ich stopów.

11. Priest J.M., Baldwin M. J., Fewell M. P., Haydon S. C., Collins G. A., Short K.T., Tendys J.: Low pressure r.f. nitriding of austenitic stainless steel in an industrial-style heat-treatment furnace. *Thin Solid Films*, Volume: 345, Issue: 1, May 7, 1999, pp. 113-118.
12. Dobrzański L. A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
13. Kula P.: *Inżynieria warstwy wierzchniej*, Wyd. Politechnik Łódzkiej, Łódź 2000.
14. *Praca Zbiorowa: Chemia plazmy niskotemperaturowej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983.
15. Zagajewski T.: *Układy elektroniki przemysłowej*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
16. Nitriding materials, Nitrex Metal Inc., (www.nitrex.com).
17. Wilkinsons Heat Treatment, (www.wilkinsons.com).
18. Application notes (www.microsemi.com).

DEVICE FOR NITRIDING THE CUTTING TOOLS WITH SMALL SECTIONS IN RF PLASMA

Summary

The method of the surface layer hardness of cutting tools as well as the small parts of machines is -up to now- unknown. The obtainment high hardness of the surface layer with sharp cutting edges is impossible to realizing in any other method. The preliminary research of nitriding in plasma RF permitted to obtain hard surface layers in very short time. The nitriding of the cutting tools and the small parts of machines in RF plasma seems to be attractive and useful for many practical applications of production process. The introduced innovative device works on base of generator to nitriding in RF annular glow discharge. The high concentration of energy of RF annular glow discharge let to obtain durable layer with thickness of 150 μm and hardness of 1100HV without γ' phase in very short time. Designed as well as created the original device to process permits to obtain - in repeatable manner- the multiple growth of durability of cutting tools with preservation of high impact strength and low hardness of the core.

Keywords: nitriding, plasma, annular discharge.

Waldemar Polowski, Piotr Bednarski, Daniel Toboła¹⁾

OBRÓBKA WYKOŃCZENIOWA NARZĘDZIAMI DIAMENTOWYMI DO NAGNIATANIA ŚLIZGOWEGO

Streszczenie: Przedstawione zostały możliwości obróbki wykończeniowej – nagniatania ślizgowego nagniatkami diamentowymi wykonanymi przez Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (IZTW) w Krakowie. Zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych nagniatania ślizgowego różnych materiałów konstrukcyjnych o zróżnicowanym składzie chemicznym, różnych właściwościach wytrzymałościowych, plastycznych i fizyko-chemicznych oraz zróżnicowanej strukturze metalograficznej. Wskazano na typowe zalety nagniatania ślizgowego przy użyciu nagniataków diamentowych – uzyskanie znacznej poprawy chropowatości powierzchni stopów aluminium i stali ulepszonych cieplnie do twardości $HRC=45\div 64$ poddanych procesowi nagniatania. Opisano uzyskane wyniki pomiarów parametrów struktury geometrycznej powierzchni (SGP) w układzie 2D (analiza dwuwymiarowa) oraz w układzie 3D (analiza przestrzenna). Wyznaczono współczynnik poprawy chropowatości powierzchni K_{Ra} , czyli stosunek chropowatości Ra przed nagniataniem do chropowatości po nagniataniu. Badania SGP wykazały, że narzędzia diamentowe produkcji IZTW do nagniatania ślizgowego pozwalają uzyskiwać wysoką jakość powierzchni właściwą dla obróbki wykończeniowej.

Słowa kluczowe: nagniatanie ślizgowe, kompozyt diamentowy, struktura geometryczna powierzchni, obróbka wykończeniowa.

WSTĘP

Jakość użytkowa wyrobu zależy m.in. od nowoczesności konstrukcji, rodzaju zastosowanych materiałów i zastosowanej technologii wykonania poszczególnych części tworzących wyrób. Wymusza to ciągłe doskonalenie metod projektowania, rozwój inżynierii materiałowej i technologii wykonania. Jedną z głównych cech jakości użytkowej wyrobu jest odporność na zużywanie się. Odporność ta jest determinowana najczęściej właściwościami warstwy wierzchniej poszczególnych (lub najważniejszych) części wyrobu. Dzięki znajomości (poznaniu) wpływu stanu warstwy wierzchniej na poszczególne właściwości eksploatacyjne części maszyn, możemy w sposób świadomy nimi sterować i uzyskiwać na z góry założonym (wymaganym) poziomie.

O właściwościach eksploatacyjnych części maszyn decyduje stan warstwy wierzchniej (WW) tych elementów wykonanych „na gotowo”, a więc po operacjach obróbki wykończeniowej. Dlatego też istotna jest znajomość wpływu para-

¹⁾ Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków.

metrów technologicznych obróbki wykończeniowej powierzchni części maszyn na stan warstwy wierzchniej (a więc i właściwości eksploatacyjne części).

Do tradycyjnych metod obróbki wykończeniowej zalicza się toczenie wykończeniowe, rozwiercanie, szlifowanie, docieranie, gładzenie, polerowanie. Do nowoczesnych metod obróbki wykończeniowej należy zaliczyć tzw. obróbkę gładkościową lub gładkościowo-umacniającą za pomocą zgniotu powierzchniowego na zimno, tzw. nagniatania. Zasadność zastosowania jednej z ww. metod obróbki musi być starannie rozpatrzona w każdym przypadku. Podstawową cechą wyróżniającą nagniatanie spośród różnych metod obróbki wykończeniowej metali jest wykorzystywanie zjawiska powierzchniowego odkształcenia materiału, dzięki czemu nadaje się warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych pewne cechy, które wpływają korzystnie na właściwości eksploatacyjne wyrobów. Przez zastosowanie obróbki nagniataniem można podwyższyć twardość WW, uzyskać wysoką gładkość powierzchni, wytworzyć w WW naprężenia ściskające, uzyskać topografię powierzchni o założonych wymaganiach, uzyskać powierzchnię wolną od pozostałości ziaren ściernych, narostu itp., powierzchnie o bardzo dobrej przyczepności powłok galwanicznych, dużym udziale nośnym i refleksywności. Większość z ww. cech warstwy wierzchniej jest uznawana przez teoretyków i praktyków tribologii za korzystnie wpływające na szereg właściwości użytkowych, a szczególnie na wytrzymałość zmęczeniową i odporność na zużycie.

W obróbce nagniataniem wyróżnia się ponad 20 odmian, w tym nagniatanie ślizgowe narzędziem diamentowym.

CHARAKTERYSTYKA METODY

Nagniatanie ślizgowe jest zaliczane do grupy metod statycznych, w których kontakt narzędzia (elementu nagniatającego) z materiałem obrabianym jest ciągły, a siła nagniatająca ma stałą wartość. Nagniatanie ślizgowe jest powierzchniową obróbką plastyczną, której zalety są typowe dla tych metod obróbki. Jednocześnie metoda ta zapewnia gładkość i dokładność wymiarową właściwą dla wykończeniowej obróbki mechanicznej.

Podczas nagniatania ślizgowego twardy i gładki element nagniatający jest dociskany do powierzchni obrabianej z ustaloną siłą. Nagniatak przemieszczając się po obrabianej powierzchni powoduje jej wygładzenie. W przypadku materiałów, w których występuje zjawisko umocnienia plastycznego, nagniataniu towarzyszy powstawanie naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej oraz wzrost twardości. W przypadku nagniatania gładkościowego stopień zgniotu i głębokość umocnienia mają dużo mniejsze znaczenie aniżeli poprawa gładkości.

Istotną zaletą nagniatania ślizgowego (wygładzania ślizgowego) jest nie tylko samo wygładzanie powierzchni (zmniejszenie chropowatości), ale również uzyskanie korzystnej z punktu widzenia tribologii struktury geometrycznej powierzchni nagniatanej (SGP). Nagniatanie ślizgowe daje w efekcie nie tylko małą chropowatość powierzchni, ale również duże promienie zaokrągleń wierzchołków

i wrębów nierówności oraz mały kąt ich pochylenia. Wspólnie z wytworzonym zgniotem, wewnętrznymi naprężeniami ściskającymi i zwiększeniem twardości powoduje to zwiększenie odporności na działanie czynników eksploatacyjnych jak: ścieranie, zmęczenie powierzchniowe, korozja.

Ze względu na konieczność zminimalizowania oporów tarcia występujących w procesie nagniatania ślizgowego (tarcia ślizgowego), końcówki narzędzi do jego realizacji wykonuje się z materiałów zapewniających mały współczynnik tarcia. Elementy nagniatające do wygładzania ślizgowego twardych materiałów wytwarza się z syntetycznych kamieni (rubin, szafir), diamentów naturalnych i diamentów syntetycznych. Najlepszym materiałem narzędziowym spełniającym warunek minimalnego tarcia jest diament naturalny posiadający ponadto takie zalety jak: duża twardość, duża przewodność cieplna, duża jednorodność strukturalna ułatwiająca uzyskanie najwyższych gładkości. Elementy nagniatające z diamentów naturalnych są jednak drogie, kruche, mało odporne na uderzenia i mają ograniczone rozmiary. Ponadto narzędzia z diamentów monokrystalicznych (naturalnych) nie są zbyt wygodne w użyciu ponieważ ze względu na silną anizotropię kryształów diamentu wymagają dokładnego ustawienia narzędzia podczas obróbki. Zużywają się one nie tylko przez ścieranie, ale również poprzez wykruszanie, co niekorzystnie wpływa na jakość obrabianych powierzchni. Dlatego też obecnie największe zastosowanie do nagniatania ślizgowego znajdują diamenty syntetyczne, tzw. spieki diamentowe (PCD). Spieki diamentowe (kompozyty diamentowe) składają się z fazy zawierającej ziarna diamentu i fazy wiążącej. Narzędzia z kompozytu diamentowego są wygodniejsze w użyciu, tańsze a właściwościami prawie dorównują narzędziom wykonanym z diamentów monokrystalicznych. Narzędzia te zużywają się tylko poprzez ścieranie. Poprzez odpowiedni dobór fazy wiążącej można otrzymać kompozyty diamentowe o zaplanowanych właściwościach. Rozwój diamentowych narzędzi syntetycznych (polikrystalicznych) usuwa barierę ekonomiczną związaną z zastosowaniem diamentów naturalnych i stwarza nowe perspektywy rozwojowe obróbki nagniataniem ślizgowym. Zakres zastosowań nagniatania ślizgowego ulega ciąglemu rozszerzaniu, a prace nad jego rozwojem prowadzi wiele ośrodków w tym również Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (IZTW) w Krakowie.

METODYKA BADAŃ

W IZTW zaprojektowano i wykonano serię nagniataków diamentowych do nagniatania ślizgowego powierzchni (w szczególności wałków). Elementy (kończówki) robocze nagniataków posiadały zakończenie w kształcie czaszy kulistej o różnych promieniach. Elementy te zostały wykonane z kompozytu diamentowego z ceramiczną fazą wiążącą w postaci Ti_3SiC_2 , który to kompozyt jest wytwarzany w IZTW. Zastosowanie węgla tytanowo-krzemowego pozwoliło na uzyskanie kompozytu o bardzo dobrych właściwościach, tj. odporności na wysoką temperaturę, odporności chemicznej, dużej sztywności przy jednoczesnej plastyczności,

dużej odporności na ścieranie oraz małym współczynnikiem tarcia przy współpracy z metalem [1].

Zespoleń (osadzenia) diamentowych elementów nagniatających z metalowymi korpusami dokonano przez klejenie za pomocą specjalnych klejów stosowanych wcześniej w IZTW głównie do klejenia elementów roboczych frezów ślimakowych, co stanowiło istotę tej innowacyjnej technologii wytwarzania narzędzi [6, 10]. Dotychczas do osadzania elementów diamentowych nagniataków w korpusach stosowano lutowanie przy użyciu tzw. aktywnych lutów.

Za pomocą wykonanych nagniataków diamentowych typu NKD, przeprowadzono próby nagniatania ślizgowego wałków z materiałów znacznie różniących się składem chemicznym, właściwościami wytrzymałościowymi, plastycznymi, fizykochemicznymi oraz strukturą metalograficzną (m.in. zahartowanej stali łożyskowej narzędziowej, stali nierdzewnej, stopu aluminium, itd.).

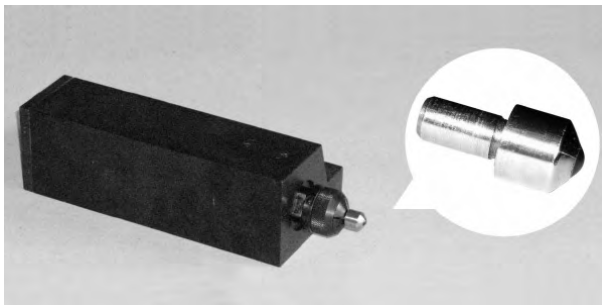
Próby nagniatania przeprowadzono na centrum tokarsko-frezarskim typu NL 2000 SY firmy Mori Seiki. Jako obróbkę poprzedzającą nagniatanie stosowano toczenie wzdłużne nożem oprawkowym. Do toczenia stali hartowanych i ulepszanych cieplnie stosowano ostrza z ceramiki mieszanej TACN, ale również ostrza z materiałów supertwardych (produkcji IZTW). Powierzchnia próbek (wałków) po obróbce poprzedzającej nagniatanie posiadała różną chropowatość Ra w zależności od rodzaju materiału obrabianego i jego twardości.

Do nagniatania stosowano jako środek smarujący olej maszynowy, podawany w postaci mgły olejowej w celu zmniejszenia tarcia w procesie obróbki i zwiększenia trwałości nagniataków. Stosowano jedno przejście nagniatające ($i=1$). Prędkość nagniatania wynosiła ok. $v=40$ m/min. Jako czynniki zmienne w badaniach stosowano:

- siłę nagniatania F, N,
- posuw wzdłużny f, mm/obr.

Wielkość siły F i posuwu f (zakresy wartości) były różne w zależności od obrabianego materiału.

Przedmiot obrabiany (próbka o wyjściowym parametrze $Ra=0,6\div 1,0\mu\text{m}$ - zależnie od rodzaju materiału) mocowany był na obrabiarce (z obydwu stron) w uchwytach tokarskich samocentrujących, a nagniatak mocowany był w głowicy rewolwerowej tokarki, poprzez specjalną oprawkę pokazaną na rys. 1.



Rys. 1. Oprawka nagniatająca PDK-1

Fig.1. Burnishing tool holder PDK-1

Oprawka nagniatająca typu PDK-1 pozwala na nagniatanie ślizgowe z dociskiem sprężystym. Posiada bezstopniową regulację siły docisku. Wartość siły docisku pokazywana jest cyfrowo.

Wielkości mierzone

Po nagniataniu określano stan geometryczny warstwy wierzchniej (WW) oraz wielkość odkształcenia plastycznego materiału, udział materiałowy, utwardzenie materiału w wyniku zgniotu. Stan geometryczny WW określono przez pomiar parametrów SGP, która była określana dla profilu R, tj. chropowatości powierzchni w układzie 2D i 3D. Oprócz wielkości zmierzonych bezpośrednio, określono również inne wielkości charakteryzujące proces nagniatania, a będące wynikiem przeliczeń:

- a) współczynnik zmniejszenia chropowatości:

$$K_{Ra} = \frac{Ra'}{Ra} \quad (1)$$

gdzie: Ra' – średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej - wartość przed nagniataniem

Ra – średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej - wartość po nagniataniu

- b) wskaźnik odkształcenia nierówności:

$$K_z = \frac{\Delta d}{2 \cdot Rz'} \quad (2)$$

gdzie: Rz' – wysokość chropowatości powierzchni według dziesięciu punktów profilu – wartość przed nagniataniem,

Δd – zmniejszenie średnicy pełnego wałka.

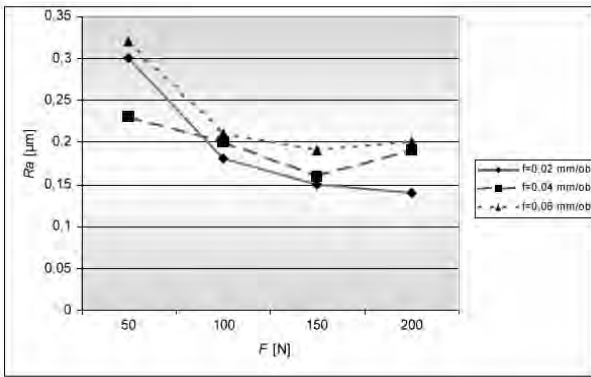
Wskaźnik K_z (2) informuje, w jakim stopniu zostały odkształcone nierówności w wyniku nagniatania. Im jego wartość jest mniejsza, tym nierówności są mniej odkształcone, a więc powierzchnia nagniatania nie osiągnęła jeszcze dostatecznej gładkości.

WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań przedstawiono w postaci graficznej. Na rys. 2÷4 pokazano niektóre wyniki pomiarów SGP wałków ze stali (narzędziowej, stopowej NC6 o twardości HRC=61÷63 po nagniataniu ślizgowym nagniatakiem diamentowym typu NKD-1 ($R=1,5$ mm).

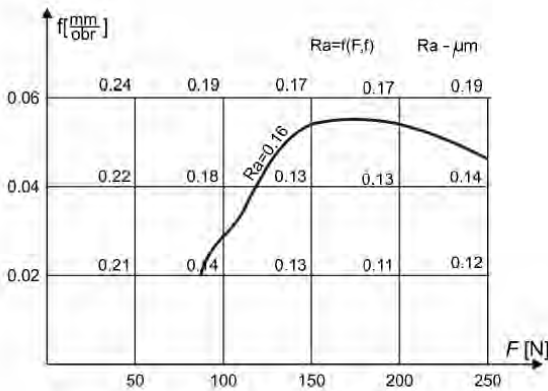
Na rys. 2 pokazano zależność $Ra=f(F)$ dla różnych wartości posuwów. Dla posuwu $f=0,02$ mm/obr funkcja ma charakter monotonicznie malejący do wartości $Ra_{\min}=0,14$ μm. Dla posuwów $f=0,04$ mm/obr oraz $f=0,06$ mm/obr występują ekstrema funkcji Ra_{\min} dla siły $F=150$ N. Są to typowe przebiegi funkcji $Ra=f(F)$ dla obróbki nagniataniem. W zakresie badanych wartości zmiennych F - f uzyskano

chropowatości w zakresie $Ra=0,14\div0,32\mu\text{m}$. Wzrost siły powoduje spadek wartości Ra , a dalszy wzrost siły powyżej pewnej granicznej wartości skutkuje wzrostem wartości Ra (aż do wystąpienia dekohezji materiału przy przekroczeniu dopuszczalnych nacisków jednostkowych).



Rys.2. Zależność $Ra=f(F)$ po nagniataniu ślizgowym stali NC6 (HRC=61-63). Nagniatnik diamentowy NKD-1 ($R=1,5\text{mm}$); $v=40\text{ m/min}$.
Fig.2. $Ra=f(F)$ relationship after the slide burnishing of NC6 steel (HRC=61-63). Diamond tool NKD-1 (radius $R=1,5\text{mm}$); speed $v=40\text{ m/min}$.

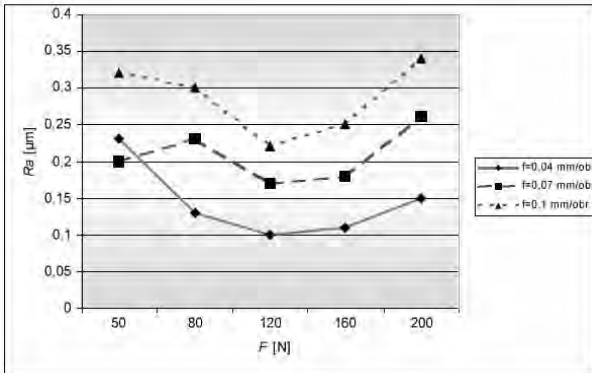
Na rysunku 3 pokazano zależność $Ra=f(F,f)$ dla stali łożyskowej 100Cr6 (ŁH15) hartowanej do twardości HRC=62÷64. Jest to tzw. wykres warstwicowy (trzech zmiennych) z naniesioną warstwicą $Ra=0,16\mu\text{m}$. Przebieg warstwic oraz naniesione wartości Ra wskazują, że chropowatość powierzchni w badanym przedziale F - f zależy istotnie od siły nagniatania ale też od posuwu.



Rys.3. Zależność $Ra=f(F,f)$ po nagniataniu ślizgowym stali 100Cr6 (ŁH15 - HRC=62-64). Nagniatnik diamentowy NKD-1 ($R=1,5\text{ mm}$); $v=40\text{ m/min}$.
Fig.3. $Ra=f(F,f)$ relationship after the slide burnishing of 100Cr6 steel (ŁH15 - HRC=62-64). Diamond tool NKD-1 (radius $R=1,5\text{mm}$); speed $v=40\text{ m/min}$.

Na rys. 4 pokazano zależność $Ra=f(F)$ dla różnych posuwów po nagniataniu ślizgowym stopu AlCu4MgSi (PA6) o twardości $\text{HB}=100\div110$. Chropowatość powierzchni Ra maleje wraz ze wzrostem siły nagniatania. Następnie osiąga swoją minimalną wartość, a później zaczyna rosnąć. Jest rzeczą charakterystyczną, że funkcja $Ra=f(F)$ osiąga swoją wartość minimalną Ra_{min} dla $F=120\text{N}$ dla wszystkich wartości posuwów. W całym badanym obszarze F - f (siła-posuw) uzyskano wartości parametru $Ra=0,10\div0,30\mu\text{m}$.

Na rys. 5 pokazano zależność zmiany średnicy wałka $\Delta d=f(F)$ po nagniataniu ślizgowym stopu AlCu4MgSi (PA6). Z wykresów wynika, że ze wzrostem siły nagniatania rośnie wielkość odkształcenia plastycznego materiału ($\Delta d/2$). Im mniejszy posuw tym wartość Δd większa. Jest to spowodowane tym, że im mniejszy posuw tym większa krotność przyłożenia siły, a więc to samo miejsce materiału jest nagniatane większą ilością razy. W wyniku nagniatania uzyskano wielkość zmiany średnicy wałka w zakresie $\Delta d=0,004\div 0,025\text{mm}$.

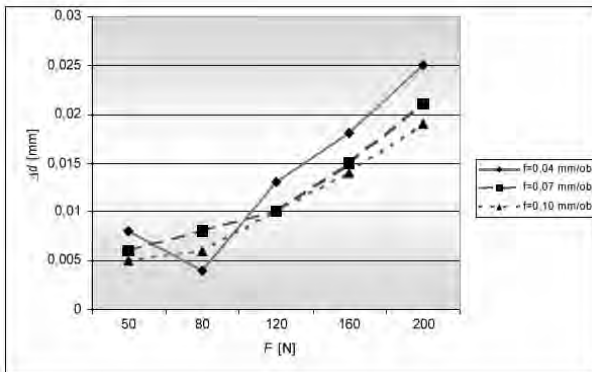


Rys. 4. Zależność $R_a=f(F)$ po nagniataniu ślizgowym stopu AlCu4MgSi (PA6).

Nagniatyak diamentowy NKD-3 ($R=3,5\text{ mm}$); $v=40\text{m/min}$.

Fig. 4. $R_a=f(F)$ relationship after the slide burnishing of AlCu4MgSi (PA6) alloy.

Diamond tool NKD-3 (radius $R=3,5\text{mm}$); speed $v=40\text{m/min}$.



Rys. 5. Zależność $\Delta d=f(F)$ po nagniataniu ślizgowym stopu AlCu4MgSi (PA6).

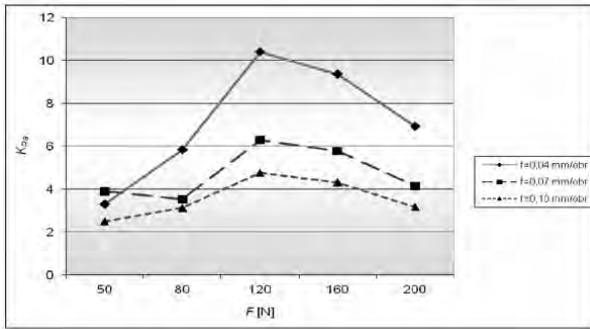
Nagniatyak diamentowy NKD-3 ($R=3,5\text{ mm}$); $v=40\text{m/min}$.

Fig. 5. $\Delta d=f(F)$ relationship after the slide burnishing of AlCu4MgSi (PA6) alloy.

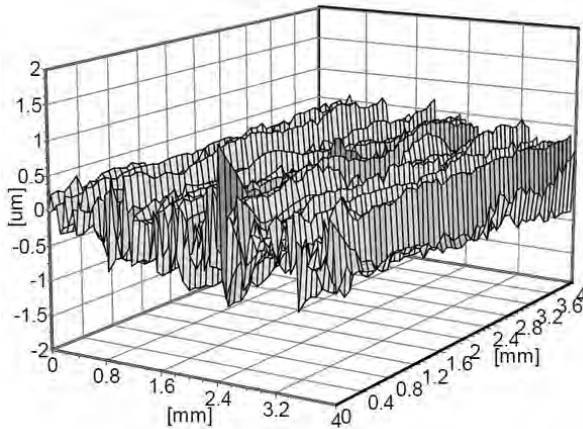
Diamond tool NKD-3 (radius $R=3,5\text{mm}$); speed $v=40\text{m/min}$.

Na rys. 6 pokazano zależność wskaźnika zmniejszenia chropowatości $K_{Ra}=f(F)$ dla różnych posuwów. Wartość wskaźnika K_{Ra} rośnie ze wzrostem siły F , osiąga swoją maksymalną wartość i następnie maleje. Krzywe $K_{Ra}=f(F)$ mają ten sam charakter przebiegu dla wszystkich badanych posuwów, różnią się jedynie wartościami liczbowymi. Chropowatość R_a zmniejsza się w stosunku do wartości przed nagniataniem (od 2,5 \div 10,4) razy. Wartość R_a' dla ww. materiału w próbach zawiera się w zakresie $R_a'=0,76\div 1,08\mu\text{m}$.

Na rys. 7 przedstawiono widok 3D powierzchni wałka ze stali X20Cr13 (2H13) po nagniataniu ślizgowym nagniatakiem diamentowym NKD-2 ($R=3,5\text{mm}$).



Rys. 6. Zależność $K_{Ra} = f(F)$ po nagniataniu ślizgowym stopu AlCu4MgSi (PA6). Nagniatak diamentowy NKD-3 ($R=3,5$ mm); $v=40$ m/min.
Fig. 6. $K_{Ra} = f(F)$ relationship after the slide burnishing of AlCu4MgSi (PA6) alloy. Diamond tool NKD-3 (radius $R=3,5$ mm); speed $v=40$ m/min.



Rys.7. Widok 3D powierzchni wałka ze stali X20Cr13 (2H13) po nagniataniu ślizgowym. Nagniatak diamentowy NKD-2 ($R=3,5$ mm).
Fig.7. 3D surface view after slide burnishing of X20Cr13 (2H13) steel shaft surface. Diamond tool NKD-2 (radius $R=3.5$ mm).

WNIOSKI

Proces nagniatania ślizgowego nagniatkami diamentowymi typu NKD pozwala uzyskać wysoką jakość powierzchni (określaną parametrami SGP) wymaganej przy obróbce wykończeniowej.

Zastosowanie narzędzi nagniatających w kształcie czaszy kulistej wykonanych z kompozytu diamentowego z ceramiczną fazą wiążącą Ti_3SiC_2 umożliwia osiągnięcie istotnej poprawy chropowatości materiałów ze stali tzw. miękkich ($HRC < 45$), stali tzw. twardych ($HRC = 45 \div 64$) jak również stopów aluminium (np. AlCu4MgSi). Najmniejsza wartość R_a wynosiła $0,10 \mu m$, a współczynnik zmniejszenia chropowatości K_{Ra} (określany jako stosunek chropowatości R_a przed nagniataniem do chropowatości po nagniataniu) może być większy od 10.

Zmniejszenie średnicy pełnego wałka Δd w wyniku nagniatania rośnie ze wzrostem wartości siły nagniatania F .

Ponadto przeprowadzone próby nagniatania potwierdzają, że zastosowane innowacyjne rozwiązanie – zespolenie diamentowego elementu nagniatającego za pomocą klejenia specjalnym klejem – gwarantuje niezawodne jego działanie.

Wykonane nagniatki diamentowe mogą być stosowane na tokarkach sterowanych numerycznie i na obrabiarkach konwencjonalnych.

PIŚMIENNICTWO

1. Jaworska L.: Wysokociśnieniowe spiekanie proszków diamentowych. Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem, Seria Zeszyty Naukowe Nr 82, Kraków 2002.
2. Korzyński M.: Nagniatanie ślizgowe. WNT, Warszawa, 2007.
3. Łabędź J., Skorupa A.: Wpływ nagniatania ślizgowego elementem diamentowym na wytrzymałość zmęczeniową stopu aluminium PA6. Materiały VII Konferencji Naukowo-Technicznej „Technologia obróbki przez nagniatanie”, Bydgoszcz 2000.
4. Przybylski W.: Obróbka nagniataniem-technologia i oprzyrządowanie. WNT, Warszawa 1987.
5. Czechowski K., Polowski W., Wronska I., Wszolek J.: Nagniatanie ślizgowe jako metoda obróbki wykończeniowej powierzchni. Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie - wrzesień 2009, s. 21÷27.
6. Polowski W., Bednarski P.: „Badania technologiczne procesu nagniatania ślizgowego przy użyciu nagniatków diamentowych wykonanych na bazie kompozytów diamentowych produkowanych w IZTW”. Prace IZTW, Seria Sprawozdania, Kraków 2010.
7. Łabędź J., Słomski J.: Wpływ wybranych parametrów nagniatania diamentem na chropowatość stali NC6. Materiały z IX Konferencji Naukowej pt. „Technologia Obróbki przez Nagniatanie” TON’05. Gdańsk 13-14.10.2005 wydane jako praca zbiorowa pod redakcją prof. Włodzimierza Przybylskiego pt. „Współczesne Problemy w Technologii Obróbki Przez Nagniatanie”. Gdańsk 2005.
8. Przybylski W., Zieliński J.: Obróbka wykańczająca stopów aluminium przez nagniatanie ślizgowe. Materiały z IX Konferencji Naukowej pt. „Technologia Obróbki przez Nagniatanie” TON’05. Gdańsk 13-14.10.2005.
9. Świrad S.: Kompozyty diamentowe – materiały supertwarde do obróbki nagniataniem. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika z.66. Rzeszów 2006.
10. Polowski W., Stós J., Bednarski P., Czechowski K., Wszolek J.: Nagniatanie ślizgowe narzędziami diamentowymi. Mechanik, 2010, R. 83, nr 12, s. 965-967. Agenda Wydawnicza SIMP, 2010.

FINISH MACHINING WITH THE SLIDE BURNISHING DIAMOND TOOLS

Summary

Possibilities of the finish machining - slide burnishing using the diamond burnishing tools are presented. These tools were made in the Institute of Advanced Manufacturing Technology (IAMT) in Cracow. The results of slide burnishing laboratory tests of various structural materials of different chemical compositions, mechanical, plastic, physico-chemical properties and metallographic structures are presented. Typical advantages of slide burnishing with diamond tools, such as significant improvements in surface roughness of aluminium alloys and quenched and tempered steels (up to hardness of 45÷64 HRC) subjected to burnishing processes, are indicated. The obtained results of measure-

ments of surface geometrical structure parameters (SGP) in 2D system (two-dimensional analysis) and 3D (three-dimensional analysis) system are given and discussed. The coefficient of surface roughness improvement (K_{Ra}), which is the ratio of Ra surface roughness parameters prior to and after the burnishing process, was determined.

The SGP measurements results shown that the diamond tools made in IAMT for slide burnishing enabled the obtaining of high surface quality, meeting the requirements of finish machining.

Keywords: slide burnishing, diamond composite, surface geometrical structure, finish machining.

Michał Dobrzyński ¹⁾, Piotr Marszałek ²⁾

WYBRANE ASPEKTY ZUŻYCIA OSTRZY SKRAWAJĄCYCH WYKONANYCH Z PcBN

Streszczenie: Obróbka materiałów twardych związana jest z obróbką materiałów o twardości powyżej 50 HRC. Obróbka ta może być obróbką wykończeniową ze względu na możliwość osiągnięcia wysokiej jakości i dokładności przedmiotów obrabianych po tej operacji. Obróbka materiałów w stanie twardym lub utwardzonym związana jest z zastosowaniem specjalnych narzędzi, które są wykonane z nowych materiałów, takich jak PcBN. W artykule zaprezentowano wybrane wyniki z badań nad zużyciem narzędzi podczas obróbki toczeniem.

Słowa kluczowe: toczenie materiałów twardych, zużycie narzędzi, regularny azotek boru (CBN)

WSTĘP

Obróbka wykończeniowa toczeniem materiałów twardych jest alternatywą wobec operacji szlifowania i coraz częściej zostaje wybierana przez producentów części maszyn ze względu na szereg cech usprawniających proces produkcyjny. Narzędzia do obróbki toczeniem dzięki zastosowaniu programowania CNC mogą obrabiać złożone kształty. Zastosowanie w tym przypadku narzędzi ściernych wymagałoby czasochłonnego i kosztownego ostrzenia, ponadto nie gwarantowałyby utrzymania pożądanych tolerancji wymiarowych gotowych produktów. Toczenie wykończeniowe charakteryzuje się prostotą operacji, elastycznością produkcji oraz pozwala uzyskać wyższą dokładność obróbki przy niższym koszcie jednostkowym produktu. Zapewnienie oczekiwanej jakości produktu związane jest ze ścisłą kontrolą procesu zużywania się płytki skrawającej [1, 3, 5].

MATERIAŁY W STANIE UTWARDZONYM

Obróbka stali o twardości powyżej 45 HRC, a typowo w zakresie 55÷68 HRC jest zdefiniowana jako obróbka materiałów twardych. Do materiałów tych zaliczamy głównie stale ulepszone cieplnie, jak również wszelkie materiały metaliczne, ceramiczne oraz kompozytowe o twardości 45÷68 HRC. Powszechnie stosowane w przemyśle maszynowym i najczęściej obrabiane materiały to: stal do

¹ Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji.

² Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe „Mechanik”.

nawęglania, stal łożyskowa, stal narzędziowa, żeliwo białe, stal manganowa, stelit, spieki z proszków metali oraz węglik spiekane. Metodę toczenia wykończeniowego najczęściej stosuje się w przemyśle motoryzacyjnym. Typowymi produktami wytwarzanymi w ten sposób są: korpusy skrzyń biegów, gniazda zaworowe, przekładnie, kolumny kierownicy, tuleje cylindrowe, tarcze hamulcowe, obudowy sprzęgieł i wały napędowe [2].

TYP I WŁAŚCIWOŚCI BADANYCH OSTRZY SKRAWAJĄCYCH

Przy toczeniu wykończeniowym materiałów twardych (powyżej 50 HRC), najczęściej stosuje się płytki z polikrystalicznego, regularnego azotku boru (PcBN), ponieważ materiał ten posiada szereg cech idealnie pasujących do warunków panujących w obszarze skrawania. Wysoka twardość na gorąco umożliwia toczenie przy bardzo wysokich prędkościach skrawania, ponadto PcBN posiada również dobrą udarność i odporność na szok termiczny, co sprawia, że jest on najwyższej klasy materiałem narzędziowym do obróbki tego typu materiałów [7, 8].

Podczas prób użyto płytek 6 ostrzowych o kształcie trygonalnym, typu WN-GA080408T01030AWH, wykonanych z materiału CB7015 i przeznaczonych do obróbki ciągłej oraz lekko przerywanej. W zastosowanym na ostrze materiale zawartość CBN wynosiła 50% a jako spoiwo użyto TiCN i AL_2O_3 . Materiał ten posiadał średnio-drobne wielkości ziarna, a pokrycie wykonane było metodą PVD.

Płytki wykorzystywane były podczas obróbki powierzchni czołowej koła zębatego jak również do wytaczania otworu w dwóch przejściach. Otwór koła zębatego należało wykonać w IT6 na długości powierzchni wytaczanej wynoszącej 41,6mm. Element wykonany został ze stali stopowej 14NiCrMo12-14 (DIN) nawęglanej i hartowanej do twardości 60 ± 2 HRC. Głębokość warstwy nawęglonej wynosiła $\geq 0,86$ mm. Eksperyment odbywał się w stałych warunkach obróbki, gdzie zastosowano następujące parametry wytaczania otworu w kole zębatym:

- prędkość skrawania (v_c): 130 ± 160 m/min
- posuw (f): $0,06 \pm 0,15$ mm/obr
- głębokość skrawania (a_p): 0,05 mm

CECHY PROCESU TOCZENIA MATERIAŁÓW W STANIE TWARDYM

W miejscu kontaktu wióra i przedmiotu obrabianego z narzędziem skrawającym występuje znaczne obciążenie mechaniczne (wysokie naprężenia styczne i normalne) oraz cieplne. Wobec tego proces zużywania się ostrza przyjmuje charakter złożony, wynikający nie tylko z oddziaływań siłowych materiału toczzonego na płytkę skrawającą, ale również oddziaływania wysokich temperatur w miejscu skrawania, zjawisk adhezyjnych, utleniania, dyfuzji, ścierania czy wykruszeń.

Zjawiska te posiadają różne nasilenie, w zależności od przyjętych parametrów i warunków obróbki, a także właściwości materiału, z jakiego zostało wykonane ostrze i cech materiału toczzonego. Specyficzne warunki tarcia w procesie toczenia materiałów utwardzonych to przede wszystkim bardzo duże naciski jednostkowe na czystych chemicznie powierzchniach materiałów, odkształcenia plastyczne warstwy wierzchniej materiału i wióra, co prowadzi do zjawiska umacniania się materiału obrabianego. Wysokie temperatury w polu tarcia sprzyjają tworzeniu się narostu na płycie, a brak cieczy chłodzącej uniemożliwia utworzenie warstwy smarnej. Podczas obróbki materiałów utwardzonych, w przypadku powstawania wióra „odłamkowego”, inny jest procentowy udział źródeł ciepła. Dominującą rolę w tym przypadku odgrywa tarcie powierzchni ostrza o materiał obrobiony, natomiast praca odkształceń plastycznych i praca tarcia wióra o powierzchnię natarcia nie odgrywają istotnej roli. Ciepło powstające w procesie skrawania jest odprowadzane głównie przez wiór (75%) oraz przez przedmiot obrabiany (15%), narzędzie (8%), innymi drogami (2%). Operacja toczenia materiałów utwardzonych wymaga od obrabiarki wysokiej mocy, gdyż opór właściwy skrawania dla tych materiałów wynosi $2550 \pm 4870 \text{ N/mm}^2$, odbywa się ona najczęściej na nowoczesnych centrach tokarskich sterowanych numerycznie. Kluczowymi czynnikami przy tego typu obróbce jest stabilność oraz sztywność układu obrabiarki [4, 6].

POMIAR ZUŻYCIA OSTRZA SKRAWAJĄCEGO

Toczenie materiałów utwardzonych jest procesem specyficznym ze względu na rodzaj zużycia ostrzy skrawających. Wysokie temperatury powstające w strefie obróbki znacznie obniżają siły skrawania, przez co obróbka przy zbyt niskich prędkościach może doprowadzić do katastroficznego zużycia ostrza w wyniku małej ilości ciepła dostarczonego do materiału PcBN.

Dominującymi rodzajami zużycia w tej operacji są starcia na powierzchni przyłożenia, powstałe w wyniku naturalnych procesów trybologicznych między narzędziem a obrabianym materiałem. Wraz z wzrostem prędkości skrawania zjawisko to maleje. Efekt ścierania nie pozwala na uzyskanie wymiarów obrabianych przedmiotów w założonych tolerancjach.

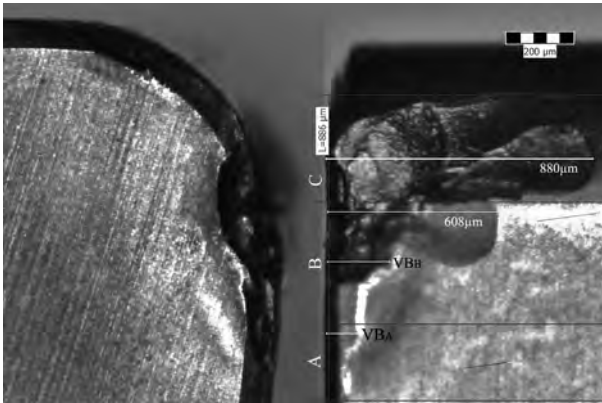
Wzrost prędkości skrawania powoduje silniejsze wykruszanie (wyrwanie) części wykonanej z polikrystalicznego regularnego azotku boru, co zmniejsza wytrzymałość płytki i może doprowadzić do jej pęknięcia. Wykruszenia i wyrwania nie są jedynymi czynnikami decydującymi o jakości wykończenia powierzchni, ponieważ podczas obróbki materiałów twardych zachodzi szereg zjawisk.

Norma PN-ISO 3685 określa sposób pomiaru zużycia ostrza. W normie tej dokonany został podział głównej krawędzi skrawającej na trzy następujące strefy:

- *strefa C* obejmuje krzywoliniową część krawędzi skrawającej przy narożu.
- *strefa B* obejmuje pozostałą prostoliniową część krawędzi skrawającej pomiędzy strefami C i A.

- strefa A obejmuje 1/4 długości zużytej krawędzi, najbardziej oddalonej od naroża.

Szerokość pasm zużycia VB_B powinna być badana w zakresie strefy B, w płaszczyźnie krawędzi skrawającej, prostopadle do głównej krawędzi skrawającej. Szerokość pasma zużycia powinna być mierzona względem pierwotnego położenia krawędzi skrawającej. Typowymi kryteriami trwałości narzędzi z ostrzy ceramicznych (norma dotyczy między innym tego typu materiału narzędziowego) jest największa szerokość pasma zużycia ciernego na powierzchni przyłożenia $VB_{Bmax}=0,6$ mm - w przypadku nieregularnego pasma na powierzchni przyłożenia w strefie B oraz średnia szerokość pasma zużycia ciernego na powierzchni przyłożenia $VB_B=0,3$ mm - w przypadku regularnego pasma zużycia na powierzchni przyłożenia w strefie B, zgodnie z normą PN-ISO 3685.



Rys. 1. Widok płytki WGA080408T01030AWH z naniesionymi wartościami średniego zużycia w poszczególnych strefach
Fig. 1. View of the WNGA080408T01030AW H insert with mean values of the wear in selected areas

Na rysunku 1 przedstawiono widoki badanej płytki, na których wskazano strefy podziału głównej krawędzi skrawającej zgodnie z normą PN-ISO 3685 oraz miejsca średniego zużycia jak również wartości maksymalnych wykruszeń. Wyniki pomiarów pasm zużycia zamieszczono w tabeli 1. Pomiarów poszczególnych wartości przeprowadzono w 6 kolejnych przekrojach kolejnych stref. Wyniki zostały poddane ocenie poprzez obliczenia podstawowych statystyk testowych dla błędów grubych czy też sprawdzeniu hipotezy, że mierzona cecha ma rozkład normalny.

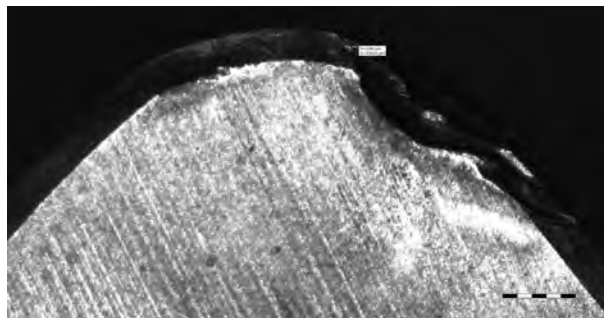
Do oceny błędów grubych zastosowano test Grubbsa, w którym porównano obliczone statystyki dla największej i najmniejszej wartości z pomiaru (B_{max} i B_{min}) z wartością krytyczną dla przyjętego poziomu istotności i liczności próby. Dla oceny czy dana próbka ma cechy rozkładu normalnego, wykonano test normalności *Shapiro-Wilka*. Ponieważ obliczona statystyka testowa jest większa od wartości krytycznej odniesionej do poziomu istotności i licznosc próby, to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu badanej próby. Dla wyników pomiarów obliczono także podstawowe miary położenia (średnia arytmetyczna i mediana) oraz rozproszenia (odchylenie standardowe i rozstęp). Dla wszystkich analiz i obliczeń przyjęto poziom istotności $\alpha=0,05$. Dla tego poziomu

obliczono także przedział ufności - przedział, w którym powinna mieścić się średnia z populacji. Ze względu na małą licznosc próby, do obliczenia przedziału ufności posłużono się statystyką *t-Studenta*.

Tabela 1. Wybrane wartości zużycia ostrza skrawającego

Table 1. Selected values of the tool wear

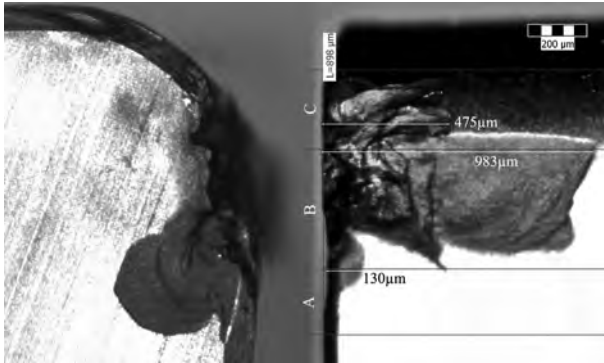
L p.	VB _A [μm]	VB _B [μm]	Miary zmienności i rozproszenia z obliczonymi statystykami		VB _A	VB _B
1	59	118	Średnia arytmetyczna	[μm]	85.00	194.33
2	78	142	Mediana		89.50	190.50
3	87	167	Rozstęp		40.00	180.00
4	99	298	Odchylenie standard. (skorygowane)		14.66	65.59
5	95	214				
6	92	227	Przedział ufności		15.38	68.84
Wartość krytyczna testu <i>Studenta</i> $t_{0,05;5}$					2,571	
Wartość krytyczna testu <i>Grubbsa</i> $B_{0,05;6}$					1,996	
Statystyka testowa <i>Grubbsa</i> B_1 i B_2					$B_{max} = 0,955$ $B_{min} = 1,774$	$B_{max} = 1,580$ $B_{min} = 1,164$
Wartość krytyczna testu <i>Shapiro-Wilka</i> $W_{6;0,05}$					0,788	
Statystyka testowa <i>Shapiro-Wilka</i> W					0,891	0,960



Rys. 2. Widok powierzchni natarcia płytki WNGA080408T01030AWH
Fig. 2. View of the rake surface of the WNGA080408T01030AWH insert

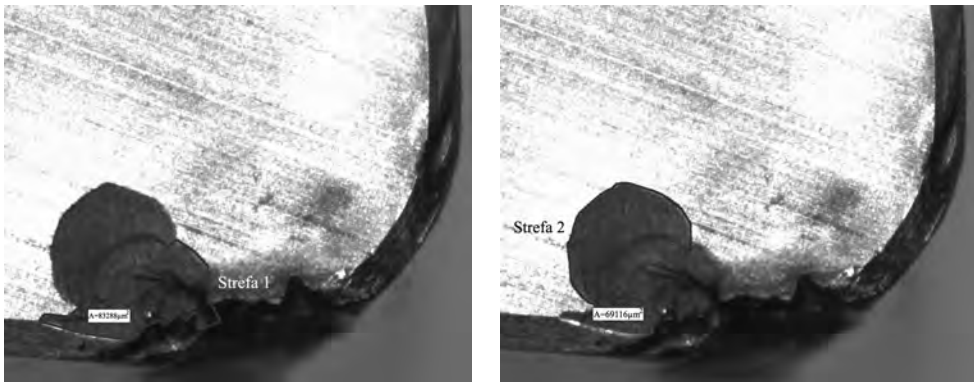
Podczas obróbki materiałów twardych powstaje wyraźne zużycie w postaci krateru na powierzchni natarcia (rys. 2). Po przekroczeniu wartości zużycia ściernego VB_B około 170- 200 μm następowały gwałtowne wykruszenia w pobliżu krateru. Wykruszenia te występowały najintensywniej w strefie A (wierzchołek ostrza) i wraz z postępem obróbki i zużycia narzędzia miały wartości kolejno około 400 μm, 600 μm i 880 μm (rys. 1). Metodyka pomiaru zużycia ostrza zdefiniowana w normie PN-ISO 3685 pozwala w większości badanych przypadków wskazać maksymalną szerokość pasm zużycia ostrza VB_{Bmax}, skupia się ona przede wszystkim na zużyciu głównej krawędzi skrawającej oraz głównej powierzchni przyłożenia. Trudno stosować normę do ostrzy wykonanych z polikrystalicznego regularnego azotku boru (PcBN), gdyż podczas skrawania materiałów twardych proces zużywania następuje nie tylko na powierzchniach ujętych w

normie, ale również na wierzchołku ostrza, powierzchni natarcia oraz pomocniczej krawędzi skrawającej. Uwarunkowane jest to tym, iż geometria ostrzy PcBN znacznie różni się od geometrii ostrza znormalizowanego. Utrudnia to wykonanie dokładnego pomiaru, dlatego aby uwidocznić wszelkie oznaki zużycia narzędzia, należy dokonać pomiarów w obrębie pełnej geometrii ostrza.



Rys. 3. Widok płytki WNGA080408T01030AWH z naniesionymi wybranymi wartościami zużycia
Fig. 3. View of the WNGA080408T01030AWH insert and selected values of the wear

Dalsza intensywna obróbka po przekroczeniu zużycia katastroficznego doprowadza do dalszych intensywnych wykruszeń na powierzchni przyłożenia i w efekcie złamania płytki (rys. 3). Wartość tego złamania wyniosła blisko 0,1 mm i dotyczyło granicy strefy B i C. Podczas obróbki wystąpiły również dwa odłamania, odłupania części ostrza na powierzchni natarcia (rys. 4). Odłupania części ostrza wystąpiły w wyniku zbyt dużej siły odporowej podczas obróbki. Gwałtowny jej wzrost wystąpił wraz ze wzrostem zużycia na powierzchni przyłożenia. Wyniki pomiarów powierzchni tych odłamów wraz z podstawową analizą zamieszczono w tabeli 2.



Rys. 4. Widok powierzchni natarcia płytki WNGA080408T01030AWH z zaznaczonymi strefami odłupania części ostrza: po lewej -strefa 1, po prawej - strefa 2

Fig. 4. View of the rake surface of the WNGA080408T01030AWH insert with indicated chipped areas: left - Area 1, right - Area 2

Tabela 2. Wartości powierzchni odłupania na powierzchni natarcia
 Table 2. Values of the chipped areas on the rake surface

Lp.	A_{Strefa1} [μm^2]	A_{Strefa2} [μm^2]	Miary zmienności i rozproszenia z obliczonymi statystykami	A_{Strefa1}	A_{Strefa2}	
1	83633	68743	Średnia arytmetyczna	[μm^2]	83288	69116
2	78441	69257	Mediana		83567	69099
3	85764	69470	Rozstęp		7323	1117
4	83005	68585	Odchylenie standard. (skorygowane)		2618	434
5	85386	69702				
6	83500	68941	Przedział ufności		2747	455
Wartość krytyczna testu <i>Studenta</i> $t_{0,05,5}$				2,571		
Wartość krytyczna testu <i>Grubbsa</i> $B_{0,05,6}$				1,996		
Statystyka testowa <i>Grubbsa</i> B_1 i B_2				$B_{\text{max}} = 0,945$ $B_{\text{min}} = 1,851$	$B_{\text{max}} = 1,350$ $B_{\text{min}} = 1,225$	
Wartość krytyczna testu <i>Shapiro-Wilka</i> $W_{6,0,05}$				0,788		
Statystyka testowa <i>Shapiro-Wilka</i> W				0,847	0,959	

PODSUMOWANIE

Norma PN-ISO 3685 nie precyzuje dokładnie sposobu pomiaru płytek wykonanych z polikrystalicznego regularnego azotku boru (PcBN), ze względu na ich odrębną geometrię. Metoda adaptacji normy do pomiarów zapewniła rzetelne wyniki, posiadające niewielki błąd pomiarowy. Należy zauważyć, że pomiary wykonywane zgodnie z normą nie ujawniają wszystkich obszarów zużycia ostrza. Pracownik przy określaniu zużywania się narzędzi skrawających powinien nie tyle sugerować się normą, co wizualnymi oględzinami całej płytki skrawającej. Niewątpliwie wszelkie zalety, jakie posiadają ostrza wykonane z PcBN, znacznie skracają czas produkcji i zwiększają zyski, lecz aby produkcja spełniała założone kryteria jakościowe, należy kontrolować czas pracy ostrza oraz jego stan, aby zapobiec katastroficznemu zużyciu płytki, co doprowadziłoby do zniszczenia materiału obrabianego oraz oprawki narzędziowej, przerywając całą produkcję.

PIŚMIENNICTWO

1. Chou K.Y., Evans C.J.: Tool wear mechanism in continuous cutting of hardened tool steels. *Wear*, 212, 1997, pp. 59-65.
2. Dobrzyński M., Orłowski K.: Toczenie wykończeniowe powierzchni otworów w stanie utwardzonym. Obróbka skrawaniem: Zaawansowana technika/pod red. H. Latosia, Szkoła Obróbki Skrawaniem, nr 3, Bydgoszcz, 2009, s. 41-48.
3. Grzesik W.: Wear development on wiper Al_2O_3 -TiC mixed ceramic tools in hard machining of high strength steel. *Wear*, 266, 2009, pp. 1021-1028.
4. Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów metalowych. Wydawnictwa Naukowo-techniczne, Warszawa 1998.

5. Kawalec M.: Skrawanie ostrzami zdefiniowanymi geometrycznie zahartowanych stali. Obróbka skrawaniem: Zaawansowana technika/pod red. H. Latosia, Szkoła Obróbki Skrawaniem, nr 3, Bydgoszcz, 2009, s. 9÷30
6. Żebrowski H.: Techniki wytwarzania. Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
7. Katalogi firmy Sumitomo.
8. Katalog Sandvik Coromant, Zaawansowane materiały narzędziowe.

SELECTED ASPECTS OF PCBN TOOLS WEAR

Summary

Hard part machining is related to a process of cutting of hard materials (over 50 HRC). This process can be used as a finishing process, because of achieving high quality and accuracy of workpieces after the operation. Cutting of hard materials requires special tools, which are made of a new materials such as PcBN. This paper presents selected results of investigation under tool wear during turning of hard materials.

Keywords: hard part turning, tool wear, Cubic Boron Nitride (CBN).

Krzysztof Netter, Michał Gubański ¹⁾

OBROTOWY PRZYRZĄD PODZIAŁOWY O PODZIALE DYSKRETNYM

Streszczenie: W pracy przedstawiono konstrukcję obrotowego przyrządu podziałowego o podziale dyskretnym i napędzie ręcznym. Założeniem podstawowym było to, iż pozycjonowanie ma następować na zasadzie wzajemnego zazębiania się dwóch kół zębatach o uzębieniu czołowym Hirth'a. Opisano wiele wariantów rozwiązań poszczególnych elementów składowych tj. korpus, sprzęgła, łożyskowania itp., dokonano ich porównania, oraz opracowano szczegółowo jedno rozwiązanie.

Słowa kluczowe: stół podziałowy, uzębienie Hirth'a.

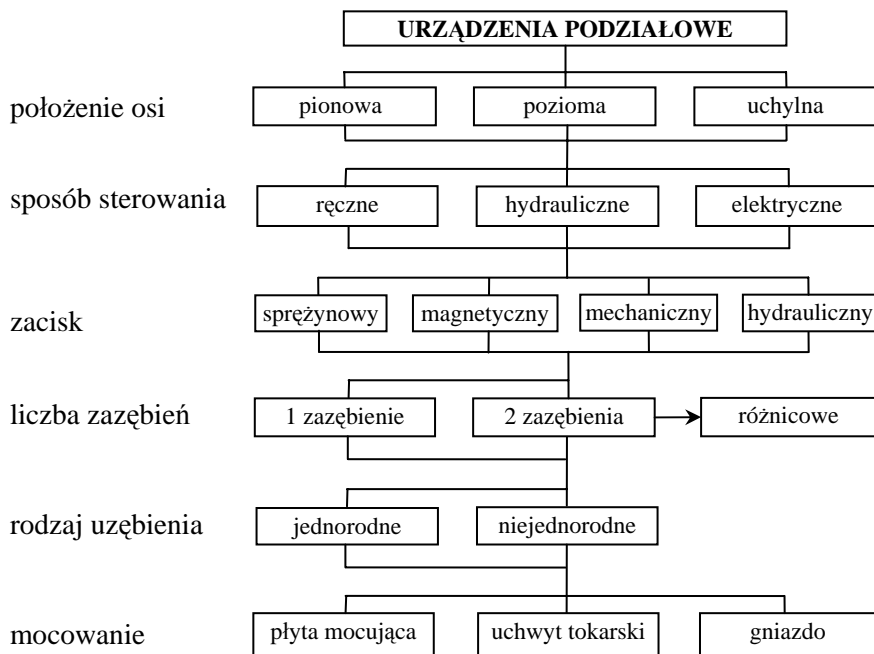
WSTĘP

Dokładne powtarzalne pozycjonowanie w ruchu obrotowym jest bardzo często stosowane w maszynach technologicznych [2]. Od pozycjonowania głowic wrzecionowych, narzędziowych czy stołów obrotowych we współczesnych obrabiarkach sterowanych numerycznie do metalu i drewna, poprzez integralne wyposażenie specjalne, aż do specjalistycznych urządzeń służących do obróbki wielowypustów, gniazd pod płytki w narzędziach frezarskich, ostrzenia narzędzi itp. Obecnie nie ma na rynku dokładnych i tanich urządzeń pozycjonujących. Oczywiście, czołowe firmy światowe, w tym europejskie, specjalizujące się w produkcji uzębień czołowych lub wykorzystujące uzębienia czołowe w swych wyrobach, tzn. w obrabiarkach, wyposażeniu specjalnym i oprzyrządowaniu dysponują technologiami pozwalającymi uzyskiwać tak duże dokładności pozycjonowania. Jednak technologie te są pilnie strzeżone, a zakup tych urządzeń jest bardzo kosztowny. Zaprezentowana w tym artykule konstrukcja powstała w ramach pracy dyplomowej magisterskiej zrealizowanej na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej.

KLASYFIKACJA URZĄDZEŃ PODZIAŁOWYCH

Znane są urządzenia do bezstopniowego podziału kąтового oparte na systemie przekładni, mechanizmów różnicowych lub planetarnych, w których element pozycjonowany jest unieruchamiany dzięki sile tarcia, powstającej w wyniku docisku jednej lub wielu powierzchni. Na rys. 1 przedstawiono klasyfikację urządzeń podziałowych.

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej.



Rys. 1. Klasyfikacja obrotowych dyskretnych przyrządów podziałowych
Fig. 1. Classification of the indexing table

Urządzenia podziałowe mogą również mieć podział realizowany dyskretnie. Podział dyskretny może być realizowany za pomocą połączeń kształtowych, na przykład wielowypusty i karby, tarcze z systemem otworów oraz zazębienia walcowe i czołowe. Połączenia te pozwalają otrzymać większą powtarzalność pozycjonowania. Mają jednak ograniczoną liczbę pozycji i nie jest możliwe otrzymywanie dużych rozdzielczości.

KONCEPCJA ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNEGO

Konstrukcja obrotowego przyrządu podziałowego może zostać rozwiązana na wiele sposobów. Aby przyrząd spełniał swoje podstawowe założenia, powinien składać się z następujących komponentów składowych:

- korpus – bazowa część, w której mocowane będą poszczególne komponenty składowe,
- mechanizm obrotowo–pozycjonujący, który odpowiada za kątowe położenie ruchomej części stołu obrotowego,
- łożyskowanie – zapewnia możliwość wykonywania ruchu i odpowiada za sztywność poszczególnych podzespołów, które wykonują ruch,

- sprzęgło – ma za zadanie zapewnić możliwość ruchu mechanizmowi pozycjonemu, gdy wymagana jest zmiana położenia kąтового tarczy przyrządu oraz blokować gdy pozycja jest ustalona,
- tarcza – do której mocowane są przedmioty obrabiane,
- sprzęgła samoczynnego – ma ono za zadanie takie wzajemne ustawienie obydwu kół czołowych, aby zawsze były ustawione w pozycji „zab – wrab”.

Korpus został zaprojektowany jako odlewany. Odpowiedni kształt uzyskano poprzez obróbkę skrawaniem bloku żeliwa.

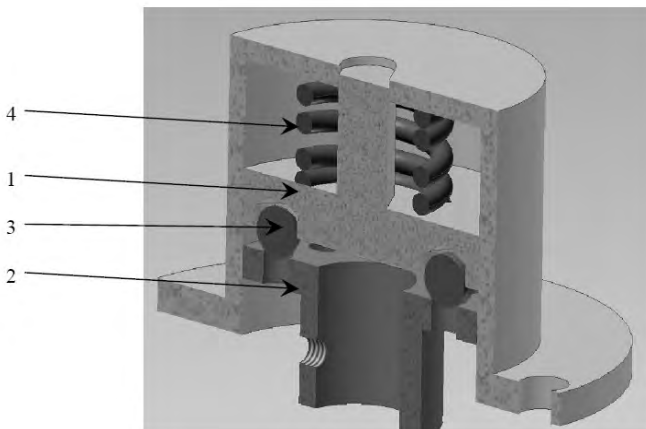
Mechanizm obrotowo–pozycjonujący ma za zadanie ustalenie pozycji poprzez obrót oraz zazębienie się dwóch kół zębatach o czołowym uzębieniu Hirth'a. Może ona zostać zrealizowana za pomocą mechanizmu krzywkowo–zapadkowego, krzyża maltańskiego, przekładni zębatej, ślimakowej lub spiroidalnej.

Poprzez łożyskowanie rozumiane jest w szczególności łożyskowanie wału głównego wraz z mechanizmem pozycjonującym. Wał jest łożyskowany przy pomocy dwóch par łożysk tocznych umieszczonych w górnej i dolnej części korpusu. Dodatkowo dla zachowania odpowiedniej sztywności tarczy jako łożysko podpierające zastosowano igiełkowe o dużej średnicy.

Jako sprzęgło zastosowano mechanizm dźwigniowo–mimośrodowy, który ma duże możliwości korygowania niedokładności obróbkowych oraz możliwość redukcji siły wymaganej do wyzębienia kół.

Tarcza urządzenia podziałowego, do którego montowane są przedmioty obrabiane, jest mocowana bezpośrednio na wale głównym i jest pośrednio powiązana z ruchomym kołem zębatym o uzębieniu czołowym.

Sprzęgło samoczynne to mechanizm, który ma za zadanie takie wzajemne ustawienie obydwu kół czołowych, aby zawsze były ustawione z pozycji „zab – wrab”. Ma to zapobiegać sytuacji, w której zab uderza w zab uniemożliwiając zazębienie. Na rys. 2 przedstawiono sprzęgło kulowe własnego pomysłu.



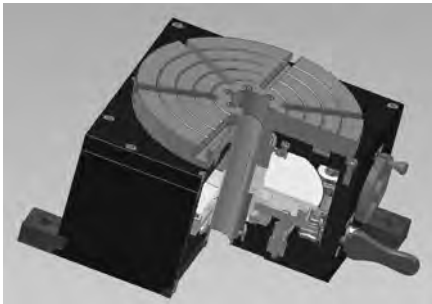
Rys. 2. Sprzęgło kulkowe
Fig. 2. The Ball coupling

Podczas obrotowego ruchu tarczy (2) kulki (3) poruszają się pionowo w górę popychając tarczę (1), w momencie, gdy kulki natrafią na następny otwór w tarczy (2), poprzez działanie sprężyny (4) automatycznie zostają wepchnięte do tych otworów – innymi słowy – ruch ciągły zamieniany jest na krokowy z rozdzielczością równą ilorazowi kąta pełnego przez liczbę otworów na tarczy (2).

KONSTRUKCJA OBROTOWEGO PRZYRZĄDU PODZIAŁOWEGO Z NAPĘDEM RĘCZNYM

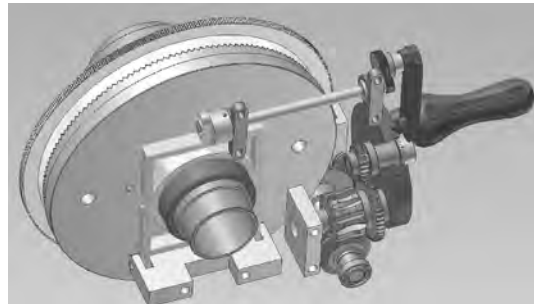
- Proces projektowania i konstruowania przebiegał wg następujących etapów:
- obliczenie liczby zębów niezbędnej do uzyskania zadanego kroku (krok $2,5^\circ$),
 - dobranie średnicy wieńca ($\phi 165\text{mm}$, szer. 10mm , $h_w = 1\text{mm}$),
 - określenie średnicy tarczy ($\phi 250\text{mm}$),
 - ustalenie wymiarów korpusu ($290 \times 270 \times 140$),
 - dobranie przełożenia przekładni walcowej (założenie – 1 pełny obrót koła nastawczego 30° co daje nam przełożenie $i = 30^\circ / 360^\circ = 1/12$, dla takiego przełożenia nie jest możliwe zmieszczenie się w obudowie o założonych wymiarach, należy zastosować przekładnie 2 – stopniową, przełożenie przekładni walcowej $i_w = 1/6$, oraz przekładni stożkowej $i_s = 1/2$. Całkowite przełożenie wynosi $i = i_w \cdot i_s = 1/12$),
 - wyprowadzenie skali pomocniczej o podziałce 10° (dla zakresu 360° konieczne było zastosowanie zestawu przekładni ślimakowa – przekładnia walcowa),
 - dobór mechanizmu dźwigniowego (minimalny zakres ruchu kół o uzębieniu czołowym to 3mm , w tym 1mm zazębienie i 2mm wyzębienie),
 - dobór części normalnych (łożyska, elementy złączne itp.).

Na rysunkach od rys. 3 do rys. 8 przedstawiono konstrukcję przyrządu podziałowego, będącego tematem opracowania.



Rys. 3. Obrotowy przyrząd podziałowy z napędem ręcznym

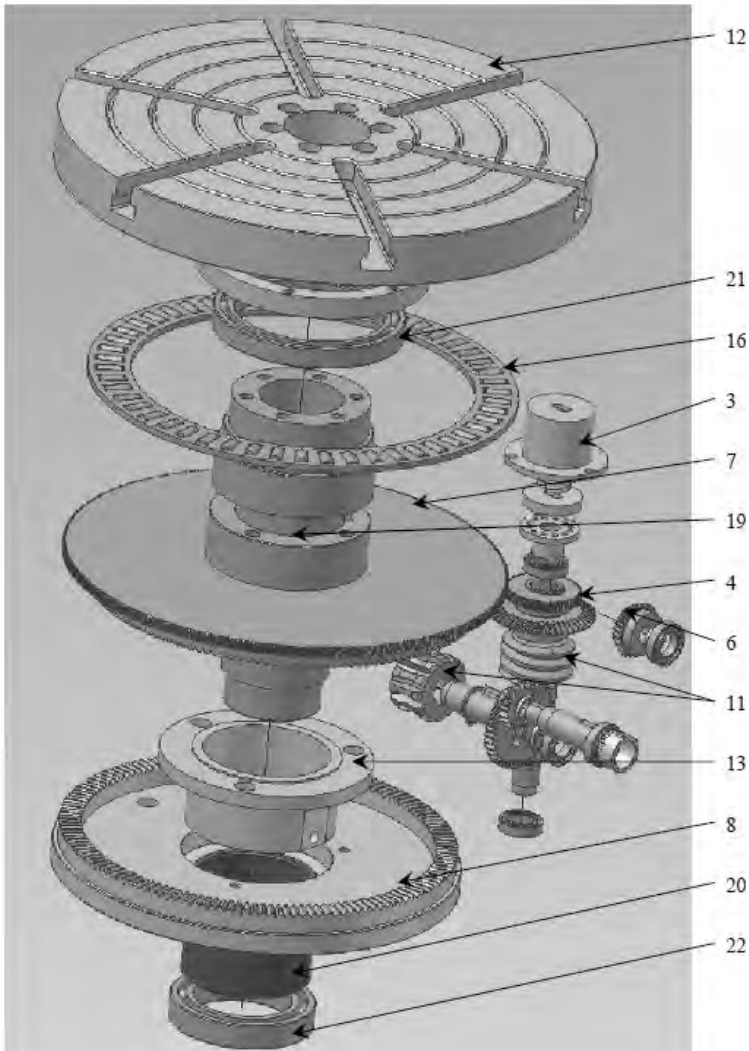
Fig. 3. The indexing table with hand operation



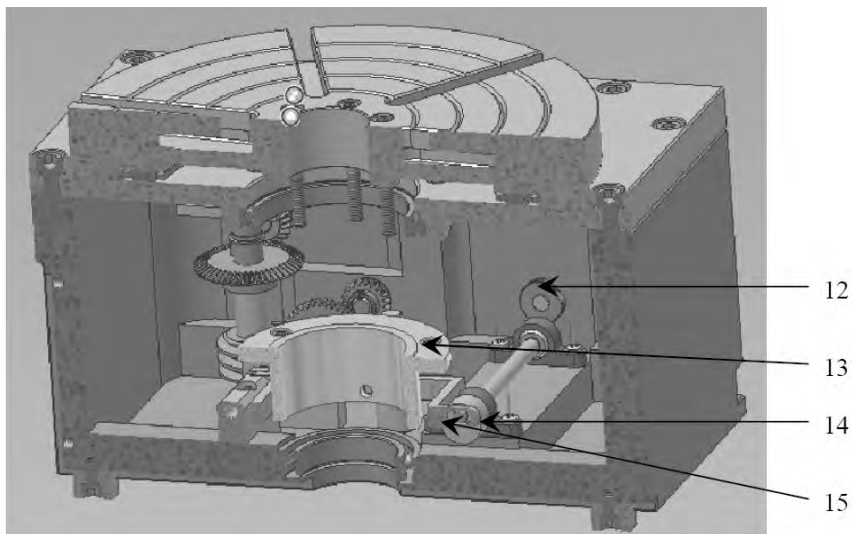
Rys. 4. Wewnętrzne elementy przyrządu

Fig. 4. Inside elements of indexing table

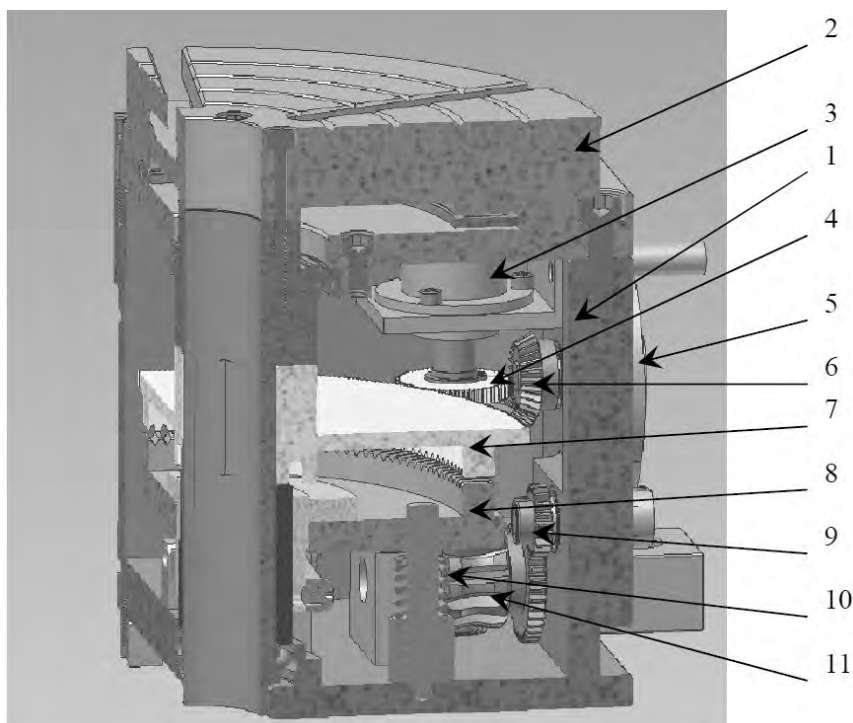
Oznaczenia na rysunkach od rys. 3 do rys. 8: 1 – korpus, 2 – tarcza, 3 – sprzęgło kulkowe, 4 – przekładnia zębata czołowa, 5 – koło nastawcze, 6 – przekładnia zębata stożkowa, 7 – koło zębate z uzębieniem czołowym (obrotowe), 8 – koło zębate z uzębieniem czołowym (stałe), 9 – przekładnia zębata czołowa, 10 – sprężyna dociskowa, 11 – przekładnia ślimakowa, 12 – przekładnia zębata czołowa, 13 – zabierak, 14 – mechanizm mimośrodowy, 15 – mechanizm dźwigniowy, 16 – łożysko tarczy, 17 – dźwignia mechanizmu blokującego, 18 – skala pomocnicza, 19 – wał główny.



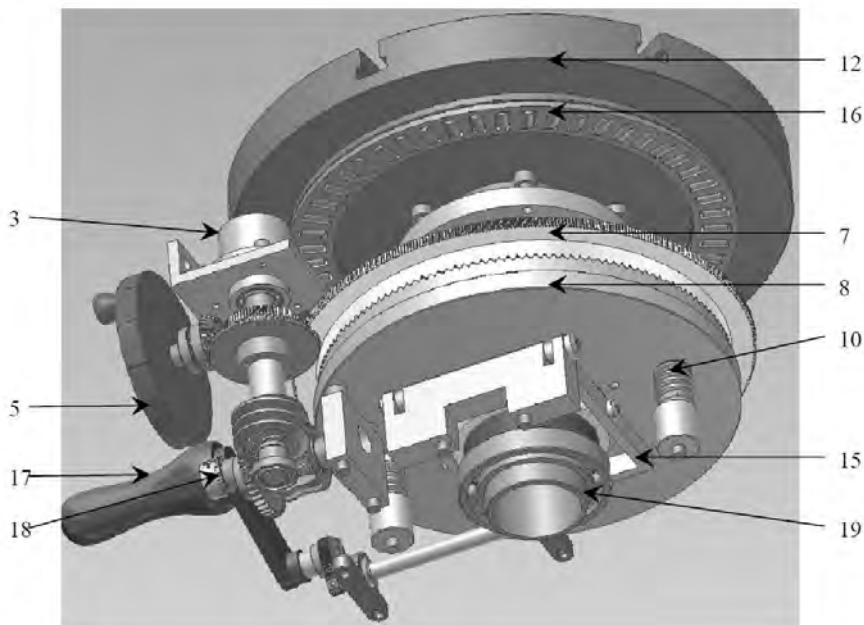
Rys. 5. Wał główny wraz z mechanizmami pomocniczymi
Fig. 5. Main shaft and supportive mechanism



Rys 6. Mechanizm dźwigniowo – mimośrodowy
Fig. 6. Link - eccentric mechanism



Rys. 7. Wewnętrzna konstrukcja przyrządu
Fig. 7. Inside designe indexing table



Rys. 8. Elementy kinematyczne przyrządu
Fig. 8. Kinematic elements indexing table

Obrotowy przyrząd podziałowy z napędem ręcznym działa w następujący sposób. Przesuwając dźwignię mechanizmu blokującego (17) z pozycji zablokowany do odblokowany (obracając o $\frac{1}{4}$ obrotu przeciwnie do wskazówek zegara), za pomocą przekładni (12) oraz mechanizmów (14) i (15), zabierak pociąga w dół koło zębate (8) wyzębając je z kołem (7). Następnie obracając koło nastawcze o określony kąt, za pomocą przekładni (4), (6) i (9) następuje obrót tarczy. Skala dla kątów do 30° znajduje się na skali nastawczym, natomiast większe kąty pokazywane są na skali pomocniczej (18), która jest mechanicznie sprzężona z kołem nastawczym za pomocą przekładni ślimakowej (11). Po ustaleniu kąta należy przesunąć dźwignię mechanizmu blokującego (17) z pozycji odblokowanej, do zablokowanej (obracając o $\frac{1}{4}$ obrotu w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara). Wówczas następuje ponowne zazębienie kół (7) oraz (8).

PODSUMOWANIE

Podczas procesu projektowania i konstruowania przeanalizowano różne sposoby realizowania ruchów roboczych, opracowano schematy kinematyczne, dobrano mechanizmy realizacji ruchów roboczych oraz elementy katalogowe. Przeprowadzono również obszerną analizę wariantów rozwiązań konstrukcyjnych

oraz zastosowania poszczególnych mechanizmów składowych, w których określono wady i zalety poszczególnych rozwiązań [1].

Dyskretny przyrząd obrotowy charakteryzuje się: dużą dokładnością pozycjonowania, bardzo dobrą powtarzalnością pozycjonowania ($\pm 3''$), możliwością przenoszenia dużych sił i momentów, precyzyjnymi uzębieniami czołowymi wykonanymi bez operacji szlifowania. Opracowana konstrukcja może stanowić podstawę aplikacji przemysłowej.

PIŚMIENNICTWO

1. Gubański M.: Konstrukcja obrotowego przyrządu podziałowego o podziale dyskretnym, Praca magisterska, Politechnika Poznańska, Poznań 2009.
2. Myszkowski A., Netter K., Staniek R.: Dyskretny przyrząd podziałowy z bistabilnym zaciskiem magnetycznym, Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, vol. 29, nr 1, str. 83-90, Poznań 2009.

THE INDEXING ROTARY TABLE WITH DISCREET DIVISION

Summary

In this thesis has been presented design of the construction of rotary indexing fixture with discreet division and manual drive. The main foundation were that, the positioning has to be solved as gearing two cog wheels with Hirth's coupling. Here were described many solutions of main components e.g. body, clutching, bearing, etc. Also the comparison were made in this paper. Finally one solution were selected and developed in details.

Keywords: indexing table, Hirth's teeth.

Arkadiusz Gola ¹⁾, Marta Osak ²⁾

MODELOWANIE PODSYSTEMU OBRABIAREK W ESP CZĘŚCI KLASY KORPUS Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU ENTERPRISE DYNAMICS

Streszczenie: Złożoność problemów techniczno-organizacyjnych, z którymi borykają się przedsiębiorstwa wytwórcze, powoduje, że potrzebne są metody i narzędzia umożliwiające wspomaganie projektowania nowych systemów wytwórczych, jak również reorganizację istniejących systemów wytwórczych. Z tego też powodu narzędziem, które znajduje coraz szersze zastosowanie o obszarze inżynierii produkcji są symulacje komputerowe. W niniejszym opracowaniu została zaprezentowana możliwość wykorzystania metod symulacji komputerowej do weryfikacji rozwiązania w postaci doboru obrabiarek dla ESP klasy korpus, będącego wynikiem realizacji procedury doboru. Jako narzędzie symulacji zastosowano program Enterprise Dynamics.

Słowa kluczowe: symulacje komputerowe, Enterprise Dynamics, podsystem obrabiarek ESP.

WSTĘP

Złożoność problemów techniczno-organizacyjnych, z którymi borykają się przedsiębiorstwa wytwórcze, powoduje, że potrzebne są metody i narzędzia umożliwiające wspomaganie projektowania nowych systemów wytwórczych, jak również reorganizację istniejących systemów wytwórczych [6]. Problemem o kluczowym znaczeniu jest to, że w większości sytuacji, nawet w przypadku posiadania narzędzia metodologicznego wspomagającego projektanta w podejmowaniu określonych decyzji (np. dotyczących zakupu elementów wyposażenia systemu produkcyjnego, opracowania harmonogramów produkcji) nie ma rzeczywistej możliwości weryfikacji opracowanego modelu.

W przedstawionych powyżej przypadkach, pomocnym i powszechnie wykorzystywanym narzędziem są symulacje komputerowe [6, 10]. Modelowane symulacje komputerowe są sztucznym i przybliżonym odtworzeniem zachodzących zjawisk lub zachowań badanego obiektu za pomocą jego modelu [13]. W całości przeprowadzane są na komputerze, każdy element rzeczywisty obiektu ma przyporządkowany element w modelu. W programie komputerowym opisywane są wszystkie zauważalne relacje pomiędzy elementami, ich struktura i główne zada-

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Zarządzania, Katedra Organizacji Przedsiębiorstwa.

² Politechnika Lubelska, Wydział Zarządzania, Katedra Organizacji Przedsiębiorstwa, Naukowe Koło Zarządzania Przedsiębiorstwem.

nia. Po właściwym zaprogramowaniu schematu przeprowadzane są symulacje, których zadaniem jest pokazanie przybliżonego rzeczywistego procesu. Otrzyma-
ne wyniki pomagają scharakteryzować procesy zachodzące w danym systemie.
Tak skonstruowane narzędzie badawcze pomaga w analizie takich czynników jak
przepływ materiałów, środków finansowych i informacji. Metoda ta ułatwia za-
projektowanie optymalnego systemu, w przypadku gdzie definiowane są kryteria
oceny, np. koszty, wydajność systemu, obciążenie maszyn [11, 12].

Jednym z problemów o kluczowym znaczeniu, w zakresie projektowania sys-
temów wytórczych jest zagadnienie odpowiedniego doboru maszyn technolo-
gicznych do projektowanego systemu. Jest to pierwszy etap projektowania, który
w dużej mierze decyduje o wydajności, efektywności i produktywności całego
systemu. Między innymi z tego powodu, powstało wiele rozwiązań metodolo-
gicznych, których celem jest komputerowe wspomaganie decyzji w zakresie do-
boru maszyn technologicznych m.in. dla konwencjonalnych systemów produk-
cyjnych [1], elastycznych systemów produkcyjnych [8], czy też rekonfigurowal-
nych systemów produkcyjnych [2].

W każdym z rozwiązań prezentowanych w literaturze, efektem końcowym
jest wynik w postaci jakościowego i ilościowego doboru obrabiarek dla systemu
dedykowanego do obróbki określonej grupy (rodziny) części. Jednakże, w każ-
dym z tych rozwiązań dodatkową kwestią pozostaje weryfikacja otrzymanego
rozwiązania, która jest trudnym zadaniem ze względu na brak możliwości prze-
prowadzenia jej (w większości przypadków) na rzeczywistym modelu. W niniej-
szym opracowaniu zostanie zaprezentowana możliwość wykorzystania metod
symulacji komputerowej do weryfikacji rozwiązania w postaci doboru obrabiarek
dla ESP klasy korpus, będącego wynikiem realizacji procedury doboru zaprezen-
towanej w pracach [4, 7]. Jako narzędzie symulacji zastosowano program Enter-
prise Dynamics.

MODELOWANIE W ENTERPRISE DYNAMICS

Enterprise Dynamicie (ED) jest oprogramowaniem do modelowania i symula-
cji. Wizualno-symulacyjny pakiet zawiera w sobie wiele obiektów symulacyjnych
do zastosowania, np. wytwarzanie, magazynowanie, transport, komunikacja i
kontrola. Integralnym elementem systemu jest język programowania 4DScript,
pozwalający na programowanie nowych funkcji, budowę nowych obiektów oraz
tworzenie interfejsu użytkownika [3].

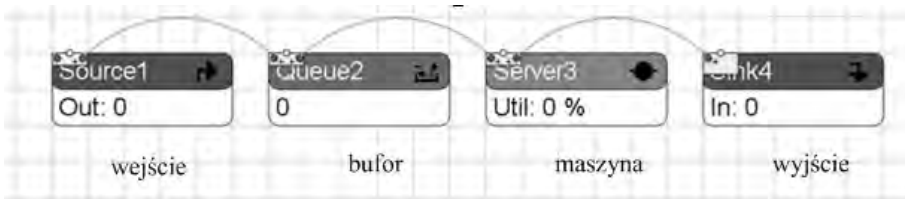
Tworzenie modelu symulacyjnego w ED polega na wyborze obiektów z bi-
blioteki (Library Tree), i rozmieszczeniu ich na planie modelu. Podstawowe
obiekty dostępne są w grupie Basic Modeling, która zawiera następujące elemen-
ty składowe, przedstawione na rys. 1.

Przykładem najprostszego modelu, jaki może być przedmiotem symulacji,
jest model jednomaszynowy składający się z wejścia (Source), bufora (Queue),
maszyny (Server), wyjścia (Sink), który zamieszczono na rys. 2.



Rys. 1. Widok Biblioteki ED

Product – zdefiniowany jako: produkt, dokumenty, osoby,
Source – wejście, wprowadzenie produktów do modelu,
Queue – kolejka/bufor, magazynowanie międzyoperacyjne,
Server – stanowisko pracy, maszyna,
Sink – wyjście, atom opuszczenia modelu produkt,
Node – węzeł transportowy,
Container – pojemnik do składowania obiektów.



Rys. 2. Model jednomaszynowy

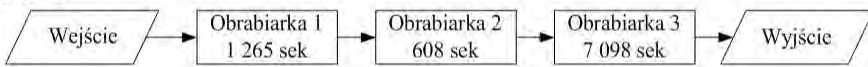
Podczas budowy modelu wymagane jest dokładne ustalenie parametrów, zdefiniowanie czasu, zaznaczenie kanałów przepływu, istnieje także możliwość ustawienia raportów. Na podstawie wyników symulacji można ocenić dokładność odwzorowania procesów rzeczywistych w modelu. Można wprowadzać zmiany parametrów modelu i obserwować zmiany zachodzące w kolejnych symulacjach i na tej podstawie zbudować model charakteryzujący się najlepszą efektywnością procesów.

MODEL PROCESU PODSYSTEMU OBRABIAREK ELASTYCZNEGO SYSTEMU PRODUKCYJNEGO

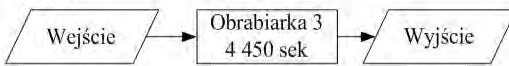
W przeprowadzonym eksperymencie symulacyjnym, analizowano model podsystemu obrabiarek elastycznego systemu produkcyjnego do obróbki części korpus złożonego z maszyn technologicznych: MCFV1680 (Obrabiarka 2) - 3 szt., TOSTec PRIMA (Obrabiarka 3) - 3szt., MCX900 (Obrabiarka 1) - 1szt. Dane

dotyczące jednostkowego czasu wykonania zabiegu na poszczególnych obrabiarkach zostały uzyskane od producentów bądź dystrybutorów obrabiarek. Wyroby Korpus_1, Korpus_2 i Korpus_3, pojawiają się na wejściu do systemu w sposób losowy, zarówno jeśli chodzi o czas wejścia, jak i ilość wyrobów wchodzących do systemu. Średnie roczne programy produkcyjne części przyjęto na poziomie: Korpus_1 - 3950szt., Korpus_2 – 5435szt., Korpus_3 – 3160szt. Przyjęto, iż projektowany ESP pracował będzie w systemie trójzmiannowym, 365 dni w roku - w tym zaplanowano 15 dni planowanych przestojów związanych z przeglądami i konserwacją urządzeń w systemie oraz 3% czasu na nieplanowane przestoje systemu. Współczynnik udziału czasu operacji transportowych i magazynowania międzyoperacyjnego w projektowanym systemie przyjęto na poziomie 10%. Marszruty technologiczne obróbki poszczególnych wyrobów zostały przedstawione na rys. 3.

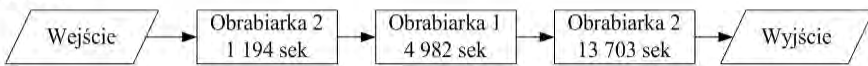
KORPUS 1



KORPUS 2

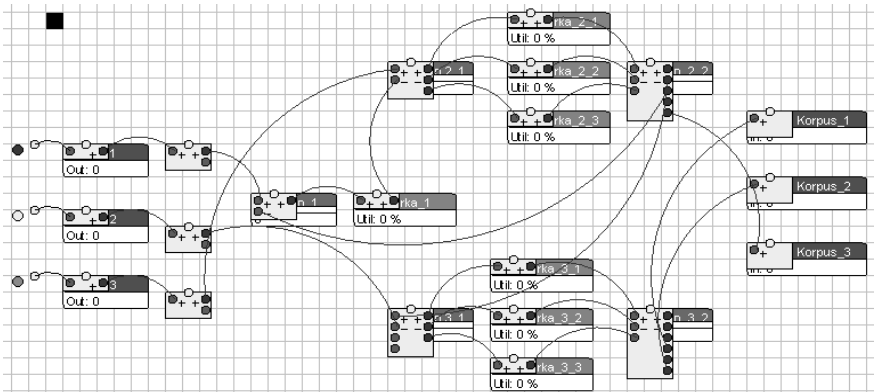


KORPUS 3



Rys. 3. Marszruty technologiczne wyrobów Korpus_1, Korpus_2, Korpus_3

W oparciu o przyjęte założenia, zbudowano model procesu podsystemu obrabiarek elastycznego systemu produkcyjnego w Enterprise Dynamics, przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Model podsystemu obrabiarek ESP z uwidocznieniem połączeń między obiektami

PARAMETRY PROCESU SYMULACJI

Symulacja jest prowadzona w okresie rozliczeniowym 1 roku, w trakcie którego do systemu jest wprowadzana liczba wyrobów wynikająca z przyjętej wielkości programu produkcyjnego. Założono, że wyroby Korpus_1, Korpus_2 i Korpus_3 wchodzi do systemu losowo przez trzy różne wejścia. W celu zdefiniowania losowości czasowego wejścia wyrobów zastosowano funkcję *Uniform* sparametryzowaną w przypadku kolejnych wyrobów jako: Korpus_1: *Uniform(0,13176)*, Korpus_2: *Uniform(0,9576)*, Korpus_3: *Uniform(0,16470)*. Ze względu na charakter analizowanego zagadnienia czasy transportu wyrobów pomiędzy stanowiskami przyjęto na poziomie zerowym. Na podstawie przebiegu procesu technologicznego zamodelowano przejścia poszczególnych wyrobów w modelu (Kanały) – rys. 7. Kierowanie wyrobów do obrabiarek zgodnych z przebiegiem marszruty technologicznej realizowane jest według komendy wpisanej w polu *Trigger on exit*. Czas jednostkowy realizacji operacji na określonych obrabiarkach (*cycletime*) został wyrażony w języku programowania 4DScript. Język 4DScript został zastosowany do sparametryzowania zarówno obrabiarek, jak też produktów i magazynów. Zostało to spowodowane faktem, że każdy produkt charakteryzuje się innym czasem wykonania operacji na różnych obrabiarkach i różnymi marszrutami technologicznymi. Struktura skryptów w języku 4DScript dla przykładowych obiektów została przedstawiona w tabeli 1.

Tabela 1. Struktura skryptów dla przykładowych atomów

Typ przykładowego obiektu	Treść skryptu
Product: Korpus_1	<u>Trigger on exit:</u> Do(SetLabel([Czas1],Mins(21.087),i),SetLabel([Czas2],Mins(10.1315),i),SetLabel([Czas3],Mins(118.308),i),SetLabel([Stanowisko2],1,i),SetLabel([Stanowisko3],2,i),SetLabel([Stanowisko4],4,i),SetLabel([Kanal],3,i),SetLabel([Krok],1,i))
Source: Magazyn_1	<u>Trigger on exit:</u> Do(SetLabel([Kanal],Case(Label([Krok],i),Label([Stanowisko2],i),Label([Stanowisko3],i),Label([Stanowisko4],i),i))
Server: Obrabiarka_2_1	<u>Trigger on exit:</u> SetLabel([Krok],Label([Krok],i)+1,i) <u>Cycletime:</u> Case(Label([Krok],i),Label([Czas1],i), Label([Czas2],i), Label([Czas3],i))

W przypadku przepływu wyrobów wykorzystano zasadę FIFO (First In First Out). W przypadku wystąpienia kilku obrabiarek tego samego typu, wyrób wchodzi na tę obrabiarkę, która pierwsza się zwolni, lub jeśli w danym momencie jest kilka wolnych obrabiarek – wybór maszyny, do której zostanie wysłany wyrób następuje w sposób losowy (funkcja: *Send to: A random open channel: choose a random channel from all the open output channel*). Biorąc pod uwagę przyjęte założenia czasu pracy systemu oraz przyjęte współczynniki czasu operacji magazynowania międzyoperacyjnego czas symulacji odpowiadający okresowi jednego

roku przyjęto na poziomie 7333,2 godz. $((365 - 15) \text{ dni} * 24 \text{ godz./dzień} * 0,97 * 0,9)$. W procesie produkcyjnym części Korpus_1 mają miejsce dwa zamocowania jednoznaczne z przejściem wyrobu ze stanowiska na stanowisko. Obróbka zaczyna się na Obrabiarence_1, następnie część trafia na Obrabiarkę_2, po zakończeniu tej operacji trafia na Obrabiarkę_3. W przypadku wyrobu Korpus_2 obróbka odbywa się „na gotowo” na poziomie centrum obróbkowym Obrabiarka_3. Proces technologiczny wyrobu Korpus_3 zaczyna się od obróbki na stanowisku Obrabiarka_2, po czym element trafia na stanowisko Obrabiarka_1, prace kończone są na Obrabiarence_2. Po zakończeniu procesu wyroby przesyłane są do kanału wyjścia gdzie trafiają zgodnie z etykietą, np.: Korpus_1 – Wyjście Korpus_1.

WYNIKI SYMULACJI

Wykorzystując założone parametry obiektów wykonano szereg symulacji procesu produkcyjnego, zaobserwowano zbliżone wyniki. Wyniki zbiorcze z przeprowadzonych 25 symulacji zostały przedstawione w tab. 1 i 2. Przedmiotem analizy były parametry dotyczące magazynów takie jak: maksymalny stan, zajętość, stan w magazynie, oczekiwanie wyrobu w magazynie na obróbkę. Niska zajętość magazynów międzyoperacyjnych oraz krótkie czasy oczekiwania części na obróbkę potwierdzają dużą płynność realizacji procesu wytwarzania. Istotne znaczenie dla prawidłowej pracy modelu miał fakt, że ani razu nie wystąpiło zjawisko „zatkania systemu” związane z przeciążeniem obrabiarek i/lub przekroczonym ustalonym stanem magazynu międzyoperacyjnego. Obciążenie poszczególnych obrabiarek, wskazuje na poprawność realizacji etapu ilościowego doboru – w przypadku kilku obrabiarek jednego typu obciążenie wszystkich maszyn z danej grupy waha się w granicach 60-80% co oznacza, iż jest ich odpowiednia ilość. Średni czas obróbki wyrobu syntetycznego ($w_1+w_2+w_3$) wynosi 41810 sekund.

Tabela 2. Uśrednienie wyników symulacji dotyczących Magazynów

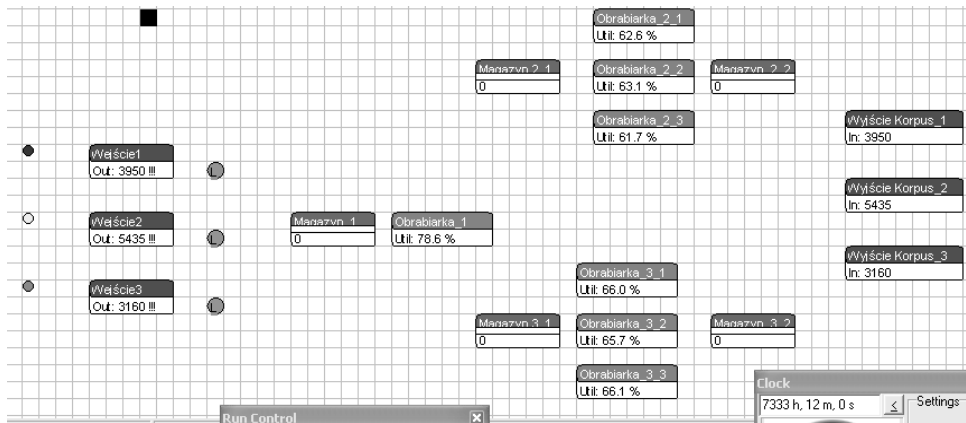
Magazyny:	Mag 1	Mag.2	Mag.3
Średni stan:			
Maksymalny stan magazynu (w szt.)	10,6	4,8	6,4
Zajętość magazynu (w %)	47,38	6,7	14,47
Średni stan w magazynie (w szt)	0,916	0,085	0,21
Średni czas oczekiwania na obróbkę (w sek)	3401,369	220,242	590,9

Tabela 3. Uśrednienie wyników symulacji dotyczących Obrabiarek

Obrabiarka:	X ₁	X _{2_1}	X _{2_2}	X _{2_3}	X _{3_1}	X _{3_2}	X _{3_3}
Średni stan:							
Średnie obciążenie obrabiarki w trakcie procesu symulacji (w %)	78,6	62,5	62,4	62,5	65,9	65,9	66

Widok modelu po zakończeniu przykładowej symulacji pokazano na rysunku 5. Każdy atom modelu na bieżąco wyświetlane ma najważniejsze parametry

try procesu. Istotne jest pokazywanie zajętości magazynów, ilości wyrobów które opuściły model i obciążenie obrabiarek.



Rys. 5. Widok modelu po zakończeniu symulacji

PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonej symulacji przebiegu procesu wytwarzania wynika, iż podsystem obrabiarek oparty na otrzymanych rozwiązaniach jest w podanym przypadkach odpowiedni do realizacji zdefiniowanego zadania. Świadczą o tym zarówno sam przebieg procesu, jak również obciążenie poszczególnych obrabiarek i magazynu operacyjnego.

Podsystem wytwarzania oparty na obrabiarkach będących wynikiem procesu doboru jest w stanie zrealizować w sposób względnie płynny planowane zadania produkcyjne realizowane w zmiennych losowo (w sensie czasowym i ilościowym) zleceniach produkcyjnych. We wszystkich przypadkach modelowane podsystemy zrealizowały wprowadzoną do systemu liczbę wyrobów w 100%. Brak wykonania planu produkcyjnego na dany rok był spowodowany tylko i wyłącznie brakiem „zapuszczenia” do produkcji wszystkich wyrobów w zakładanym okresie (czasie symulacji), co wynika z przyjętej losowości czasu wejścia wyrobów. Nie wielkie odchylenia wyników obciążenia obrabiarek oraz wskaźników zajętości magazynów międzyoperacyjnych w trakcie kolejnych symulacji świadczą o dużej stabilności realizacji procesu produkcyjnego mimo stochastycznego charakteru procesu. W związku z powyższym można postawić tezę, iż otrzymane rozwiązanie jest prawidłowe i umożliwia realizację procesu produkcyjnego zgodnie z przyjętymi wymaganiami.

PIŚMIENNICTWO

1. Dashchenko A.I. (red.): Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006.
2. Enterprise Dynamics – <http://www.enterprisedynamics.com>.
3. Gola A., Świć A.: Brief Preliminary Design for a Method of FMS Machine Tools Subsystem Selection, PAMM, Vol. 9, Issue 1, 2010, pp. 663-664.
4. Krupa K.: Modelowanie symulacja i prognozowanie, WNT, 2008.
5. Kampa A., Gołda G.: Modelowanie i symulacja przepływu produkcji w zrobotyzowanym gnieździe wytwórczym, „Zarządzanie Przedsiębiorstwem” 1/2009, s. 21-29.
6. Świć A. Gola A.: Elements of Design of Production Systems – Methodology of Machine Tool Selection in Casing-Class FMS, Management and Production Engineering Review, Vol. 1, No. 2, 2010, pp. 73-81.
7. Tolio T. (red.): Design of Flexible Production Systems. Methodologies and Tools, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2009.
8. Zawadzka L. (red.): Problemy zarządzania i inżynierii produkcji, WPG, 1999.
9. Zdanowicz R., Czopek M.: komputerowy system oceny efektywności funkcjonowania elastycznego gniazda produkcyjnego, „Mechanik” 3/1996, s 97-100.
10. Zdanowicz R., Świder J.: Modelowanie i symulacja systemów produkcyjnych w programie Enterprise Dynamics, WŚP, 2005.
11. Zdanowicz R.: Modelowanie i symulacja procesów wytwórczych, WPŚ, Gliwice 2002.
12. Zdanowicz R.: Modelowanie i symulacje procesów wytwarzania, WPŚ, Gliwice 2007.

MODELLING OF THE BODY-CLASS PARTS FMS MACHINE TOOL SUBSYSTEM USING THE ENTERPRISE DYNAMICS PROGRAM

Summary

Complexity of technical-organizational problems in manufacturing companies causes that there is requirement for methods and tools which helps both in the process of designing new manufacturing systems and in the process of reorganization existing systems. Because of this, the tool which is widespread in the area of production engineering are computer simulations. In this paper the possibility of use the computer simulation to verification the solution received in the process of machine-tools selection in casing-class FMS was presented. As a simulation tool the Enterprise Dynamics program was used.

Keywords: computer simulation, Enterprise Dynamics, FMS machine tools subsystem.

**Marcin Gapski, Piotr Koniorczyk, Monika Wielgosz,
Janusz Zmywaczyk ¹⁾**

ESTYMACJA CIEPŁA WŁAŚCIWEGO I PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ PMMA ORAZ PTFE PRZY UŻYCIU WYBRANYCH TECHNIK ODWROTNYCH

Streszczenie: W pracy wykorzystano zmodyfikowaną metodę chwilowego źródła ciepła oraz współczynnikiem metodę odwrotną do jednoczesnej estymacji przewodności cieplnej λ oraz ciepła właściwego c_p materiałów izolacyjnych takich jak polimetakrylan metylu (PMMA) oraz politetrafluoroetylen (PTFE) w czasie jednego pomiaru. W procesie wyznaczania poszukiwanych parametrów termofizycznych bazowano na symulacyjnych i rzeczywistych sygnałach pomiarowych, przedstawiających nadwyżkę temperatury $\theta_m(t)$ w odległości H od chwilowego źródła ciepła. Uzyskane wyniki estymacji parametrów termofizycznych PMMA i PTFE porównano z wynikami referencyjnymi dostępnymi w literaturze.

Słowa kluczowe: termodynamika, nieustalone przewodzenie ciepła, parametry termofizyczne, metody odwrotne.

WSTĘP

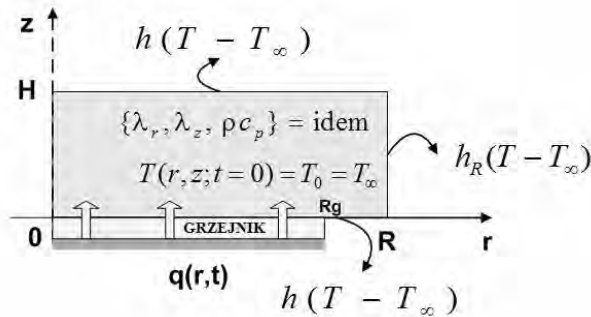
Znajomość właściwości termofizycznych ciał stałych takich jak np. przewodność cieplna λ lub ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu c_p , jest niezbędna podczas projektowania, wytwarzania i eksploatacji określonych elementów konstrukcyjnych. Stąd w wyniku silnego rozwoju inżynierii materiałowej na świecie w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat pojawia się potrzeba opracowywania nowych oraz doskonalenia istniejących metod badawczych, do których należą m.in. metody dynamiczne (ang. transient methods). W metodach tych badane ciało wyprawdza się ze stanu równowagi termicznej za pomocą wymuszenia cieplnego o zadanym kształcie i czasie trwania, po czym dokonuje się pomiaru odpowiedzi termicznej układu w wybranym punkcie próbki. Zmierzona odpowiedź termiczna pozwala w przypadku jednorodnego i izotropowego ciała półnieskończonego oraz wymuszenia cieplnego jest typu delta Diraca, na obliczenie wartości liczbowych parametrów termofizycznych w oparciu o znajomość tylko położenia maksimum nadwyżki temperatury i czasu odpowiadającemu temu maksimum. Rozwój modeli analitycznych i metodyki badań parametrów termofizycznych przy wykorzystaniu dynamicznej metody impulsowej (ang. pulse transient method) przedstawili Boháč i inni [3, 4, 5], którzy wyniki swoich rozważań odnieśli do PMMA trakto-

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Instytut Techniki Lotniczej.

wanego jako materiał referencyjny. W grupie metod dynamicznych mieszczą się również współczynnikowe metody odwrotne. W metodach tych mamy do czynienia z iteracyjnym procesem uzgadniania zmierzonej i modelowej nadwyżki temperatury w jednym bądź w wielu punktach pomiarowych.

ZMODYFIKOWANA METODA CHWILOWEGO ŹRÓDŁA CIEPŁA

Modyfikacja metody chwilowego źródła ciepła jest wynikiem uwzględnienia skończonych rozmiarów badanej próbki i grzejnika cienkowarstwowego oraz potrzeby uwzględnienia wpływu warunków brzegowych na pole temperatury w badanej próbce poddanej określönemu chwilowemu wymuszeniu cieplnemu. W metodzie tej [6] zakłada się, że jednorodna próbka wykonana z materiału o kierunkowej przewodności cieplnej λ_r i λ_z ma kształt walca o promieniu R i wysokości H (Rys. 1). W chwili początkowej znajduje się ona w równowadze termodynamicznej z otoczeniem o stałej temperaturze T_∞ . Powierzchnie próbki wymieniają ciepło z otoczeniem na drodze konwekcji swobodnej ze współczynnikami przejmowania ciepła h_R dla $r=R$ oraz h dla $z=0$ i $z=H$. Zakłada się, że źródłem ciepła działającym na powierzchni $z=0$ w czasie $0 < t \leq t_g$ jest grzejnik cienkowarstwowy o promieniu $R_g < R$ i pomijalnej grubości, w stosunku do grubości próbki, którego gęstość energii wynosi q_0 .



Rys. 1. Model wymiany ciepła dla zmodyfikowanej metody chwilowego źródła ciepła

Rozwiązanie problemu początkowo-brzegowego w punkcie $P(r=0, z=H)$ w postaci nadwyżki temperatury dane jest wzorem (1):

$$\Delta T(r, z; t) = \begin{cases} \frac{4q_0}{\rho c_p H} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} A_k(r/R) B_l(z/H) \left(\frac{1 - \exp(-\gamma_{k,l} t)}{\gamma_{k,l}} \right), & \text{dla } t \leq t_g \\ \frac{4q_0}{\rho c_p H} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} A_k(r/R) B_l(z/H) \left(\frac{\exp(-\gamma_{k,l} (t - t_g)) - \exp(-\gamma_{k,l} t)}{\gamma_{k,l}} \right) & \text{dla } t_g \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (1)$$

i zostało ono szczegółowo omówione w pracach [7, 8, 10].

W zmodyfikowanej metodzie chwilowego źródła ciepła wykorzystuje się również jeden punkt pomiarowy odpowiadający położeniu maksimum nadwyżki temperatury. Ponieważ pomiaru nadwyżki temperatury dokonuje się na tylnej powierzchni próbki w jej warstwie przypowierzchniowej, to czas $t=t_m$ odpowiadający θ_m jest większy od czasu $t=t_g$ odpowiadającemu chwili wyłączenia grzejnika, zatem do rozważań brane jest pod uwagę jedynie rozwiązanie dla czasu $t \geq t_g$, czyli:

$$\Delta T(r, z, t) = \frac{4q_0}{\rho c_p H} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} A_k(r/R) B_l(z/H) \left(\frac{\exp(-\gamma_{k,l}(t-t_g)) - \exp(-\gamma_{k,l}t)}{\gamma_{k,l}} \right) \quad (2)$$

W punkcie położenia maksimum nadwyżki temperatury pochodna po czasie wyrażenia (2) jest równa zeru:

$$\left. \frac{\partial \Delta T(r, z, t)}{\partial t} \right|_{t=t_m} = \frac{4q_0}{\rho c_p H} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} A_k(r/R) B_l(z/H) (\exp(-\gamma_{k,l}t) - \exp(-\gamma_{k,l}(t-t_g))) = 0 \quad (3)$$

z którego to warunku otrzymujemy równanie na współczynniki $\gamma_{k,l}$ zawierające poszukiwane dyfuzyjności cieplne a_r oraz a_z . Warto w tym miejscu podkreślić, że współczynniki $\{\gamma_{k,l}\}$ zależą od pierwiastków równań charakterystycznych ω_k i ε_l będącymi funkcjami liczb Biota Bi_R i Bi , a te z kolei zawierają nieznane przewodności cieplne λ_r i λ_z . Wyznaczenie współczynników termofizycznych $\{a_r, a_z, \lambda_r, \lambda_z, c_p\}$ zmodyfikowaną metodą chwilowego źródła ciepła jest możliwe jedynie na drodze iteracyjnej przy czym należy dysponować dwiema próbkami tego samego materiału wyciętymi wzdłuż jego głównych kierunków, dla których oddzielnie wyznacza się $\{a_r, \lambda_r, c_p\}$ oraz $\{a_z, \lambda_z, c_p\}$. Proces iteracyjny przebiega w ten sposób, że najpierw wyznacza się z równania (3) dyfuzyjność cieplną $a=a_r=a_z$ występującą we współczynnikach $\{\gamma_{k,l}\}$, następnie ρc_p z równania (2) w punkcie maksimum nadwyżki temperatury ΔT_m po czym oblicza się przewodność cieplną λ_{new} z zależności $\lambda_{new}=a\rho c_p$. Gdy spełniony zostaje warunek: $(|\lambda_{new} - \lambda_{old}| / \lambda_{new}) < 0,0001$ obliczenia należy zakończyć, a otrzymane wartości liczbowe parametrów termofizycznych uznaje się za wyznaczone.

WSPÓŁCZYNNIKOWA METODA ODWROTNA

W celu porównania wyników estymacji parametrycznej wybranych parametrów termofizycznych za pomocą zmodyfikowanej metody chwilowego źródła ciepła oraz współczynnikowej metody odwrotnej bazującej na całej dostępnej informacji zawartej w odpowiedzi termicznej układu zdecydowano się wykorzystać ten sam model wymiany ciepła, którego rozwiązanie analityczne dane jest wzorem (1).

W zagadnieniu odwrotnym poszukiwane parametry termofizyczne badanego materiału są wyznaczone w procesie uzgadniania rzeczywistej odpowiedzi ter-

micznej układu $\mathbf{Y}(P^i, t_n)$ na zadane wymuszenie cieplne, z odpowiedzią modelową $\mathbf{T}(P^i, t_n)$ uzyskaną z rozwiązania określonego zagadnienia bezpośredniego, w przyjętych punktach pomiarowych P^i dla chwil t_n . Proces uzgadniania tych odpowiedzi sprowadza się do minimalizacji funkcjonału średniokwadratowego J , który w swej najprostszej postaci jest sumą kwadratów różnic pomiędzy zmierzoną a modelową nadwyżką temperatury w badanym punkcie próbki:

$$J(\mathbf{u}^T) = \sum_{i=1}^{LPP} \sum_{n=1}^{Nt} [T(P^i, t_n, \mathbf{u}^T) - Y_i(t_n)]^2 = \mathbf{e}^T \mathbf{e} \rightarrow \min \quad (4)$$

gdzie \mathbf{u} jest wektorem poszukiwanych parametrów termofizycznych danego materiału, LPP – liczbą punktów pomiarowych, Nt – liczbą kroków czasowych.

Minimum funkcjonału jest poszukiwane w sposób iteracyjny z wykorzystaniem metody Levenberga – Marquardta [10]. Rozwiązanie dla iteracji $(s+1)$ ma postać:

$$\mathbf{u}^{(s+1)} = \mathbf{u}^{(s)} + \mathbf{P}_{L-M}^{(s)} \{ \mathbf{X}^T(\mathbf{u}^{(s)}) [\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{u}^{(s)})] \} \quad (5a)$$

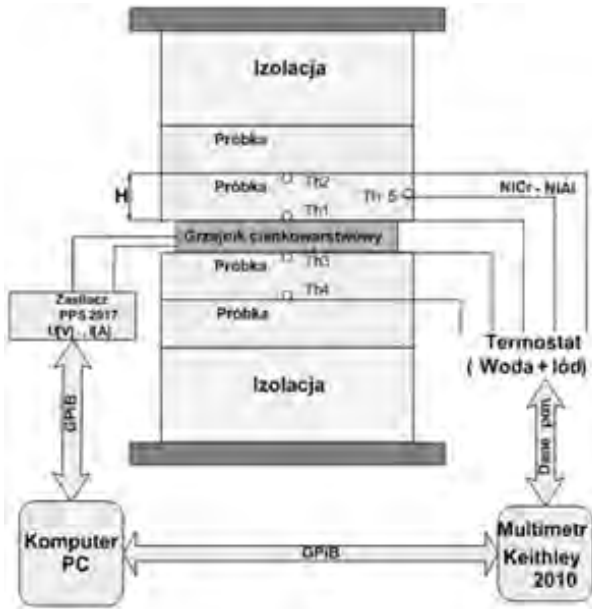
gdzie \mathbf{P}_{L-M} jest następującą macierzą

$$\mathbf{P}_{L-M}^{(s)} = [\mathbf{X}^T(\mathbf{u}^{(s)}) \mathbf{X}(\mathbf{u}^{(s)}) + \mu_s \mathbf{I}^{(s)}]^{-1} \quad (5b)$$

a \mathbf{X} jest macierzą współczynników wrażliwości termicznej [7]

OPIS UKŁADU POMIAROWEGO

W centralnej części stosu pomiarowego (rys.2) umieszczono cienkowarstwowy grzejnik o grubości $H_g=0,15\text{mm}$ i średnicy zewnętrznej wynoszącej $\phi=38\text{mm}$, zasilany prądem stałym $I(t)$ o zadanej napięciu $U(t)$ i czasie trwania t_g za pomocą stabilizowanego zasilacza AMREL PPS 2017 połączonego z komputerem interfejsem GPIB. Po obu stronach grzejnika umieszczono próbki badanego materiału, z których dwie sąsiadujące ze źródłem ciepła posiadały specjalne rowki wzdłuż średnicy, wewnątrz których umieszczono termoelementy typu K (NiCr – NiAl). Dodatkowo stos pomiarowy był obłożony z góry i z dołu warstwą izolacji termicznej ze styropianu w kropki oraz umieszczony w imadle pełniącym rolę docisku w celu zapewnienia lepszego kontaktu cieplnego pomiędzy powierzchnią próbki i grzejnika. Na czas eksperymentu całość była obłożona watą mającą za zadanie ograniczyć wpływ konwekcji. Pomiar napięcia termoelektrycznego odbywał się przy pomocy multimetru Keithley 2010, wyposażonego w 9-kanalową kartę termoparową Keithley 2001 TCSCAN, sterowanego z komputera za pomocą karty GPIB. Do sterowania całym układem pomiarowym i akwizycji sygnałów pomiarowych wykorzystano program utworzony w środowisku wirtualnych przyrządów pomiarowych LabWindows firmy National Instruments opracowany w roku 2000 w Zakładzie Aerodynamiki i Termodynamiki WAT.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

WYNIKI BADAŃ

W procesie identyfikacji właściwości termofizycznych zmodyfikowaną metodą chwilowego źródła ciepła oraz współczynnikową metodą odwrotną wykorzystano próbki wykonane z PMMA o gęstości 1181kg/m^3 oraz z PTFE o gęstości 2185kg/m^3 . Średnica wszystkich próbek była równa 40mm , natomiast grubość wynosiła kolejno: 8mm i 10mm . Przeprowadzone doświadczenia miały na celu wykazanie, która z omawianych metod pozwala uzyskać bardziej zbliżone do wartości referencyjnych badanych materiałów wyniki jednoczesnej estymacji parametrycznej. W przypadku próbek z PMMA za wartości referencyjne c_p i λ przyjęto wyniki podane przez Assala i innych [1], którzy wykorzystując metodę dynamiczną gorącego drutu otrzymali dla temperatury pokojowej następujące wartości: przewodność cieplna $\lambda=0,1899\text{ W/m/K}$, ciepło właściwe $c_p=1397,5\text{J/kg/K}$. Rezultaty obliczeń własnych zawarto w tabeli 1.

Na podstawie tabeli 1 widać, iż w przypadku próbek wykonanych z PMMA uzyskane z obu metod ciepło właściwe jest porównywalne. Natomiast maksymalna odchyłka procentowa $(\Delta\lambda/\lambda)_{\text{max}}$ dla dziesięciomilimetrowej próbki PMMA w zmodyfikowanej metodzie chwilowego źródła ciepła wyniosła $64,2\%$, podczas gdy w drugiej metodzie wyniosła $4,2\%$. Z kolei w przypadku ośmiomilimetrowych próbek wykonanych ze PTFE otrzymane wartości parametrów termofizycznych przy pomocy obu metod są zbliżone. Wyraźne różnice można zaobserwować natomiast dla próbek 10mm , gdzie w zmodyfikowanej metodzie chwilowego źródła ciepła zarówno c_p jak i λ odbiegają o ponad 20% od wartości referencyj-

nych ($\lambda=0,25\text{W/m/K}$, $c_p=1010\text{J/kg/K}$) [2], podczas gdy w drugiej metodzie $|(\Delta c_p/c_p)_{\max}|=2,1\%$, zaś $|(\Delta\lambda/\lambda)_{\max}|=2,9\%$.

Tabela 1. Wyniki estymacji parametrycznej dla PMMA i PTFE
Table 1. Parameter estimation results for PMMA and PTFE

	Zmodyfikowana metoda chwilowego źródła ciepła				Współczynnikowa metoda odwrotna			
	c_p [J/kg/K]	$\% \Delta c_p/c_p$	λ [W/m/K]	$\% \Delta \lambda/\lambda$	c_p [J/kg/K]	$\% \Delta c_p/c_p$	λ [W/m/K]	$\% \Delta \lambda/\lambda$
PMMA								
H=8mm	1368.42	2.3	0.1818	4.5	1382.84	1.2	0.1804	5.3
H=10mm	1349.30	3.8	0.1157	64.2	1402.69	0.2	0.1983	4.2
PTFE								
H=8mm	1222.17	17.4	0.3432	27.2	838.85	20.4	0.2122	17.8
H=10mm	1282.21	21.2	0.3290	24.0	989.20	2.1	0.2430	2.9

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy zaproponowano modyfikację modelu metody chwilowego źródła ciepła umożliwiającą wyznaczenie przewodności cieplnej λ oraz ciepła właściwego c_p w sposób iteracyjny, jak również współczynnikiem metodę odwrotną opartą na tym samym rozwiązaniu analitycznym zagadnienia bezpośredniego. Na podstawie tabeli 1, gdzie przedstawiono wyznaczone oboma metodami wartości poszukiwanych parametrów termofizycznych, w oparciu o rzeczywiste sygnały pomiarowe, widać wyraźnie wyższość współczynnikowej metody odwrotnej nad drugą z omawianych technik, niezależnie od materiału i grubości próbki. Jest to szczególnie dobrze widoczne w przypadku parametru λ zarówno dla materiału PMMA jak i PTFE.

Należy zaznaczyć, iż mimo wielu zalet metody chwilowego źródła ciepła takich jak m.in. krótki czas pomiaru czy prostota wzorów obliczeniowych, jej główną wadą jest wysoka czułość wyników zależna od dokładności wyznaczenia położenia maksimum nadwyżki temperatury. Lokalizacja położenia tego punktu może być obciążona dużym błędem, gdy próbka do badań ma zbyt dużą grubość (duże rozmycie) oraz gdy dobrano zbyt dużą moc wymuszenia cieplnego (wpływ efektów brzegowych). Wady tej częściowo pozbawiona jest współczynnikowa metoda odwrotna, która do wyznaczenia poszukiwanych parametrów termofizycznych wykorzystuje cały zapisany przebieg temperatury w danym punkcie pomiarowym. Z tego też powodu, technika ta wykazuje małą wrażliwość na zaszumienie sygnału.

PIŚMIENNICTWO

1. Assael M. J., Botsios S., Galou K., Metaxa I.N.: Thermal Conductivity of Polymethyl Methacrylate (PMMA) and Borosilicate Crown Glass BK7, International Journal of Thermophysics, Vol. 26, No. 5, Sep. (2005), pp. 1595-1605.

2. Blunn J., Lindemann A., Meyer M., Strasser C.: Characterization of PTFE Using Advanced Thermal Analysis Techniques, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 31, 2010, pp.1919-1927
3. Boháč V., Vretenár V., Kubičár L.: Optimisation methodology for the pulse transient method and its application at the measurement of thermophysical properties of materials, *Proc. THERMOPHYSICS 2005*, Oct. 12-13, Kočovce, Slovakia, pp. 57-71
4. Boháč V., Dieška P., Kubičár L.: The progress in development of new models for pulse transient method, *Proc. THERMOPHYSICS 2007*, Oct. 11-12, Kočovce, Slovakia, pp. 24-33
5. Boháč V., Kubičár L., Vretenár V.: Methodology of the testing of model for contact pulse transient method and influence of the disturbance effects on evaluating thermophysical parameters of the PMMA, *Measurement Science Review*, Vol. 5, Section 3, 2005, pp.98-103.
6. Gapski M., Zmywaczyk J.: Kompleksowe badania parametrów termofizycznych ciał stałych z wykorzystaniem nowej zmodyfikowanej metody chwilowego źródła ciepła oraz współczynnikowej metody odwrotnej (praca złożona do redakcji Biul. WAT).
7. Zmywaczyk J., Wielgosz M., Koniorczyk P., Gapski M.: Identification of some thermophysical and boundary parameters of black foamglas by an inverse method, *Proc. THERMOPHYSICS 2009*, Oct. 29-30, Valitce, Czech Republic. 2009, pp. 235-251
8. Zmywaczyk J., Gapski M.: Estimation of thermophysical parameters of stainless steel 1H18N9T by an inverse method, *Proc. THERMOPHYSICS 2010* Nov. 3-5, Valitce, Czech Republic, 2010, pp. 253-260.
9. Zmywaczyk J., Koniorczyk P., Gaj J.: Określanie parametrów termofizycznych polimetakrylanu metylu polistyrenu oraz stali stopowej 1H18N9T metodą chwilowego źródła ciepła, *Biuletyn WAT*, vol. LVI, nr 3 (647) 2007, str. 243-256.
10. Zmywaczyk J.: Estymacja parametrów termofizycznych ciał stałych z wykorzystaniem wybranych metod optymalizacji. Monografia WAT, Warszawa 2006.

ESTIMATION OF SPECIFIC HEAT AND THERMAL CONDUCTIVITY OF PMMA AND PTFE USING CHOSEN INVERSE TECHNIQUES

Summary

A modified heat pulse method and an inverse coefficient technique is presented for simultaneous estimation of: the thermal conductivity λ and the specific heat c_p of insulation materials such as polymethyl methacrylate (PMMA) and polytetrafluoroethylene (PTFE) during single measurement. Thermophysical parameter estimation process was based on simulated and real measurement signals, which shows temperature excess $\theta_m(t)$ at the back face of the sample. The paper presents the estimation results for PMMA and PTFE compared with reference values from literature.

Keywords: thermodynamics, transient heat transfer, thermophysical parameters, inverse techniques.

Michał Wieczorowski, Piotr Znaniecki ¹⁾

ROBOTYZACJA POMIARÓW WYKONYWANYCH SKANEREM OPTYCZNYM

Streszczenie: W referacie przedstawiono wykorzystanie robotyzacji w automatyzacji pomiarów przeprowadzanych za pomocą skanerów optycznych. Umożliwia ona obniżenie kosztów wykonywania pomiarów dzięki skróceniu czasu ich wykonywania. Zbierane informacje o kształcie powierzchni badanych przedmiotów pozwalają na ich późniejsze wykorzystywanie do analizy jakości produkowanych elementów. Automatyzacja procesu pomiaru z wykorzystaniem robota przemysłowego umożliwia wyeliminowanie błędów przypadkowych popełnianych przez obsługujących go pracowników. Sposób przeprowadzania pomiarów jest niewrażliwy na błędy pozycjonowania manipulatora, co wynika z lokalizowania poszczególnych pomiarów za pomocą punktów referencyjnych, a nie pozycji skanera względem badanej części.

Słowa kluczowe: skaner optyczny, robotyzacja, prąжки, optymalizacja, pomiary.

WSTĘP

Konieczność zapewnienia wydajnego procesu kontroli jest obecnie niezbędna w każdym nowoczesnym przedsiębiorstwie produkcyjnym, a eliminacja czynnika ludzkiego jest pożądanym kierunkiem prac badawczo-rozwojowych [1]. Skanery optyczne są silnie rozwijającą się gałęzią współrzędnościowej techniki pomiarowej. Technologia ta wykorzystywana jest w przemyśle w inżynierii odwrotnej, w zastosowaniach analizy i kontroli jakości [2]. W przypadku wykonywania pomiarów manualnie, istnieje niebezpieczeństwo popełnienia dodatkowego błędu wynikającego z zawodności czynnika ludzkiego.

PODSTAWY TEORETYCZNE

Opisywany system pomiarowy bazuje na zasadzie triangulacji [3]: głowica dokonuje projekcji prążków na obiekt mierzony, a skaner obserwuje ich przebieg dwoma kamerami. Jednostka przetwarzająca automatycznie oblicza współrzędne 3D dla każdego piksela kamery. Zależnie od rozdzielczości kamery, wynikiem pojedynczego pomiaru jest większa lub mniejsza chmura punktów. Znaczniki umieszczone na przedmiocie lub na jego otoczeniu służą skanerowi jako punkty referencyjne. Po dopasowaniu obliczane są odchyłki wszystkich pojedynczych punktów pomiarowych w odniesieniu do zarysu nominalnego. Odchyłki te mogą

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych.

być wizualizowane jako kolorowy wykres, przydatny do analizy przedmiotu w czasie kontroli pierwszej sztuki i do pomiarów w trakcie produkcji, jak również do sprawdzania procesu [4].

KONCEPCJA AUTOMATYZACJI POMIARÓW OPTYCZNYCH

Pomysłem, który został zrealizowany, było wykorzystanie robota przemysłowego do automatyzacji procesu pomiarowego wykonywanego przy użyciu skanera optycznego. W trakcie prac koncepcyjnych przygotowano plan wykorzystania stacji pomiarowej do prowadzenia badań w sposób powtarzalny, umożliwiający w dłuższej perspektywie wykorzystanie opracowanego rozwiązania do seryjnej kontroli jakości w wielu gałęziach przemysłu.

Wybór parametrów urządzeń podyktowany był dostępnymi rozwiązaniami umożliwiającymi wykonanie stawianych przed nimi zadań. Ponadto wykorzystano dostępną powierzchnię laboratoryjną i sprawdzone rozwiązania techniczne w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa obsłudze pracującej w strefie niebezpiecznej. Takie planowanie prac projektowych przy wdrażaniu koncepcji w warunkach przemysłowych ma szereg zalet, a mianowicie: obniżenie kosztów opracowania dokumentacji technicznej, możliwość przetestowania rozwiązania w oparciu o dostępne komponenty, jeśli występują w magazynach działów technicznych, obniżenie kosztów uruchomienia podzespołów dzięki doświadczeniu pracowników służb utrzymania ruchu, obniżenie kosztów szkoleń specjalistycznych, zapewnienie dostępności części zamiennych, przewidzianych wcześniej do wykorzystania w innych urządzeniach.

Rozwiązanie oparte na połączeniu sześćoosiowego manipulatora ze stołem obrotowym, na którym mocuje się badany obiekt, wydaje się najbardziej korzystnym z punktu widzenia optymalizacji projektu, ponieważ umożliwia badanie przedmiotów przestrzennych o znacznych gabarytach. Części pojedyncze, wyprodukowane na przykład przy pomocy tłoczenia blachy, można badać poprzez skanowanie powierzchni z jednej strony. Jednak badając złożenia wielu części pojedynczych zmuszeni jesteśmy skanować powierzchnię z każdej strony zespołu. Mocując taki złożony przedmiot na stole obrotowym otrzymujemy dostęp do wielu powierzchni, jeśli tylko nie są przesłonięte przez przyrząd pomocniczy ustalający ich pozycję. Koncepcja ta skraca pomiar o czas potrzebny na zmianę pozycji ocenianego elementu oraz umożliwia pełną automatyzację procesu pomiaru.

ZAUTOMATYZOWANA STACJA POMIARÓW OPTYCZNYCH

Przetestowane rozwiązanie techniczne bazuje na sześćoosiowym robocie przemysłowym marki KUKA (rys. 1) i optycznym skanerze pomiarowym ATOS II firmy GOM mbH (rys.2).



Rys. 1. Robot przemysłowy z optycznym skanerem pomiarowym



Rys. 2. Adapter mocujący skaner optyczny na ramieniu robota

Przygotowano i sprawdzono poprawność rozwiązań dodatkowych elementów zestawu, takich jak mocowanie manipulatora do podłoża, adapter mocujący skaner optyczny na ramieniu robota, uniwersalny przyrząd ustalający położenie badanych części w przestrzeni pracy robota.

W celu zwiększenia zakresu badań poprzez możliwie najszerszy dostęp do badanych powierzchni, do sterowania systemu zaprojektowano i wykonano dedykowany stół obrotowy, na którym ustawiane są kontrolowane przedmioty. Aby ułatwić podłączenie i sterowanie dodatkową osią systemu, zastosowano identyczny napęd, jak wykorzystywany w robocie przemysłowym. Takie rozwiązanie skraca czas potrzebny na uruchomienie tej części systemu pomiarowego, ułatwiając ponadto dostęp do części zamiennych w przypadku wystąpienia awarii, bez konieczności gromadzenia dodatkowych kosztownych części zamiennych, zarówno mechanicznych, jak i elektrotechnicznych. Zastosowane rozwiązania techniczne zostały przetestowane w próbnym badaniu części wykonanych z blach tłoczonych. Zaowocowało to wprowadzeniem wielu ulepszeń i modyfikacji. Badania potwierdziły ponadto przydatność stacji pomiarowej zarówno do analiz laboratoryjnych, jak i masowych pomiarów przemysłowych. Sposób przeprowadzania pomiarów przez skaner ATOS jest niewrażliwy na błędy pozycjonowania manipulatora, co wynika z lokalizowania poszczególnych pomiarów za pomocą punktów referencyjnych, a nie pozycji skanera względem badanej części. Umożliwia to w praktyce przemysłowej wykorzystanie używanego i częściowo wyeksploatowanego manipulatora, jeśli taki jest do dyspozycji, a także prowadzenie badań i testów przed podjęciem decyzji o realizacji inwestycji.

Jak już wspomniano, punkty referencyjne umożliwiają zlokalizowanie na części pomiarowej pozycji zeskanowanego fragmentu powierzchni. W trakcie prac

konceptyjnych podjęto próbę wyeliminowania konieczności naklejania punktów referencyjnych na powierzchniach badanych części w celu skrócenia czasu przygotowywania części do pomiaru oraz ich późniejszego oczyszczania. W tym celu rozmieszczono te punkty wokół mierzonej części, bezpośrednio na przyrządzie pomiarowym. Po wprowadzeniu pozycji punktów referencyjnych do oprogramowania pomiarowego trzeba tak zaprojektować przebieg badania, by w każdym zebrany obrazie były widoczne co najmniej trzy takie punkty. W trakcie testów okazało się, że w rozwiązaniu tym jedynym ograniczeniem jest wielkość pola pomiarowego skanera. Jeśli zatem posiadana wielkość pola pomiarowego umożliwia jednoczesne pokrycie pola części mierzonej i zebranie punktów referencyjnych, to otrzymujemy możliwość wymiany części w przyrządzie mocującym bez konieczności naklejania dodatkowych markerów na powierzchni.

Przystępując do pracy ze skanerem optycznym, jeśli sytuacja tego wymaga, pracownik obsługujący przeprowadza proces kalibracji: w przypadku skanera ATOS II przy pomocy krzyża, a w przypadku skanera ATOS III przy użyciu tablicy kalibracyjnej. Bez względu na rodzaj stosowanego wzorca jest to proces wymagający od operatora pewnego doświadczenia, a także czasu na jego wykonanie. W testowanej stacji zrobotyzowanej udało się ten proces w pełni zautomatyzować. Obsługujący urządzenie wywołuje jedynie zapisany wcześniej program pomiarowy, następnie manipulator ustawia skaner przed wzorcem i proces kalibracji przebiega automatycznie we wszystkich wymaganych pozycjach.



Rys. 3. Krzyż do kalibracji skanera optycznego

W trakcie prac projektowych oraz testowania zastosowanych koncepcji i znajdowania rozwiązań napotykanymi trudnościami powstała odpowiednia dokumentacja techniczna. Środków finansowych i czasu zainwestowanego w jej wytworzenie nie można uznać za stratę w chwili uruchomienia stacji pomiarowej. Dokumentacja umożliwia bowiem powielenie części bądź całości urządzenia kontrolno-pomiarowego, znacznie obniżając koszty kolejnych wdrożeń. Nie bez znaczenia są również doświadczenia praktyczne zebrane przez personel wdrażający

pierwszą stacją pomiarową. Pozwalają one przeprowadzić kolejne uruchomienia szybciej i ze zmniejszoną liczbą błędów - warto uczyć się na błędach popełnionych przez innych.

W celu zapewnienia bezpieczeństwa pracownikom obsługującym nowy system pomiarowy, zaprojektowano i wykonano wygrodzenie części hali pomiarowej zabezpieczające przed przebywaniem osób w strefie pracy manipulatora w trakcie jego działania. Zastosowane ograniczenie dostępu wraz z zabezpieczeniami elektrotechnicznymi i elektronicznymi stanowi gotowy do powielenia projekt zabezpieczający strefę niebezpieczną zgodną z przepisami prawa. Przy projektowaniu zwrócono również uwagę na łatwość dostępu do obszaru robota i wygodę jego użytkowania.

Opracowanie koncepcji uniwersalnego przyrządu pomiarowego najkorzystniej jest przeprowadzić przy pomocy oprogramowania CAD. Producenci elementów do konstruowania tego typu konstrukcji coraz chętniej udostępniają bazy danych pojedynczych elementów. Umożliwia to przygotowanie kilku koncepcji rozwiązań i wybór najkorzystniejszego ze względu na przyjęte kryterium oceny. Wspomagane komputerowo projektowanie mocowań umożliwia ponadto wygodną edycję gotowego projektu, gdyby konieczne były poprawki, których nie udało się zidentyfikować w trakcie opracowywania dokumentacji.

Optyczna współrzędnościowa technika pomiarowa w wielu przypadkach jest jedynym rozwiązaniem umożliwiającym przeprowadzanie stuprocentowej kontroli jakości części, często bezpośrednio na stanowiskach produkcyjnych. Dzięki manipulatorowi, jakim jest robot przemysłowy, możliwe jest wkomponowanie procesu pomiaru bezpośrednio do procesów produkcyjnych. Takie rozwiązanie umożliwia zmniejszenie ilości produktów nie spełniających kryteriów wymiarowych poprzez natychmiastową informację o problemie w procesie wytwarzania.

ZALETY ZROBOTYZOWANYCH STACJI POMIAROWYCH

Wykorzystanie skanerów optycznych do kontroli jakości produkcji ma ogromną zaletę w postaci możliwości archiwizowania informacji o kształcie przedmiotu do późniejszych analiz. W przypadku zastosowania stykowych współrzędnościowych maszyn pomiarowych, po przeprowadzeniu badania zawierającego określoną ilość zmierzonych cech geometrycznych, nie ma możliwości przeprowadzenia dodatkowej analizy, jeśli zebrane punkty pomiarowe nie zawierają potrzebnych informacji. W przypadku archiwizowania zeskanowanych obrazów całych części, w razie potrzeby można z nich uzyskać dodatkowe informacje, które wcześniej nie były niezbędne.

Automatyzacja procesu pomiaru z wykorzystaniem robota przemysłowego umożliwia wyeliminowanie błędów przypadkowych popełnianych przez obsługujących go pracowników. Zapis przebiegu pomiaru i jego cykliczne wykonywanie zabezpiecza zaś jakość otrzymywanych informacji. Ponadto umożliwia przeprowadzanie pomiarów przez osoby o niższych kwalifikacjach zawodowych. Jeśli

przebieg badania zostanie zaprojektowany i przetestowany przez doświadczonego specjalistę, czynności uruchamiania pomiaru i zmiany mierzonych elementów mogą być w sposób niezawodny i bezpieczny wykonywane przez osoby przeszkolone w podstawowym zakresie. Zapisywanie informacji pomiarowych i ich wstępna ocena mogą być w pełni zautomatyzowane i nie wymagają obsługi personelu. Dzięki temu, dla realizacji procesów nadzoru nad produkcją można ponieść niższe nakłady finansowe na wyszkolenie pracowników, z których tylko część musi posiadać wysokie kwalifikacje zawodowe.

Zautomatyzowany optyczny system pomiarowy swoje najkorzystniejsze zastosowanie znajduje w badaniach części o powtarzalnym przebiegu pomiarowym. W celu umożliwienia przeprowadzania pomiarów serii części należy przystosować stanowisko poprzez wyposażenie go w przyrząd mocujący badane elementy oraz odpowiednie zaprojektowanie przebiegu pomiaru w zastosowanym oprogramowaniu. Zastosowanie zrobotyzowanej stacji pomiarowej do przeprowadzania powtarzalnych procesów pomiaru skraca średni czas jednostkowy badania. Częste zmiany programów oraz tworzenie nowych programów to czynności czasochłonne. Przebieranie stacji pomiarowej pod zmieniające się przedmioty jest kolejnym procesem uniemożliwiającym skuteczne wykorzystanie dostępności urządzenia. Taka sytuacja powoduje wzrost realnych kosztów usługi pomiaru. Przy przeprowadzaniu pomiarów serii elementów wykorzystujących to samo oprzyrządowanie pomocnicze, przestoje urządzenia są powodowane jedynie przez wymianę badanych części.

WNIOSKI

Badania przeprowadzone przy pomocy zrobotyzowanej stacji pomiarowej wykazały zalety rozwijającej się metody pomiarów, jaką jest technika bezstykowa, bazująca na wykorzystaniu źródła światła wyświetlającego na mierzonej powierzchni prążki. Badania potwierdziły ponadto przydatność stacji pomiarowej zarówno do analiz laboratoryjnych, jak i masowych pomiarów przemysłowych. Sposób przeprowadzania pomiarów jest niewrażliwy na błędy pozycjonowania manipulatora, co wynika z lokalizowania poszczególnych pomiarów za pomocą punktów referencyjnych, a nie pozycji skanera względem badanej części.

Wykorzystanie skanerów optycznych do kontroli jakości produkcji ma ogromną zaletę w postaci możliwości archiwizowania informacji o kształcie przedmiotów do późniejszych analiz.

Automatyzacja procesu pomiaru z wykorzystaniem robota przemysłowego umożliwia wyeliminowanie błędów przypadkowych popełnianych przez obsługujących go pracowników.

Dzięki temu mogą ją obsługiwać pracownicy przeszkoleni w stopniu podstawowym. Optymalizuje to koszty ponoszone na wyszkolenie pracowników, z których tylko część musi posiadać wysokie kwalifikacje zawodowe niezbędne do zaprogramowania stacji pomiarowej.

PIŚMIENNICTWO

1. Wieczorowski M., Koterak R., Grzelka M., Gapiński B., Znaniński P., Krasicki P., Radke M.: Automation of measurements using optical scanner / Możliwości automatyzacji pomiarów z zastosowaniem skanera optycznego. Book of Abstracts III Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Manufacturing 2010 Współczesne problemy wytwarzania i zarządzania produkcją 24 – 26.11.2010, Poznań, Polska. s. 201-202.
2. Wieczorowski M.: Industrial application of optical scanner. Zeszyty Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsko Białej, 22, 2006, s. 381-390.
3. Galanulis K., Reich C., Thesing J., Winter D.: Optical Digitizing by ATOS for Press Parts and Tools. Publikacja wewnętrzna GOM, Braunschweig, 2005.
4. Wieczorowski M., Koterak R., Znaniński P.: Wykorzystanie skanera optycznego w kontroli jakości karoserii samochodu, PAK, vol. 56, nr 1/2010 s. 40-41.

ROBOTIZATION OF MEASUREMENTS WITH AN OPTICAL SENSOR

Summary

In the paper use of robotization in the automation of measurements with optical scanners has been presented. It makes reduction of costs possible thanks to shortening of the time needed to perform the measurements. Captured data of the shape of examined surfaces may later be used for evaluating the quality of manufactured components. The automation of the measuring process employing an industrial robot makes it possible to eliminate random errors caused by the operators. The method of performing the measurements is insensitive to positioning errors of the manipulator because all individual measurements (scans) are located by the reference points and not by the position of the scanner in relation to the examined part.

Keywords: optical scanner, robotization, stripes, optimisation, measuring.

Piotr Sęk, Bogdan Antoszewski ¹⁾

POWIERZCHNIA Z TEKSTURĄ - TOPOGRAFIA I ENERGIA POWIERZCHNIOWA

Streszczenie: W nowoczesnych maszynach dla realizacji różnych celów m.in. takich jak intensyfikacja smarowana, intensyfikacja wymiany ciepła, stymulowanie mikroprzepływów, zwiększenie aktywności chemicznej powierzchni; coraz częściej stosuje się teksturowanie powierzchni. Stało się to możliwe dzięki rozwojowi technologii wykorzystujących skoncentrowany strumień energii do których należy mikroobróbka laserowa. Tematyka opracowania koncentruje się na identyfikacji cech topografii powierzchni z teksturą przy wykorzystaniu najnowocześniejszych profilometrów. Autorzy podejmują próbę powiązania wybranych parametrów topografii powierzchni teksturowanej z jej energią powierzchniową.

Słowa kluczowe: energia powierzchniowa, teksturowanie powierzchni, obróbka laserowa.

WSTĘP

Laserowe teksturowanie powierzchni jest aktualnie najbardziej rozwiniętą techniką wytwarzania w sposób powtarzalny, szybki i ekonomiczny mikrowgłębień (rowki, dziurki, szewrony i inne) na powierzchni elementów maszyn. Głównym celem tworzenia tekstury powierzchniowej jest redukcja oporów tarcia oraz zużycia współpracujących części. Niezależnie od tego dzięki teksturze powierzchniowej możliwa jest praca przy wyższych prędkościach ślizgania i naciskach niż miało by to miejsce przy użyciu elementów bez tekstury. W wielu pracach wykazano, że teksturowanie powierzchni zwiększa odporność na zacieranie i przy zużywaniu poprzez fretting, a także jest stosowane wszędzie tam gdzie znaczenie mają właściwości adhezyjne warstw powierzchniowych (łączenie materiałów, nakładanie powłok, techniki drukarskie, aktywność biologiczna i chemiczna powierzchni, itp.) [5, 6, 7].

Teksturowanie laserowe należy do grupy technologii nazywanych mikroobróbką laserową. Są to procesy obróbki ubytkowej, przy której obszary usuwanego materiału mają wymiary w skali mikrometrów lub milimetrów, a do usuwania materiału używana jest energia wiązki laserowej. Mikroobróbka laserowa jest metodą, z powodzeniem stosowaną wówczas, gdy wymagana jest wysoka dokładność wymiarowa i w przypadku materiałów kłopotliwych dla technologii mechanicznych. Teksturowanie laserowe polega na nadawaniu powierzchni obrabianego materiału pożądanej struktury geometrycznej i/lub rozkładu właściwości.

¹⁾ Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali.

Wiązka laserowa, jako fala elektromagnetyczna wykazująca koherencję, czyli spójność czasową i przestrzenną, jest nośnikiem pozwalającym na uzyskiwanie wysokiej koncentracji energii pod względem obszaru i czasu oddziaływania na materiał obrabiany. W laserowej mikroobróbce obszar bieżącego oddziaływania na materiał jest określony wielkością plamki laserowej lub maski, która przepuszcza tylko pożądaną część wiązki. W przypadku, gdy do obróbki potrzebna jest wysoka powierzchniowa gęstość energii, stosuje się skupianie wiązki przy użyciu elementów optycznych. Wiązka laserowa o średnicy D i długości fali λ teoretycznie może być skupiona w ognisku, którego minimalna średnica jest zależna od występowania zjawiska dyfrakcji i jest opisywana wzorem:

$$d = 2,44 \frac{f}{D} \lambda \quad (1)$$

gdzie: f – ogniskowa zastosowanego elementu skupiającego (soczewki lub zwierciadła).

Długość λ fali promieniowania jest istotna nie tylko ze względu na możliwość osiągnięcia wysokiego skupienia wiązki, ale również ze względu na zdolność absorbowania energii promieniowania przez materiał. W mikroobróbce laserowej szczególnie istotny jest aspekt czasu impulsu wiązki, bowiem w zależności od intensywności promieniowania i czasu ekspozycji można wykorzystywać różne mechanizmy oddziaływania na materiał. Wynika to ze skończonych czasów reakcji elektronów i sieci atomowej materiału na fotony. Impulsy o długości większej o 1ns nazywane są impulsami długimi. W przypadku czasu od 1ps do 1ns impulsy nazywa się krótkimi, a przy czasie trwania mniejszym od 1ps mówi się o impulsach ultrakrótkich.

Przy wysokiej intensywności promieniowania, impulsach o krótkim czasie i dużej energii, występuje zjawisko absorpcji wielofotonowej, czyli jednoczesnego przekazania energii wielu fotonów jednemu elektronowi. Usuwanie materiału z obszaru oddziaływania wiązki występuje przed jego termicznym topnieniem i parowaniem. Proces taki jest nazywany topnieniem nietermicznym. Do jego uzyskania konieczna jest dostateczna gęstość powierzchniowa energii wiązki laserowej. W przypadku niedostatecznej gęstości powierzchniowej energii następuje relatywnie wolniejsze podnoszenie temperatury materiału i słabnięcie wiązań pod wpływem drgań cieplnych, które może doprowadzić do termicznego topnienia i odparowania materiału. Od długości trwania impulsów laserowych zależy wielkość strefy wpływu ciepła.

Obróbka impulsami długimi pozostawia wyraźne ślady przetopienia i zmiany na skutek oddziaływania ciepła. Natomiast ablacja wywoływana impulsami pikosekundowymi i femtosekundowymi jest nazywana ablacją zimną (ang. *the cold ablation*), ponieważ w materiale nie obserwuje się strefy wpływu ciepła, w jej tradycyjnym rozumieniu.

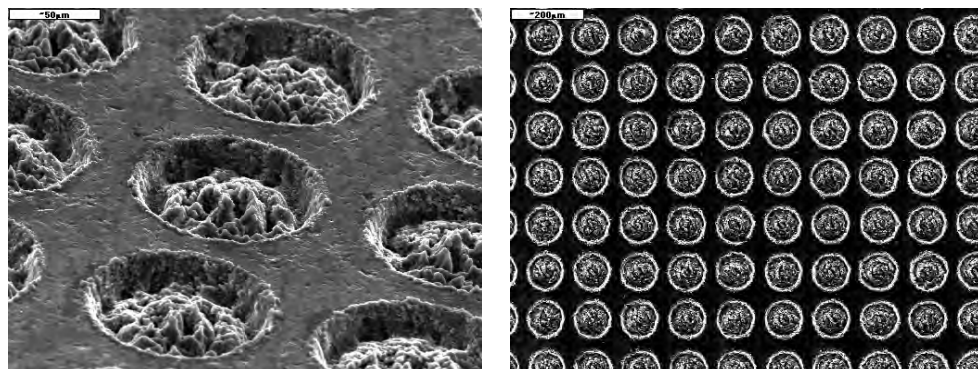
Z punktu widzenia zastosowania teksturowania powierzchni istotne znaczenie ma jednoznaczna identyfikacja wytworzonych tekstur oraz jej podstawowe właściwości fizyczne. W popracowaniu analizuje się metody badania topografii powierzchni oraz oceny właściwości fizycznych takich jak zwilżalność i napięcie powierzchniowe.

BADANIA EKSPERYMENTALNE

Przedmiotem badań były tekstury powierzchniowe wykonane technologią laserową na powierzchniach próbek w postaci pierścieni z SiC o wymiarach 35X25X7. Teksturowanie powierzchni pierścieni wykonano wykorzystując laser firmy ESI Model 5200 μ VIA DRILL. Jest to laser Nd:YAG pompowany diodowo o maksymalnej mocy wiązki 2 W, emitujący promieniowanie nadfioletowe o długości fali 355 nm. Pozostałe istotne parametry pracy lasera to szerokość impulsu 30 ns dla 3 kHz, częstotliwość 100 Hz ÷ 20 kHz. Laser wyposażony jest w optykę skanerową o polu roboczym 533 mm x 635 mm. Wgłębienia wykonywano wykorzystując standardowe oprogramowanie skanera.

Tabela 1. Parametry tekstury powierzchni pierścieni

Nr próbki	Średnica wgłębienia d [μ m]	Odległość między środkami osi symetrii wgłębień L [μ m]	Głębokość zagłębień [μ m]	Stopień zaczer-nienia [%]
1	78	162	13	18,2
2	134	279	13	17,9
3	78	106	13	42,5
4	134	183	13	41,8
5	150	256	13	27,4
6	70	119	13	27,1
7	102	128	13	49,9
8	102	233	13	15,1
9	102	174	13	26,9
10	102	174	13	26,9



Rys. 1. Widok powierzchni z teksturą na pierścieniu SiC: po lewej – pojedyncze wgłębienia na powierzchni pierścienia (pow. 500x), po prawej - zespół wgłębień tekstury na pierścieniu (stopień zaczer-nienia 42%, pow. 100x)

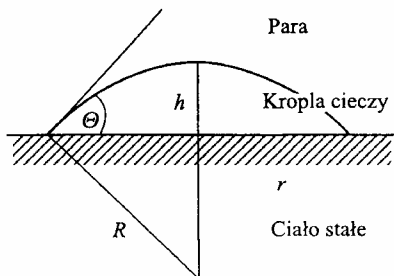
Procedura tekstutowania obejmowała dwa etapy, pierwszy erodowanie punktowe po trajektorii spirali i drugi profilowanie otworu wiązką o średnicy odpowiadającej zadanej średnicy wgłębienia.

W tabeli 1 przedstawiono parametry uzyskanych tekstur, a na rysunku 1 ich przykładowy widok uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego.

Badania właściwości adhezyjnych powierzchni z teksturą

Badania zwilżalności i swobodnej energii powierzchniowej są obiektem zainteresowań wielu dyscyplin naukowych: fizyki, chemii, inżynierii materiałowej oraz biotechnologii. Zwilżalność materiałów wykorzystywanych w przemyśle różnymi cieczami ma duże znaczenie praktyczne, w procesach przemysłowych, takich jak klejenie, uszczelnianie, malowanie, drukowanie oraz nanoszenie różnego rodzaju powłok ochronnych. Jedną z najczęściej stosowanych metod oznaczania kąta zwilżania powierzchni materiałów konstrukcyjnych jest metoda opierająca się na geometrii kropli (rys. 2). Powierzchnia kropli najczęściej ma kształt czaszy i wówczas kąt zwilżania obliczamy z pomiaru wysokości czaszy h i promienia powierzchni styku kropli r . Wysokość czaszy jest określona wzorem $h=R(1-\cos\Theta)$, a promień styku powierzchni $r=R\sin\Theta$. Z tych zależności otrzymujemy:

$$\Theta = \frac{2h}{r} \quad (2)$$

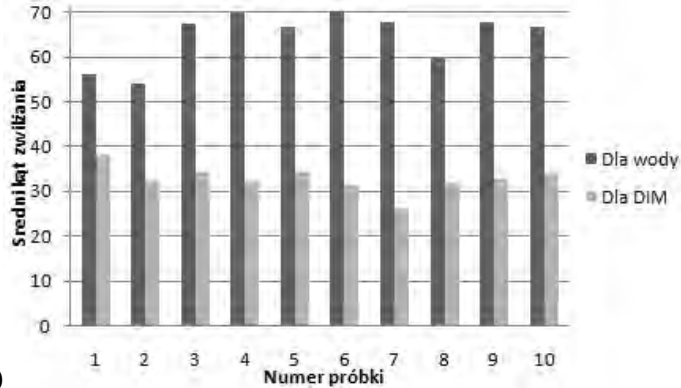


Rys. 2. Po lewej - pomiar kąta zwilżania z geometrii kropli, po prawej – widok naniesionej kropli cieczy pomiarowej

Wartość swobodnej energii powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych określa się w sposób pośredni wykorzystując pomiar kątów zwilżania wybranymi cieczami pomiarowymi. Do pomiaru kąta zwilżania jako cieczy pomiarowych użyto wody destylowanej i diiodometanu (DIM). Do obserwacji kropli i pomiaru kąta zwilżania stosowano mikroskop stereoskopowy wraz z kamerą oraz oprogramowanie MicroScan v 1.3.

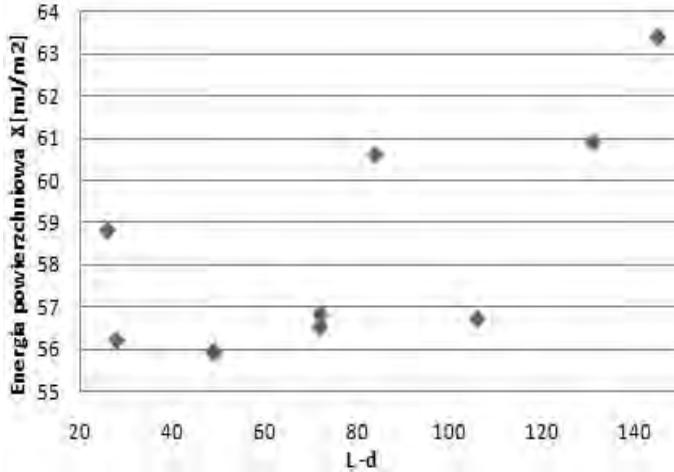
Stosowaną metodą do wyznaczania swobodnej energii powierzchniowej jest metoda Owensa – Wendta, [1, 2, 4] w której przyjęto że swobodna energia powierzchniowa jest sumą dwóch składowych: dyspersyjnej i polarnej. Odpowiednie wzory na energię dyspersyjną i polarną znajdują się w cytowanej literaturze [3, 4].

a)



a)

b)



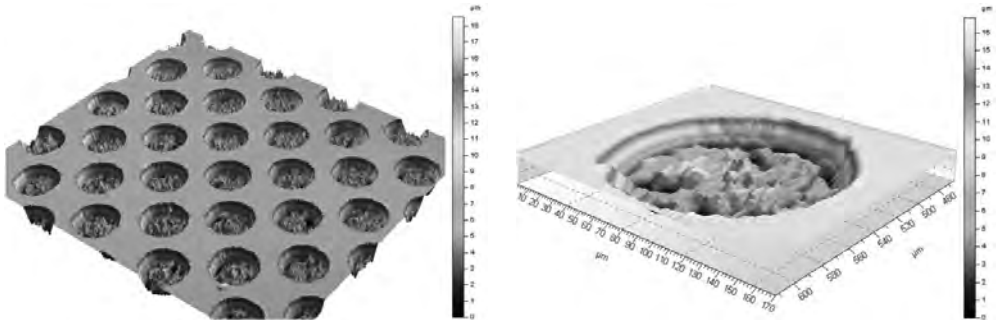
Rys. 3a. Wartości kątów zwilżania wodą i DIM dla próbek 1 do 10

Rys. 3b. Wartości swobodnej energii powierzchniowej w zależności od L-d

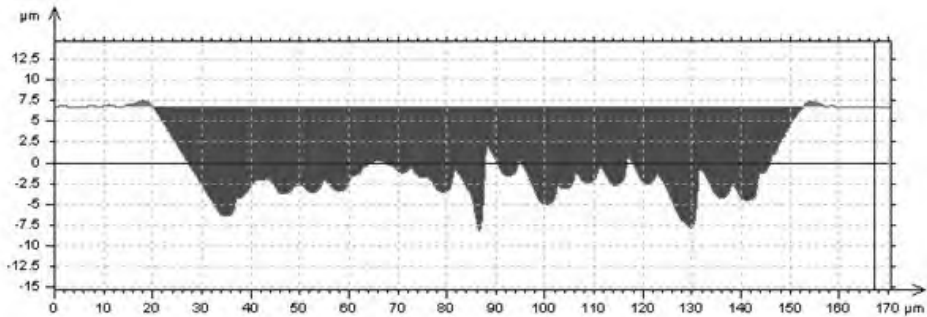
Pomiary geometrii powierzchni

Badania miały charakter rozpoznawczy. Ich celem była identyfikacja możliwości nowoczesnych skomputeryzowanych profilografów. Wszystkich pomiarów dokonano w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, za pomocą profilografu optycznego Talysurf CCI - Lite Non-contact 3D Profiler z obiektywem 50mm oraz profilografu stykowego Form Talysurf PGI 1230. Pomiar metodą AFM za pomocą mikroskopu sił atomowych był niemożliwy z powodu zbyt dużej wielkości bada-

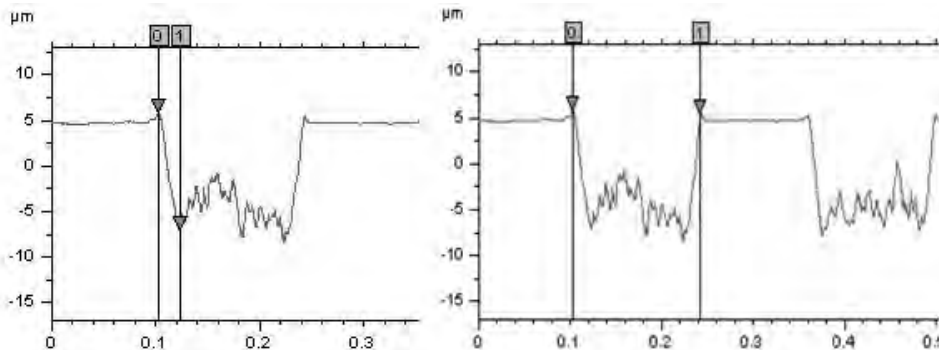
nej próbki oraz zbyt dużej chropowatości powierzchni wewnątrz pojedynczego mikroporu. Na rys. 4, rys. 5 oraz rys. 6 przedstawiono wybrane wyniki pomiarów.



Rys. 4. a) widok powierzchni badanej, b) widok 3D pojedynczego mikrowgłębienia; próbki uzyskany za pomocą profilografu stykowego Form Talysurf PGI 1230



Rys. 5. Profil pojedynczego mikrowgłębienia uzyskany za pomocą profilografu stykowego Form Talysurf PGI 1230. Maksymalna głębokość mikrowgłębienia $14,9143\mu\text{m}$, maksymalna wysokość wypłytki $0,7297\mu\text{m}$, objętość mikrowgłębienia $122376,6\mu\text{m}^3$, objętość wypłytki $508,146\mu\text{m}^3$.



Rys. 6. Profil pojedynczego mikrowgłębienia uzyskany za pomocą profilografu stykowego Form Talysurf PGI 1230. Średnica mikrowgłębienia $140,001\mu\text{m}$, kąt nachylenia zbocza mikrowgłębienia $31,6116^\circ$.

PODSUMOWANIE

Analizowane metody pomiaru przy zastosowaniu profilometrów stykowego oraz optycznego wykazały przydatność do pomiaru parametrów tekstury

Stosując w/w urządzenia można mierzyć średnicę i głębokość mikrowgłębień, odległość pomiędzy wgłębieniami a także kąt nachylenia ściany wgłębienia, chropowatość dna wgłębienia, wysokość wypływki, stosunek objętości wypływki do objętości mikrowgłębienia.

Uzyskane tą drogą wyniki mogą być wykorzystane do optymalizacji geometrii tekstury.

Wraz ze zmianą parametrów tekstury następuje zmiana wartości kątów zwilżania powierzchni i powierzchniowej energii swobodnej

Wartości kątów zwilżania przy zwilżaniu DIM są mniejsze niż przy zwilżaniu wodą, przy czym niepewności pomiarowe dla pomiarów zwilżania wodą mają zdecydowanie wyższą wartość.

Badając korelacje pomiędzy parametrami tekstury a właściwościami adhezyjnymi powierzchni stwierdzono, że najbardziej istotny wpływ na wartość swobodnej energii powierzchniowej ma parametr $L-d$ stanowiący wzajemną odległość krawędzi mikrowgłębień. Wraz ze wzrostem tej odległości wartość energii powierzchniowej maleje.

PIŚMIENNICTWO

1. Rudawska A., Jacniacka E.: Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen-Wendt method. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 29 (2009) 451-457.
2. Rudawska A., Kuczmaszewski J.: Surface free energy of zinc coating after finishing treatment. *Material Science*, Vol 24, No. 4 (2006).
3. Kłonica M., Kuczmaszewski J.: Analiza energetyczna warstwy wierzchniej po ozonowaniu materiałów konstrukcyjnych stosowanych w przemyśle lotniczym - Inżynieria powierzchni – wybrane zagadnienia pod redakcją B. Antoszewskiego – Wydawnictwo PŚk, Kielce 2011 (171-179).
4. Żenkiewicz M.: Porównawcza ocena niektórych metod obliczania swobodnej energii powierzchniowej aktywowanej folii polietylenowej. *Polimery* 33 (1988) 328-331.
5. Kovalchenko A., Ajayi A., Erdemir A., Fenske G., Etison I., 2005 The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact” *Tribology International* 38 (2005) 219-225.
6. Manabu Wakuda, Yukihiko Yamauchi, Shuzo Kanazaki, Yoshiteru Yasuda, 2003 Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact – *Wear*, 254, (2003), 356-363.
7. X.Q Yu., S.He., R.L.Cai., 2002 Frictional characteristics of mechanical seals with a laser textured seal face” - *Journal of Materials Processing Technology* 129 (2002), 463-466.

TEXTURING SURFACE – TOPOGRAPHY AND SURFACE ENERGY

Summary

In modern machines for realization of goals like lubrication intensification, heat flow intensification, microflow stimulation; more and more often surface texturing is used. It became possible due to development of technologies that use concentrated energy stream like microlasers. The article concentrates on identification of topographic parameters of surfaces using the most modern profilometers also attempts to find a correlation between surface energy and topography of surface with geometrical texture.

Keywords: surface energy, surface texturing, microlasers.

Krzysztof Mrozek, Andrzej Gessner ¹⁾

OPTIMALIZACJA NADDATKÓW OBRÓBKOWYCH WIELKOGABARYTOWYCH ODLEWÓW ŻELIWNYCH

Streszczenie: W artykule przedstawiono problematykę optymalizacji naddatków obróbkowych wielkogabarytowych odlewów żeliwnych. Jako kryterium optymalizacyjne przyjęto minimalizację objętości zebranego materiału. Na wielkość skrawanych naddatków ma wpływ przede wszystkim: wartość przyjętych naddatków odlewniczych, dokładność wykonania odlewu oraz proces technologiczny obróbki, w którym najważniejszym elementem jest odpowiedni dobór pomocniczej i zasadniczej bazy obróbkowej. W zależności od odlewni i sposobu wykonania odlewy mogą różnić się między sobą w znacznym stopniu. Powoduje to, że w przypadku zmiany dostawcy lub nawet podczas kolejnej partii odlewów z tego samego źródła może istnieć konieczność opracowania nowej dokumentacji technologicznej. Zmniejszenie ilości wiórów niesie ze sobą przede wszystkim mniejsze zużycie energii, ograniczenie pracochłonności obróbki oraz redukcję zużycia narzędzi, co bezpośrednio przekłada się na niższy koszt wytworzenia. W opracowaniu przedstawiono wyniki symulacyjnych badań optymalizacyjnych naddatków obróbkowych trzech odlewów wielkogabarytowych o różnym stopniu skomplikowania. Posłużono się w nich parametryzacją i wzajemnymi powiązaniem geometrycznymi naddatków obróbkowych, które podzielono na trzy grupy kierunkowe (zgodne z osiami kartezjańskiego układu współrzędnych). Analiza miała za zadanie pokazać różnice objętościowe zebranego materiału między istniejącym procesem technologicznym części oraz procesem zoptymalizowanym.

Słowa kluczowe: naddatek obróbkowy, odlewy żeliwne, optymalizacja.

WSTĘP

Współcześnie produkowane obrabiarki oparte są głównie na korpusach żeliwnych, polimerobetonowych oraz stalowych spawanych [5]. Te ostatnie charakteryzują się znacznie mniejszą masą przy zachowaniu tej samej sztywności w porównaniu z innymi rozwiązaniami, co wynika z wysokiego modułu sprężystości stali (ok. 210GPa). Ich wadą jest stosunkowo duża pracochłonność wykonania oraz mała wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia. Największą zdolność do tłumienia drgań wykazują konstrukcje polimerobetonowe, których logarytmiczny dekrement tłumienia jest około 10-krotnie większy niż dla żeliwa szarego [1]. Odlewy polimerobetonowe charakteryzują się także wysoką stabilnością cieplną (4 do 5 razy większa stabilność cieplna niż żeliwo), jednakże z uwagi na

¹⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn.

ich ograniczenia obróbkowe w trakcie wykonywania odlewu muszą być one formowane na gotowo.

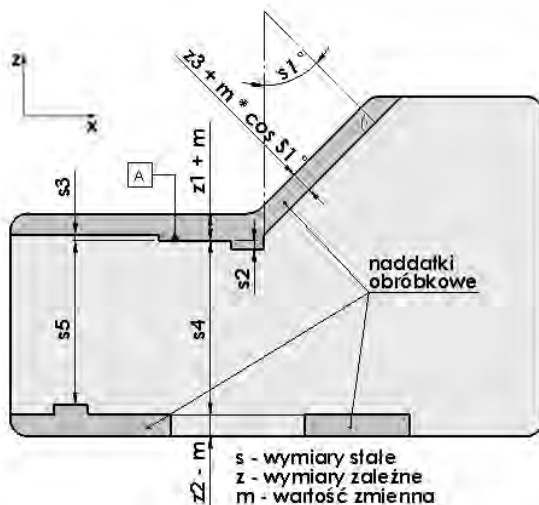
Ze względów ekonomicznych najczęściej stosowaną grupą korpusów są odlewy żeliwne [2]. Przy stosunkowo niskim koszcie produkcji posiadają one szereg zalet:

- dobra skrawalność, co pozwala na wprowadzanie zmian technologicznych już po wykonaniu odlewu,
- wysoka wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia, co przekłada się na dobre własności dyssypatywne korpusu,
- możliwość uzyskania skomplikowanych kształtów.

Odlewy wielkogabarytowe wykonywane są w formach piaskowych i wymagają wprowadzenia naddatków, których wartość zależy od technologii wykonawcy. Projektowanie technologii korpusów odlewanych jest trudnym i wymagającym dużego doświadczenia zagadnieniem [4]. Przedstawione w niniejszym opracowaniu modele często wymagają stosowania dużej liczby rdzeni i zaprojektowania skomplikowanej formy, zatem większe wartości naddatków odlewniczych dają większe prawdopodobieństwo wykonania poprawnego korpusu jednakże zwiększają przy tym pracochłonność obróbki oraz zużycie narzędzi.

KRYTERIUM OPTIMALIZACJI

W pracy podjęto problematykę optymalizacji naddatków obróbkowych wielkogabarytowych odlewów żeliwnych. Celem optymalizacji jest zmniejszenie objętości warstwy skrawanej, a co za tym idzie ograniczenie pracochłonności obróbki, ograniczenie wykorzystania energii oraz redukcję zużycia narzędzi. Przekłada się to bezpośrednio na spadek kosztów wytworzenia gotowego korpusu [3].



Rys. 1. Przekrój odlewu z oznaczeniem bazy i naddatków obróbkowych oraz niektórych wymiarów

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy przekrój odlewu z oznaczonymi ciemniejszym kolorem naddatkami obróbkowymi. W opracowaniu skupiono się na trzech odlewach wielkogabarytowych o różnym stopniu skomplikowania. Ich naddatki podzielono na trzy grupy kierunkowe (zgodne z osiami kartezjańskiego układu współrzędnych), sparametryzowano oraz wzajemnie powiązano geometrycznie. Wraz ze zmianą parametru m zmienia się położenie bazy obróbkowej. Przekłada się to na powierzchnie przekrojów tych naddatków, a więc również na ich objętość i masę. Przykład ten pokazuje jak ważny jest odpowiedni dobór baz. Na wartość naddatków obróbkowych ma również wpływ wielkość naddatków odlewniczych oraz dokładność i przyjęta technologia wykonania odlewu.

METODY OPTIMALIZACYJNE

W celu minimalizacji naddatków obróbkowych wykorzystano metodę przeszukiwania lokalnego. Jest to jeden z najczęściej stosowanych sposobów optymalizacji polegający na analizie całego otoczenia bieżącego rozwiązania oraz zastąpieniu go rozwiązaniem osiągalnie najlepszym [6] (w tym przypadku rozwiązaniem najlepszym jest minimalna objętość naddatków obróbkowych), gdzie jako sąsiedztwo N rozwiązania x rozumie się:

$$N(V_1) = \{V_2 \in S : \text{dist}(V_1, V_2) \leq \varepsilon\}, \varepsilon = f(m) \quad (1)$$

gdzie:

V_1 – rozwiązanie bieżące (objętość wyjściowa),

V_2 – rozwiązanie sąsiednie (objętość sąsiednia),

S – zbiór wszystkich rozwiązań,

N – sąsiedztwo,

ε – różnica rozwiązań,

zaś każde rozwiązanie $V_2 \in N(V_1)$ jest rozwiązaniem sąsiednim.

Nowe rozwiązanie generowane jest za pomocą funkcji sąsiedztwa poprzez wprowadzenie losowej zmiany w istniejącym rozwiązaniu:

$$V_2 = P_1 \cdot (B + \text{rand} \cdot m), V_1 = P_1 \cdot B \quad (2)$$

gdzie:

rand – wartość losowa z przedziału (0;1),

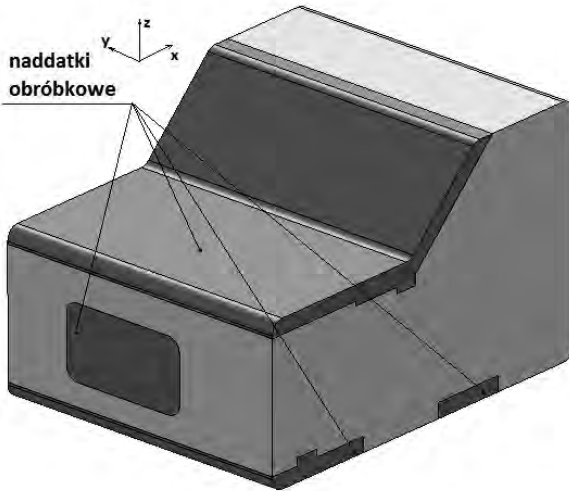
m – parametr,

P_1 – pole powierzchni,

B – wymiar naddatku.

Mając określony zbiór wszystkich możliwych objętości naddatków obróbkowych dokonujemy wyboru rozwiązania optymalnego dla rozpatrywanego kierunku.

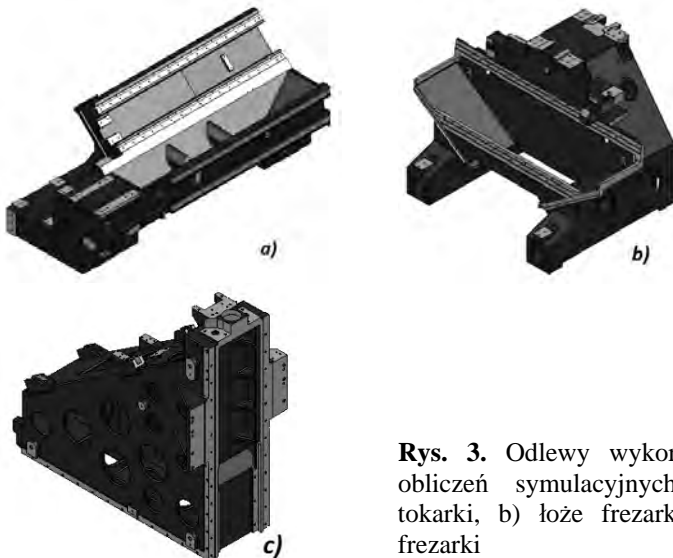
Całkowita objętość naddatków obróbkowych przedstawia się jako suma objętości naddatków zbieranych w trzech osiach zgodnych z osiami kartezjańskiego układu współrzędnych (rys. 2).



Rys. 2. Przekrój odlewu z oznaczonymi naddatkami obróbkowymi

PRZEBIEG OPTIMALIZACJI GRUPY ODLEWÓW WIELKOGABARYTOWYCH O RÓŻNYM STOPNIU SKOMPLIKOWANIA

W zakresie opracowania przeprowadzono symulacyjne badania optymalizacyjne dla trzech modeli teoretycznych odlewów wielkogabarytowych stosowanych w obrabiarkach CNC (rys. 3), które to opracowano na podstawie rysunków konstrukcyjnych. Doбору analizowanych odlewów dokonano w taki sposób, aby różniły się one stopniem skomplikowania oraz masą, co pozwoliło na uzyskanie bardziej uniwersalnych wyników oraz oszacowanie możliwości optymalizacyjnych dla odlewów o masie z przedziału od 350 do 1700 kg.



Rys. 3. Odlewy wykorzystane do obliczeń symulacyjnych: a) łożo tokarki, b) łożo frezarki, c) sanie frezarki

Tabela 1. Obliczenia optymalizacyjne naddatków obróbkowych łoża tokarki w kierunku osi y dla parametru $m = 0$

Kierunek	Nr powierzchni	Powierzchnia [mm ²]	Naddatek (norm.) [mm]	Objętość [mm ³]	Masa [kg]
y	21	15652	5 + m	78260	0,563472
m = 0	22	20637	6 + m	123822	0,8915184
	23	22437	5 + m	112185	0,807732
	24	15652	5 + m	78260	0,563472
	25	62133	5 – m	310665	2,236788
	26	9426	5 – m	47130	0,339336
	27	9543	5 – m	47715	0,343548
	28	36155	6 – m	216930	1,561896
	29	40575	5 – m	202875	1,4607
	30	3995	5 – m	19975	0,14382
	31	5254	6 – m	31524	0,2269728
	32	180204	5 – m	901020	6,487344
	33	149606	14 – m	2094484	15,0802848
	34	56455	26 – m	1467830	10,568376
	35	10740	24 – m	257760	1,855872
	36	19865	5 – m	99325	0,71514
Suma:		658329		6089760	43,846272

Dla każdego modelu wykonano pomiar powierzchni obrabianych w kierunkach zgodnych z kierunkami osi kartezjańskiego układu współrzędnych oraz pomnożono je przez wartości normatywnych naddatków obróbkowych w wyniku czego otrzymano ich objętość. W przypadku powierzchni nieprostokątnych uwzględniono ich pochylenie katowe. Następnie naddatki obróbkowe zmodyfikowano o losową wartość parametru m (rys. 1) zawierającą się w ustalonym wcześniej przedziale.

Dla każdego kierunku parametr ten wyznaczany był indywidualnie. Czynność tą powtarzano w celu znalezienia możliwie najniższej objętości usuwanego materiału. Do obliczeń wykorzystano arkusz kalkulacyjny Microsoft Excel (przykładowe obliczenia dla odlewu łoża tokarki przedstawiono w tabeli 1).

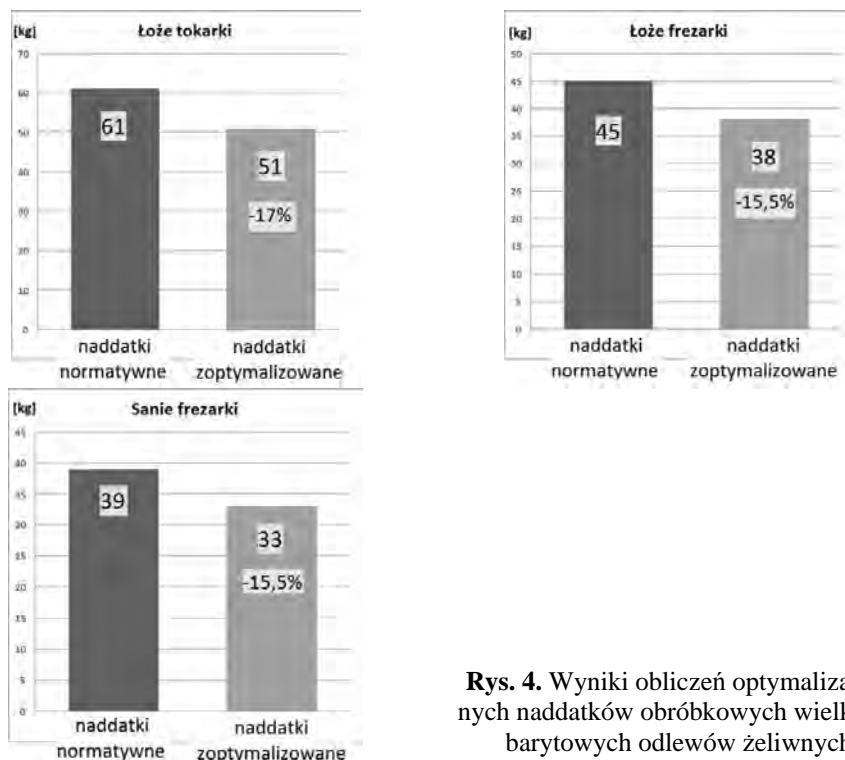
Tabela 2. Obliczenia optymalizacyjne naddatków obróbkowych sań osi Z w kierunku osi y dla parametru $m = 2$

Kierunek	Nr powierzchni	Powierzchnia [mm ²]	Naddatek (norm.) [mm]	Objętość [mm ³]	Masa [kg]	
y	21	15652	5 + m	109564	0,7888608	
m = 2	22	20637	6 + m	165096	1,1886912	
	23	22437	5 + m	157059	1,1308248	
	24	15652	5 + m	109564	0,7888608	
	25	62133	5 - m	186399	1,3420728	
	26	9426	5 - m	28278	0,2036016	
	27	9543	5 - m	28629	0,2061288	
	28	36155	6 - m	144620	1,041264	
	29	40575	5 - m	121725	0,87642	
	30	3995	5 - m	11985	0,086292	
	31	5254	6 - m	21016	0,1513152	
	32	180204	5 - m	646173,06	4,652446026	
	33	149606	14 - m	1882909,2	13,55694599	
	34	56455	26 - m	1387990,6	9,993532128	
	35	10740	24 - m	242571,35	1,746513694	
	36	19865	5 - m	71231,648	0,512867863	
	Suma:		658329		5314810,8	38,2666377

ZESTAWIENIE WYNIKÓW OPTIMALIZACJI NADDATKÓW OBRÓBKOWYCH

W tablicy 1 i 2 przedstawiono porównanie obliczeń oraz wyników optymalizacji naddatków obróbkowych łoża tokarki w kierunku osi y odpowiednio dla parametrów $m=0$ oraz $m=2$. Uzyskano wyraźną różnicę masy naddatków (ponad 5,5kg), dzięki przesunięciu bazy obróbkowej w kierunku osi y o wartość -2mm.

Wyniki obliczeń optymalizacyjnych sumarycznych dla wszystkich osi przedstawiono za pomocą wykresów (rys. 4). Na ich podstawie wywnioskować można, iż modyfikacje optymalizacyjne dla rozważanych modeli odlewów przyniosły skutek pozytywny.



Rys. 4. Wyniki obliczeń optymalizacyjnych naddatków obróbkowych wielkogabarytowych odlewów żeliwnych

Redukcja objętości naddatków obróbkowych wyniosła odpowiednio od 15,5% do 17%, co bezpośrednio przełoży się na ograniczenie pracochłonności oraz zużycia narzędzi i energii. Niniejsze opracowanie pokazuje, że zagadnienie optymalizacji naddatków obróbkowych jest wartym podjęcia kolejnych badań i weryfikacji praktycznej.

REFERENCES

1. Cortes F., Castillo G.: Comparison between the dynamical properties of polymer concrete and grey cast iron for machine tool applications. "Materials and Design" 2007, Vol. 28, p. 1461-1466.
2. Matusiak-Szafraniec A.: Analiza konstrukcyjna i technologiczna korpusów maszyn i urządzeń technicznych. „Archives of Mechanical Technology and Automation” 2007, Vol. 27, p. 121-129.
3. Żywicki K., Pająk E.: Analiza kosztów obróbki z wykorzystaniem sieci CPM. „Archives of Mechanical Technology and Automation”, 2004, Vol. 24, p. 233-242.
4. Feld M.: Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn. Warszawa, WNT, 2000.
5. Honczarenko J.: Obrabiarki sterowane numerycznie. Warszawa, WNT, 2008.

7. Michalewicz Z., Fogel D. B.: How to solve it: Modern Metaheuristics, Berlin, Springer Verlag, 2000.

OPTIMIZATION OF MACHINING ALLOWANCES OF LARGE-SIZE IRON CASTINGS

Summary

The article presents problems of machining allowances optimization of large-size iron castings. As the optimization criterion chips volume is admitted. There are a few factors that influence the chips volume: casting accuracy, casting allowances and manufacturing process in which machining datum surface and allowances selection are the most important. Castings may be different in a certain extent and that's conditioned by foundry technology and there is necessity to improve documentation of production technology when supplier changes. Mass reduction of chips results in lower energy consumption, labor consumption and lowering of tools wear most of all. The effect is lowering the production cost directly. In the study the simulation research results of machining allowances optimization of three large-size castings of different complexity are presented. In simulations parameterization and geometrical mutual connections of machining allowances were used. The machining allowances were divided in three directional groups (cartesian co-ordinate system compatible). The analysis was to show the differences of the chips volume between existing and optimal technological process.

Keywords: machining allowances, iron casting, optimization.

Łukasz Czerech, Andrzej Werner ¹⁾

KOREKCJA ODCHYLEK OBRÓBKOWYCH PROFILI KRZYWOLINIOWYCH WYTWARZANYCH NA FREZARKACH CNC

Streszczenie: Wytwarzanie elementów na obrabiarkach sterowanych numerycznie jest techniką bardzo prężnie rozwijającą się i wykorzystywaną do produkcji różnych komponentów w wielu gałęziach przemysłu. Produkowane współcześnie obrabiarki charakteryzują się konstrukcją umożliwiającą uzyskanie wysokiej dokładności geometrycznej maszyny. Niestety najlepiej skonstruowana i wykonana obrabiarka z powodu zmiennego środowiska pracy lub zużycia elementów współpracujących, często nie jest w stanie stać czoła wysokim wymaganiom dokładnościowym produkowanych elementów. W artykule zaprezentowana została metodyka *off-line* korekcji błędów obróbkowych. Opracowana metoda korekcji pozwala na wykonanie komponentów z większą dokładnością niż w przypadku tradycyjnego podejścia.

Słowa kluczowe: korekcja odchyłek, profil krzywoliniowy, CNC, CMM.

WSTĘP

Obróbka skrawaniem elementów na obrabiarkach sterowanych numerycznie jest jedną z najczęściej stosowanych technik wytwarzania we współczesnych procesach produkcyjnych. Spowodowane jest to wyraźną tendencją do skracania czasów obróbki, możliwością wyeliminowania innych bardziej kosztownych i czasochłonnych operacji technologicznych, możliwością zwiększenia różnorodności produkowanych wyrobów oraz coraz bardziej znaczącą rolą elastycznego wytwarzania. W takich przypadkach skrawanie z pełnego materiału może okazać się bardziej opłacalne niż przygotowywanie półproduktów z użyciem kosztownych matryc, form czy kokili. W wielu przypadkach dzięki super wydajnym narzędziom z naniesionymi powłokami o zwiększonej odporności na ścieranie, obróbka wiórowa może zastąpić kosztowne i czasochłonne drążenie elektroerozyjne [14].

Wszystkie elementy wytwarzane na obrabiarkach sterowanych komputerowo są obciążone błędami obróbkowymi, które można podzielić na trzy grupy. Pierwszą największą grupę stanowią błędy geometryczne. Są one traktowane jako błędy obrabiarki, które występują nawet bez obciążenia termicznego i pochodzą w głównej mierze z niedoskonałości wykonania, niewystarczającej sztywności lub zużycia obrabiarki. Powiększają się one drastycznie wraz ze wzrostem zużycia obrabiarki. Okafor i Ertekin w swej pracy [5] dokładnie opisują przyczyny po-

¹ Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Zakład Inżynierii Produkcji.

wstawania tego rodzaju błędów. Drugą równie istotną grupę tworzą odchyłki wynikające z zakłóceń termicznych, które można podzielić na lokalne i wynikające ze środowiska pracy danej maszyny. Te pierwsze mogą pochodzić z tarcia powstającego w wyniku przemieszczeń współpracujących elementów, serwonapędów napędzających osie, innych przekładni oraz z samego procesu skrawania. Źródłami ciepła mogą być również: silniki, łożyska, systemy hydrauliczne, temperatura otoczenia, itp. Z tą grupą błędów najtrudniej jest sobie poradzić, ponieważ są one trudne do przewidzenia i oszacowania [13]. Odkształcenia cieplne odwzorowują się na przedmiocie obrabianym w postaci błędów wymiarowych i błędów kształtu. Temat oszacowania i korekcji odchyłek termicznych opisano szerzej w pracach [3, 7]. Kolejnym bardzo istotnym źródłem błędów jest sam proces obróbki i towarzyszące mu zjawiska. W głównej mierze są to siły działające na obrabiarkę i obrabiany przedmiot, które w dużym stopniu zależne są od ciężaru elementów roboczych maszyny i przedmiotu obrabianego, sił skrawania oraz siły bezwładności. Problem ten został dokładnie opracowany w pracy Raksiria i Parnichkuna [6].

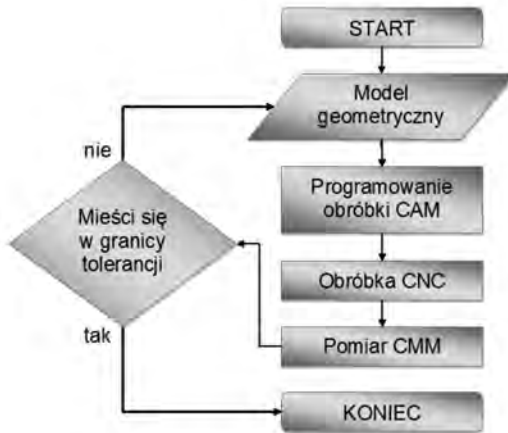
Tak duża ilość występujących błędów obróbkowych spowodowała rozwój badań mających na celu eliminację części składowych błędów i otrzymanie przedmiotu o wysokiej dokładności geometrycznej. Rezultatem tych badań było opracowanie dwóch metod korekcji błędów obróbki przedmiotów na obrabiarkach sterowanych numerycznie. Pierwsza z nich metoda *off-line* polega na pośredniej korekcji programu obróbkowego [8]. Druga metoda kompensacji błędów obróbkowych to metoda *on-line*, charakteryzująca się bezpośrednim przeprowadzeniem korekcji w trakcie trwania obróbki przedmiotu [8, 12].

METODYKA KOREKCJI ODCHYLEK OBRÓBKOWYCH

Proponowana w artykule metodyka korekcji zaobserwowanych odchyłek obróbkowych jest metodyką *off-line*. Bazuje ona na modyfikacji nominalnego modelu geometrycznego CAD wytwarzanego obiektu na podstawie przeprowadzonych współrzędnościowych pomiarów kontrolnych (rys. 1).

W metodyce tej nominalny model geometryczny wytwarzanego obiektu wykorzystywany jest w pierwszej kolejności do utworzenia programu obróbkowego części w systemie CAM. W następnym kroku obiekt wytwarzany jest na frezarskim centrum obróbkowym. Po jego wytworzeniu przeprowadzane są pomiary kontrolne na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Wyniki pomiarów dostarczają informacji o wartościach i rozkładzie zaobserwowanych odchyłek obróbkowych. Na podstawie tych informacji osoba realizująca proces wytwórczy części podejmuje dalsze decyzje. Jeżeli wartości odchyłek zaobserwowanych mieszczą się w przyjętej tolerancji proces jest zakończony. Jeżeli dokładność wytworzenia obiektu nie jest zadawalająca przystępuje się do korekcji błędów obróbki. W pierwszym kroku modyfikuje się model geometryczny obiektu. Wykorzystuje się w tym celu informacje o odchyłkach zaobserwo-

wanych zawartych w wynikach pomiarów współrzędnościowych. W kolejnym kroku na bazie zmodyfikowanego modelu geometrycznego tworzony jest skorygowany program obróbkowy i przeprowadzana jest powtórna obróbka przedmiotu. W dalszej kolejności powtarza się pomiary współrzędnościowe wytworzonego obiektu. Jeżeli odchyłki zaobserwowane w dalszym ciągu są zbyt duże całą procedurę można powtórzyć ponownie lub należy zweryfikować czy dana obrabiarka i środowisko pracy umożliwia uzyskanie pożądanej dokładności.

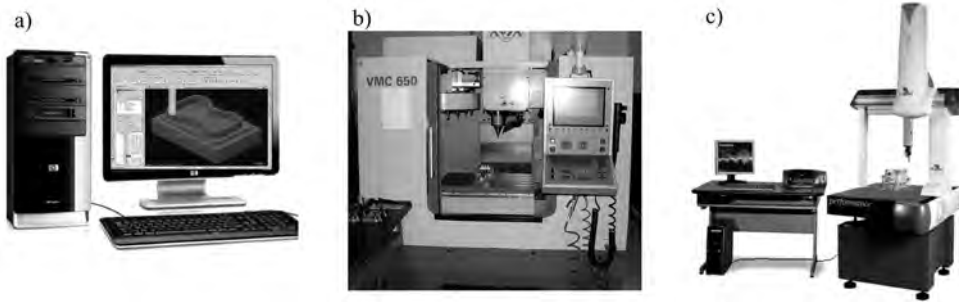


Rys. 1. Algorytm korekcji odchyłek obróbkowych.
Fig. 1. Algorithm of machining deviations correction.

Stanowisko badawcze

Do przeprowadzenia badania skuteczności metody kompensacji odchyłek obróbkowych wykorzystano stanowisko badawcze w skład, którego wchodziły:

- komputer klasy PC (rys. 2a), wyposażony w aplikację CAD/CAM wykorzystywaną do tworzenia modeli geometrycznych obiektów oraz tworzenia programów obróbkowych (w badaniach wykorzystano system MasterCAM X4 MU3);
- pionowe centrum obróbkowe (rys. 2b) sterowane numerycznie firmy AVIA VMC650 ze sterowaniem Heidenhain iTNC530 (dokładność i powtarzalność pozycjonowania zadeklarowana przez producenta to $\pm 0,005\text{mm}$). Obrabiarka ta jest wykorzystywana do produkcji wykrojników, krępowników, form wtryskowych oraz dodatkowego osprzętu do wyżej wspomnianych narzędzi w zakładzie produkującym precyzyjne narzędzia. Jej łączny czas wykonywania programów technologicznych na fabrycznych podzespołach w trakcie przeprowadzania badania to 9000h, a łączny czas pracy obrabiarki to 17200h;
- współrzędnościowa maszyna pomiarowa Global Performance 07 07 05 (rys. 2c). Jest ona sprzężona z komputerem klasy PC, który za pomocą oprogramowania PC-DIMS zainstalowanego na platformie MS Windows XP PRO x84 steruje pracą CMM.



Rys. 2. Stanowisko badawcze: a) komputer z oprogramowaniem CAD/CAM, b) frezarskie centrum obróbkowe, c) współrzędnościowa maszyna pomiarowa.

Fig. 2. The test stand: a) PC computer with CAD/CAM software, b) CNC milling centre, c) CMM.

Realizacja procesu korekcji odchyłek obróbkowych

W pierwszej kolejności utworzono model obiektu zawierający geometrie krzywoliniowe. Zamodelowanie elementu polegało na utworzeniu dwóch krzywych NURBS, a następnie wyciągnięciu ich na odległość 10mm za pomocą powierzchni prostokreśłych. Kolejną operacją było rozciągnięcie powierzchni czołowej pomiędzy krzywymi oraz dobudowanie prostokątnej części ułatwiającej bazowanie elementu na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Ostatnią operacją było zamodelowanie podstawy. Tak przygotowany model wykorzystano do programowania ścieżek narzędziowych. Następnym krokiem po zamodelowaniu elementu było dobranie gatunku materiału oraz rozmiarów przygotówki, narzędzi obróbkowych i środowiska pracy.

Narzędzie wykańczające wszystkie powierzchnie biorące udział w pomiarze i bazowaniu elementu wykonano trzostrzowym frezem toroidalnym o średnicy $\varnothing 8\text{mm}$ i promieniu zaokrąglenia naroża 0,5mm (Rys. 3). Tolerancja zaprogramowanej ścieżki obróbkowej wynosiła 0,015mm, w celu uzyskania lepszej jakości geometrycznej warstwy wierzchniej zastosowano filtrowanie łuków. Podczas obróbki oprócz filtrowania ścieżek w środowisku MasterCAM zastosowano optymalizację konturu w obrabiarce, które jest realizowane w sterowniku Heidenhain iTNC530 za pomocą cyklu 32 „Tolerancja”.

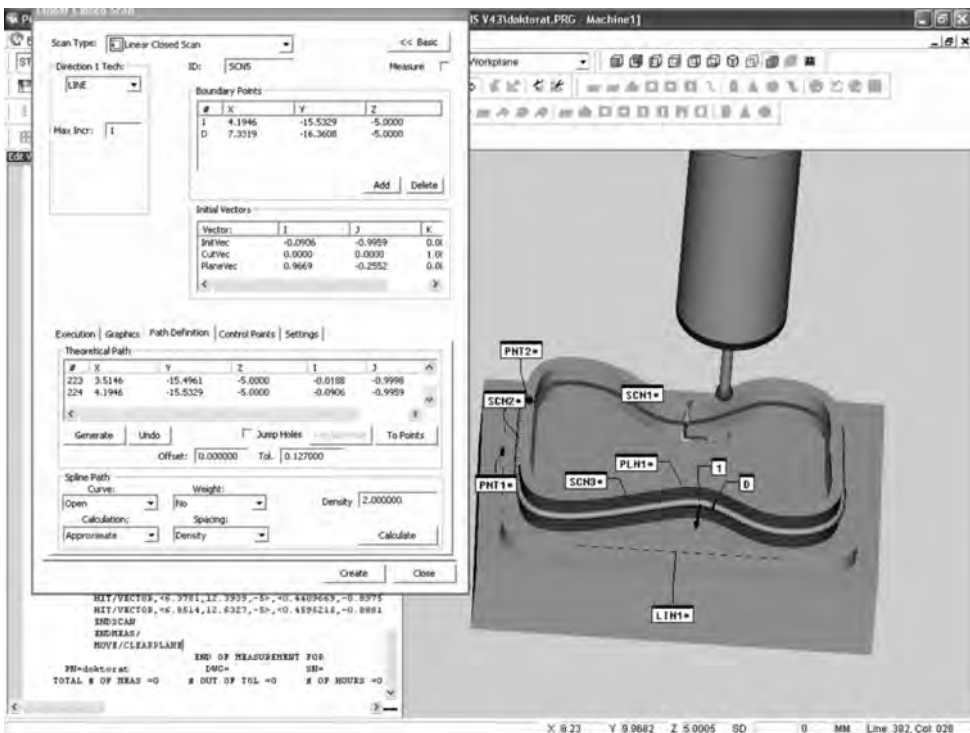
Kolejnym krokiem po obróbce CNC był pomiar wytworzonych elementów na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Ustalanie elementu na współrzędnościowej maszynie pomiarowej można podzielić na następujące operacje:

- określenie kąta pochylenia między płaszczyzną XY elementu obrobionego, a płaszczyzną XY maszyny,
- ustalenie początku układu współrzędnych zamocowanego elementu,
- określenie kąta zawartego między osią X maszyny i osią X elementu,
- ustalenie górnej granicznej powierzchni elementu,
- dokładne dopasowanie układu współrzędnych w trybie automatycznym.



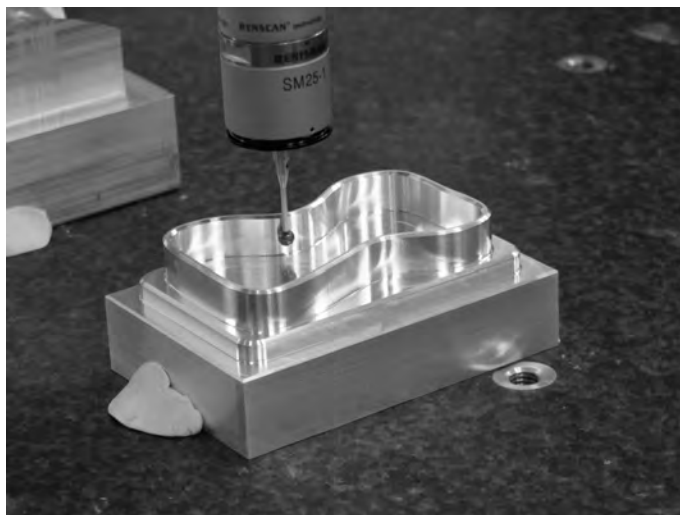
Rys. 3. Obróbka elementu na centrum obróbkowym
Fig. 3. Part machining on milling center

Pomiar przedmiotu wykonano w trybie skanowania „linear closed” (rys. 4). Jako optymalną ilość punktów wybrano 113 punktów dla konturu zewnętrznego i 106 dla konturu wewnętrznego. Uzyskano w ten sposób krok próbkowania równy 2mm.



Rys. 4. Okno skanowania „linear closed”
Fig. 4. “Linear closed” scan window

Wynikiem pomiaru elementów wstępnych był cyfrowy odpowiednik modelu geometrycznego obciążonego odchyłkami wykonania. Otrzymane dane zaimportowano do arkusza kalkulacyjnego, gdzie odseparowano odchyłki zaobserwowane od wartości nominalnych elementu. Gdy wartości odchyłek wykonania w poszczególnych punktach była już znana zmodyfikowano nominalny model geometryczny.



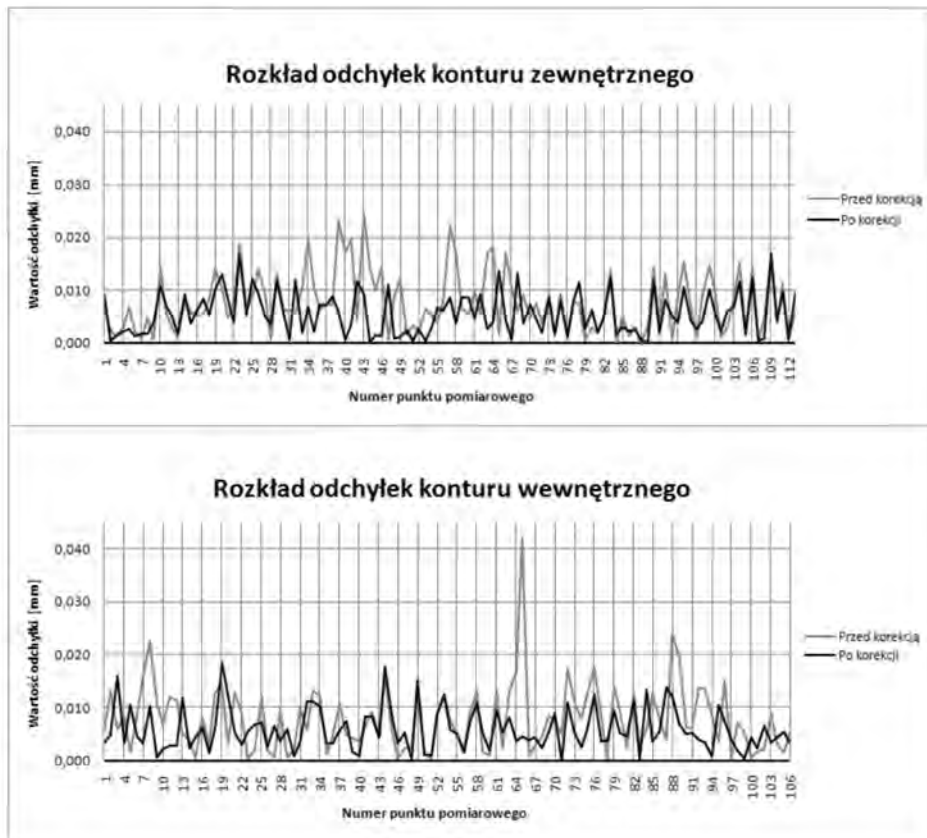
Rys. 5. Pomiar elementu na współrzędnościowej maszynie pomiarowej
Fig. 5. Part measurement on the coordinate measuring machine

Następną operacją jaką wykonano było wytworzenie elementu na bazie skorygowanego modelu geometrycznego. Proces obróbki na centrum obróbkowym sterowanym numerycznie został przeprowadzony z takimi samymi parametrami obróbkowymi i technologicznymi oraz w takim samym środowisku pracy. Po obróbce ponownie przeprowadzono pomiar na maszynie współrzędnościowej (rys. 5) z takimi samymi parametrami i według takiego samego algorytmu.

ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Rozkłady zaobserwowanych odchyłek obróbkowych przedstawione zostały na rys. 6. Jak widać na powyższych wykresach, największa wartość odchyłki dla konturu zewnętrznego przed korekcją to 0,0245mm, a dla konturu wewnętrznego 0,0421mm. Wartość średniej odchyłki przed korekcją dla konturu zewnętrznego wyniosła 0,0078mm, a dla wewnętrznego 0,0079mm. Natomiast po korekcji modelu geometrycznego wartości odchyłek zmalały dokładniej odwzorowując zamodelowany element i wyniosły: dla konturu zewnętrznego największa wartość odchyłki to 0,0171mm, a dla wewnętrznego konturu to 0,0185mm. W tabeli 1 dokonano zestawienia uzyskanych wyników. Wartość średniej odchyłki po ko-

rekcji dla konturu zewnętrznego wyniosła 0,0056mm, a dla wewnętrznego 0,0059mm.



Rys. 6. Bezwzględne wartości odchyłek przed i po korekcji modelu geometrycznego
Fig. 6. Absolute values of deviations before and after the correction of a geometric model

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów

Table 1. Results summary

	Przed korekcją		Po korekcji		Δ	
	Zew. [μm]	Wew. [μm]	Zew. [μm]	Wew. [μm]	Zew. [μm]	Wew. [μm]
Max	24,5	42,1	17,1	18,5	7,4	23,6
Śre	7,8	7,9	5,6	5,9	2,2	2,0

PODSUMOWANIE

Wyniki przedstawione w tabeli 1 wskazują, że wykorzystanie współrzędnościowej techniki pomiarowej pozwalana oszacowywać i zminimalizować odchyłki obróbkowe w modelach wykonanych na obrabiarkach sterowanych nu-

merycznie.

Metoda kompensacji odchyłek jest skutecznym narzędziem, które umożliwia wykonywanie elementów z wysoką precyzją. Pozwala ona zarówno na zminimalizowanie odchyłek dla konturów wewnętrznych (matryc), gdzie kąt opasania narzędzia materiałem obrabianym jest znacznie większy niż w przypadku konturów zewnętrznych (stempli). W przypadku produkcji wysoko precyzyjnych wykrojników metoda ta pozwoli na uzyskanie jednakowego luzu tnącego na całej długości wykrawanego konturu. Jest to bardzo istotne ze względów zarówno estetycznych jak i wymiarowych. W przypadku form do tworzywo sztucznych pozwoli to na dokładne dopasowanie kształtowych wstawek formujących do gniazd w których zostaną osadzone i pozwolą na szczelne zamknięcie przestrzeni wypełnianej przez tworzywo powierzchni.

Jak widać na zestawieniu wyników znacząco zniwelowane zostały maksymalne wartości odchyłek bo aż o 0,0236mm. Tak duża niedokładność mogła by powodować lokalne zatarcia na współpracujących powierzchniach lub uniemożliwiłoby dopasowanie do siebie dwóch współpracujących elementów. Metoda kompensacji odchyłek obróbkowych pozwoliła na szybkie i skuteczne skorygowanie różnic między modelem nominalnym, a wytworzonym za pomocą obróbki CNC.

PIŚMIENNICTWO

1. Chen J. S., Ling C. C.: Improving the machine accuracy through machine tool metrology and error correction. *Advanced manufacturing technology* 11, 1996, str. 198-205.
2. Lechniak Z., Werner A., Skalski K., Kędzior K.: Methodology of off-line software compensation for errors in the machining process on the CNC machine tool. *Journal of Materials Processing Technology* 76, 1998, str. 42–48.
3. Li S., Zhang Y., Zhang G.: A study of pre-compensation for thermal errors of NC machine tools. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 37, No. 12, 1997, str. 1715-1719.
4. Lo C.C., Hsiao C.Y.: A method of tool path compensation for repeated machining process, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 38, 1998, 205–213.
5. Okafor A.C., Ertekin M.: Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, 2000, str. 1199–1213.
6. Raksiri C., Parnichkun M.: Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44, 2004, str. 1283–1291.
7. Ramesh R., Mannan M. A., Poo A.N.: Error compensation in machine tools. Part II: Thermal errors. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, 2000, str. 1257–1284.
8. Ryu S.H., Chu C.N.: The form error reduction in side wall machining using successive down and up milling, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 45, 2005, 1523–1530.
9. Werner A., Poniatowska M.: Zastosowanie współrzędnościowej techniki pomiarowej i systemów CAD/CAM w wyznaczaniu błędów obróbki powierzchni o złożonych

- kształtach. Przegląd Mechaniczny 6, 2004, str. 30–33.
10. Werner A., Poniatowska M.: Determining errors in complex surfaces machining with the use of CNC machine tools. Komisja budowy maszyn PAN 26/2, 2006, str. 211–217.
 11. Yaldiz S., Unsacar F., Saglam H., Isik H.: Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque. Mechanical Systems and Signal Processing 21, 2007, str. 1499–1511.
 12. Yang M.Y., Choi J.G.: A tool deflection compensation system for end milling accuracy improvement, ASME J. Manuf. Sci. Eng. 120, 1998, 222–229.
 13. Yuan J., Ni J.: The real-time error compensation technique for CNC machining systems. Mechatronics 8, 1998, str. 359-380.
 14. Cichosz P.: Narzędzia skrawające. WNT, 2006.
 15. Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Politechnika Warszawska, 2005.
 16. Instrukcja obsługi oprogramowania PC-DIMS.

CORRECTION OF THE MACHINING DEVIATIONS OF THE CURVILINEAR PROFILES PRODUCED ON THE CNC MILLING MACHINES

Summary

The manufacture of components on numerically controlled machines is very rapidly developing technique and it is used for production of various components in many industrial sectors. Currently produced machine tools are characterized by construction that allow to achieve high geometrical accuracy. Unfortunately, best designed and constructed machine tool in addition to the variable work environment or wear of associated components, is unable to face the above-mentioned requirements. In this paper was presented off-line correction of machining errors methodology. The elaborated correction method allows to part manufacture with greater accuracy than in traditional approaches.

Keywords: deviations correction, curvilinear profile, CNC, CMM.

Damian Śmierchalski ¹⁾, Tomasz Danyluk ²⁾

WERYFIKACJA WYMIAROWA PIERWSZEJ WYPRASKI W SYSTEMIE SKANOWANIA 3D

Streszczenie: W pracy skupiono się na uzyskaniu pełnej informacji wymiarowej o wyprasce wtryskowej. Omówiono szczegółowo wpływ czynników zewnętrznych na dokładność pomiaru, wskazano również cechy wyrobu niekorzystnie z metrologicznego punktu widzenia. W dalszej części opisano zagadnienia modelowania, które pozwala skrócić czas opracowania narzędzi. Podsumowanie uzupełniono perspektywą rozwoju optycznych systemów skanowania 3D.

Słowa kluczowe: skanowanie, 3D, pomiar optyczny.

WSTĘP

Skanowanie przestrzenne jest metodą pomiarową, która służy do wymiarowania przedmiotów o złożonej geometrii, wymagających najczęściej długotrwałego procesu mierzenia innymi technikami. Najlepiej zalety systemów opartych na tej zasadzie uwypuklają obiekty o wielu powierzchniach swobodnych, których sprawdzenie klasycznymi technikami jest pracochłonne i wymaga wysoko wykwalifikowanej kadry inżynierów. Bezpośrednim wynikiem procesu skanowania jest chmura punktów opisująca powierzchnię przedmiotu, a na jej podstawie tworzy się figury geometryczne, których cechy opisują część [2].

Pozyskanie wymiarów poszczególnych elementów obiektu stanowi przykład najprostszego sposobu wykorzystania metody, bardziej złożonym jest pełna weryfikacja całej części i przełożenie wyniku na kształt narzędzia do późniejszego wykonania poprawionej wersji prototypu. Równie interesujące jest wirtualne złożenie kilku części ze spasowaniem otworów montażowych określeniem potencjalnych kolizji w gotowym zespole.

PODSTAWY SKANOWANIA PRZESTRZENNEGO

Skanowanie przestrzenne, w przeciwieństwie do skanowania dwuwymiarowego, nie polega na analizie światła odbitego, choć system pomiarowy składa się z projektora i kamery CCD. Światło białe, a w najnowszych rozwiązaniach niebieskie, emitowane jest w kierunku obiektu przez siatkę interferencyjną o budowie zapewniającej uzyskanie prążków mora (moiré). Taki referencyjny

¹ Politechnika Poznańska, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych Instytutu Technologii Mechanicznej.

² ITA – K. Pollak, M. Wieczorowski Sp.j.

układ prążków załamuje się na powierzchniach mierzonej części, a częściowo odbity trafia jako nowy układ do analizatora obrazu poprzez matrycę CCD. Aby proces przebiegał prawidłowo, natężenie prążków musi być dostosowane do wymogów przesunięcia fazowego, co wyraża się w zapisem [3]:

$$I_p(x, y) = I_0(x, y)[1 + \gamma(x, y) \cos(\phi(x, y) + \Delta)] \quad (1)$$

przy czym I_0 jest natężeniem średnim, $g(x, y)$ unormowaną widzialnością prążków, a D względną fazą, którą należy zmierzyć.

Aby możliwe było przejście od układu prążków do rzeczywistych wymiarów, należy wprowadzić wielkość $h(x, y)$, która opisuje wysokość obiektu:

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} (\phi_{1p} + 2m\pi) \quad (2)$$

gdzie f_{1p} natężenie dla pierwszego układu prążków i m kolejność prążków w pierwszej siatce.

Rozważając podwójny układ prążków można wyznaczyć złożoną długość fali λ_{12} i przesunięcie fazowe ϕ_{12} , z których wyznacza się kolejność prążków niezbędną do wyznaczenia wysokości przedmiotu:

$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3)$$

$$\phi_{12} = \frac{2\pi h}{\lambda_{12}} \quad (4)$$

$$m = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda_{12}}{\lambda_1} \phi_{12} - \phi_{1p} \right) \quad (5)$$

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\phi_{1p} + \left(\frac{\lambda_{12}}{\lambda_1} \phi_{12} - \phi_{1p} \right) \right) \quad (6)$$

Teoria jest złożona, ale sam pomiar dzięki technikom komputerowym jest bardzo prosty i nie wymaga od użytkownika świadomości praw rządzących zjawiskiem. Podczas trwającej kilka sekund projekcji prążków współczesny skaner, zwany też digitizerem, zapamiętuje położenie do 8 milionów punktów pomiarowych, a dokładność wyrażana jest w setnych częściach milimetra (minimalna odległość między dwoma punktami pomiarowymi w modelu ATOS III Triple Scan firmy GOM mbH wynosi 0,01mm). Ograniczeniem dla użytkowania tej techniki są powierzchnie refleksyjne, ale można dokonać pomiaru takich obiektów po uprzednim zmatowieniu (np. przy pomocy napyłanej, cienkiej warstwy proszku kredowego). Utrudnieniem jest także nierównomierne oświetlenie, choćby intensywne światło słoneczne, które zmienia obraz prążków, zmniejszając

dokładność pomiaru. W obu przypadkach światło niebieskie projektora (zamiast białego) daje wyraźną poprawę jakości skanowania.

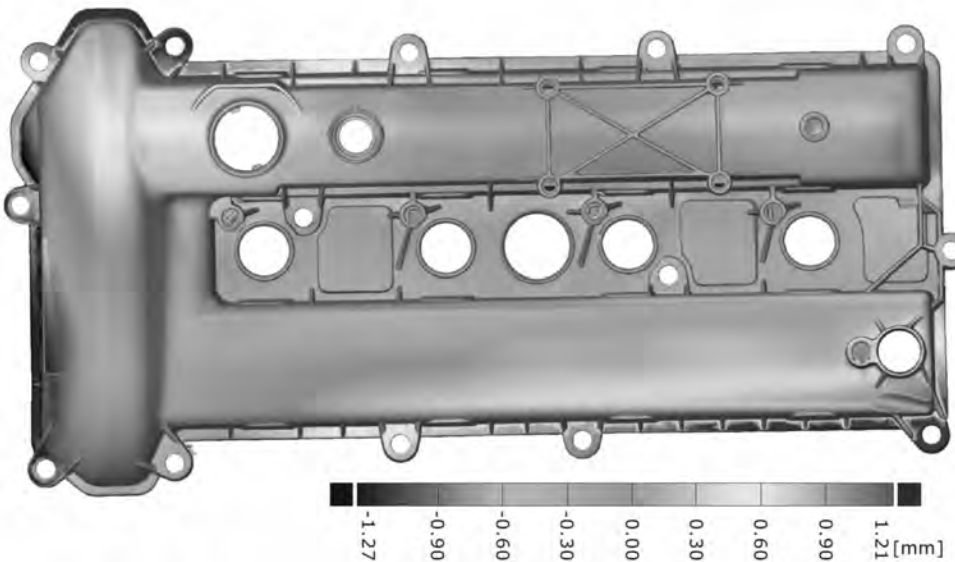
EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA WYMIAROWA

Do eksperymentu wykorzystano urządzenie ATOS II Triple Scan w następującej konfiguracji, przedstawionej w tabeli 1:

Tabela 1. Parametry systemu pomiarowego
Table 1. Digitizer parameters

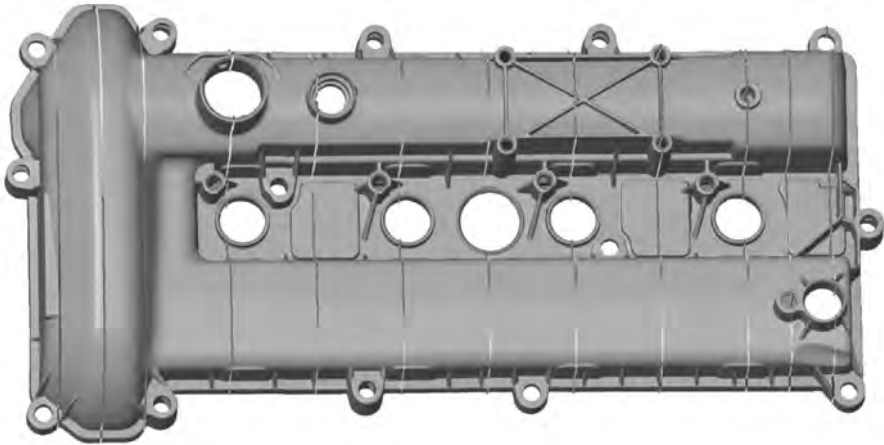
Parametr	Wartość
Rozdzielczość CCD	2 x 5 000 000
Pole pomiarowe	500 x 380 mm
Odległość punktów pomiarowych	0,02 – 0,62 ..
Liczba punktów pomiarowych	5 000 000

Wybór podyktowany możliwością wykonania pomiaru bez nanoszenia proszku kredowego dzięki połączeniu technologii niebieskiego projektora z złożonym skanowaniem parami kamer. Podczas pomiaru w pomieszczeniu panowała temperatura 22°C, dodatkowo zmniejszono wpływ oświetlenia zewnętrznego zasłonami na oknach. Nie odnotowano wpływu przemieszczenia obiektu względem układu kamer. Jest to skutek stosowania punktów referencyjnych w tej technice – niezależnie od położenia obudowy złożenie chmury z szeregu obrazów następuje zawsze na skutek orientacji względem owych punktów [1].

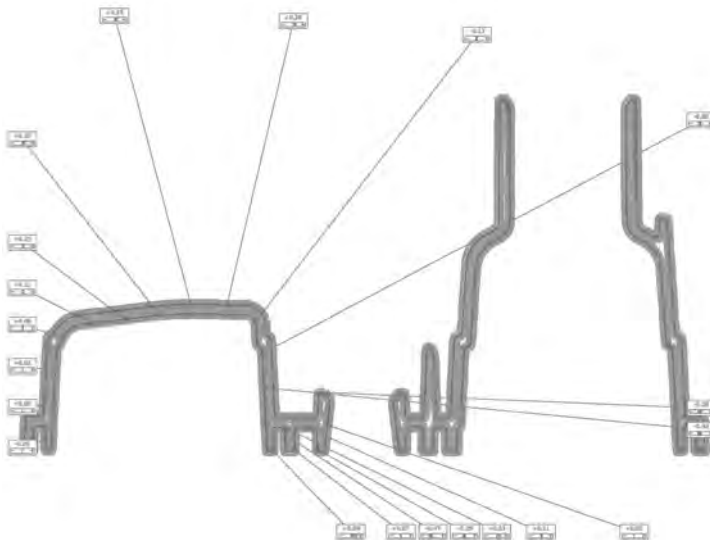


Rys. 1. Kolorystyczna mapa odchylek od modelu CAD
Fig. 1. Deviation from CAD model mapping (in color)

Podstawową formą prezentacji wyniku jest kolorystyczna mapa odchyłek, którą uzyskuje się łatwo pod warunkiem dostarczenia do systemu modelu CAD obiektu. Mapę dla zmierzonej obudowy przedstawiono na rys. 1. Ten wygodny sposób prezentacji rozbieżności między rzeczywistą częścią a ideałem trudno jest jednak interpretować liczbowo (mimo skali zamieszczonej przy mapie), dlatego istnieje możliwość opisu charakterystycznych punktów wartością odchylenia w mm. Na rys. 2 przedstawiono w postaci płaszczyzn sposób definiowania przekrojów.



Rys. 2. Definiowanie przekrojów obiektu
Fig. 2. Object cross-sections definition



Rys. 3. Odchyłki w charakterystycznych punktach przekroju
Fig. 3. Deviations in specific cross-section points

Wskazując właściwy przekrój wprowadza się punkty w charakterystycznych miejscach przekroju, aby odczytać kierunek i wartość odchylenia względem modelu utrzymanego w wartościach nominalnych. Taką metodę prezentacji przedstawiono na rys. 3 – na zakończeniu każdej linii odniesienia wpisana jest odchyłka danego punktu.

Nim uzyskano wyniki jak na rys. 1-3, chmurę punktów zamieniono na siatkę trójkątów, uzupełniając niewielkie braki na powierzchniach płaskich wirtualnie. Procedura nie wpływa na dokładność pomiaru, ponieważ nie dotyczy charakterystycznych elementów obiektu, a algorytm wypełniania oparty jest na rozkładzie punktów w otoczeniu. W ten sposób uzyskano model stereolitograficzny (format *.stl, powszechnie obsługiwany przez dostępne systemy komputerowego wspomagania projektowania). Po ustaleniu punktów bazowych względem modelu CAD uzyskano mapę jak na rys. 1.

PORÓWNANIE Z INNYMI METODAMI

Skanowanie techniką prążków interferencyjnych nie jest jedyną metodą szybkiego zbierania dużej liczby punktów pomiarowych, choć daje ich zdecydowanie najwięcej [4]. Istnieją inne urządzenia o podobnym przeznaczeniu, jak na przykład współrzędnościowa maszyna pomiarowa wyposażona w głowicę skanującą dotykową lub laserową czy tomograf rentgenowski. Każde z tych urządzeń posiada zalety skłaniające do stosowania w specyficznych aplikacjach [8]:

- CMM (współrzędnościowa maszyna pomiarowa, ang. Coordinate Measuring Machine) – głowica skanująca jako uzupełnienie punktowej głowicy pomiarowej tam, gdzie większość pomiarów wykonuje się z dużą dokładnością, sprawdzając głównie charakterystyczne elementy części a czasem wynika konieczność zebrania większej liczby punktów z określonej powierzchni,
- ręczny skaner laserowy – do miejsc trudnodostępnych, w których duża głowica pomiarowa urządzeń skanujących nie może być zainstalowana w sposób zapewniający dostęp do punktów pomiarowych,
- tomograf rentgenowski – do analizy wymiarów niedostępnych dla urządzeń pracujących w paśmie światła widzialnego.

Biorąc pod uwagę czas pełnego zwymiarowania próbki i uzyskania modelu gotowego do wykorzystania poprzez re-engineering do produkcji nowych, ulepszonych produktów, skanowanie przy pomocy projektora prążków daje najszybszy pomiar o dokładności wystarczającej w przetwórstwie tworzyw sztucznych, z uwzględnieniem narzędzi do produkcji tworzyw, w tym opakowań. Digitizer może również posłużyć do sprawdzania pojedynczych wymiarów, bez konieczności modelowania całego obiektu, co w odniesieniu do złożonych produktów może być bardzo czasochłonne. Zamiast porównywania z wzorcem wirtualnym proponuje się wówczas szybkie zebranie punktów wokół interesujących użyt-

kownika miejsc na próbce i konstrukcję odpowiednich figur geometrycznych, z możliwością ustalenia zależności między nimi [5].

Dodatkową zaletą metody optycznej jest brak kontaktu z próbką, czyli ograniczenie ryzyka deformacji kształtu przed i w trakcie pomiaru. Jak w każdej technice pomiarowej również i tu bazowanie przedmiotu ma ogromne znaczenie, co szczególnie łatwo udowodnić przy obiektach o dużej smukłości lub przy cienkich blachach. W obu przypadkach część może odkształcać się pod własnym ciężarem, a kontrolować to zjawisko można jedynie stosując konsekwentnie w tych samych miejscach punkty podparcia.

Pod względem szybkości procesu skanowanie 3-D zyskuje przewagę nad innymi technikami wraz z przyrostem liczby cech pomiarowych do określenia. Odległość dwóch otworów łatwo jest uzyskać przy pomocy ramienia pomiarowego, ale już pomiar złożonej geometrii, jak choćby obudowa z rys. 1-3, wymagałby godzin pracy, podczas gdy skanując dokładniejszy rezultat można osiągnąć już w kilka minut [6].

Na najwyższym miejscu pod względem liczby operacji do wykonania znajduje się zamodelowanie gotowej wypraski, do czego skanery są często wykorzystywane. Wkracza się w ten sposób w obszar projektowania wspomaganego komputerowo a w dalszym kroku w wytwarzanie wspomaganego komputerowo. Metodę inżynierii odwrotnej, prowadzącą od gotowego wyrobu do narzędzia służącego do jego wykonania stosuje się już na całym świecie, ponieważ wyraźnie obniża koszt wprowadzenia nowego wyrobu, modyfikacji już posiadanego oraz skraca czas potrzebny do przeprowadzenia tych procesów [7].

PODSUMOWANIE

Stosowność doboru metody skanowania do weryfikacji wymiarowej nie podlega wątpliwości, o ile uwzględni się dokładność oferowaną przez systemu optyczne i uzna ją za wystarczającą. W przypadku konieczności sprawdzenia odchyłek na poziomie $0,01 \div 0,05 \text{ mm}$, ta metoda pomiaru nie zapewnia właściwej dokładności. Mimo tego ograniczenia pole aplikacyjne jest bardzo szerokie, poczynając od implantów medycznych przez przemysł opakowań, motoryzację, lotnictwo, aeronautykę po kryminalistykę.

Dalsze prace zdążać będą w kierunku poprawienia dokładności pomiaru, co jeszcze powiększy obszar stosowania urządzeń, poprzez zmniejszenie zagęszczenia prążków, zastosowanie promieniowania niewrażliwego na światło słoneczne oraz multimetrię, w odróżnieniu od stereometrii, która wykorzystuje układ dwóch kamer, już dziś rozbudowany o trzecią.

PIŚMIENNICTWO

1. Juliano L., Minetola P.: Rapid manufacturing of sculptures replicas: a comparison between 3D optical scanners, CIPA 2005 XX international symposium, Turyn 2005, 384-393.
2. Weiss V., Andor L., Renner G., Varady T.: Advanced surface fitting in reverse engineering, *Computer-Aided Design* 2002, 19, 19-42.
3. Takasaki H.: Moire topography, *Appl. Opt.* 1970, 9, 1467-1472.
4. Barbero B.R., Ureta E.S.: Comparative study of different digitization techniques and their accuracy, *Computer-Aided Design* 2011, 43, 188-206.
5. Gao J., Chen X., Zheng D., Yilmaz O., Gindy N.: Adaptive restoration of complex geometry parts through reverse engineering application, *Advances in Engineering Software* 2006, 37, 592-600.
6. Yea X., Liua H., Chena L., Chenc Z., Panc X., Zhanga S., Reverse innovative design - an integrated product design methodology: *Computer-Aided Design* 2008, 40, 812-827
7. M. Sokovic M., Kopac J.: RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development, *Journal of Materials Processing Technology* 2006, 175, 398-403.
8. Ratajczyk E., Jakubiec W.: Współrzędnościowa technika pomiarowa: problemy i zastosowania: praca zbiorowa, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała 2008.

DIMENSIONAL REVISION OF THE FIRST MOULDED PIECE WITH 3D SCANNING SYSTEM

Summary

This paper is focused on gathering full geometrical information about molding specimen. Details about the influence of environment and external factors on measuring accuracy are given, so as specimen features disadvantageous from metrological point of view. Next part refers to the problem of modeling that makes time of new molding tool work out much shorter. To sum up a possible, future researches on optical 3-D scanning systems is described.

Keywords: scanning, 3-D, optical measurement.

Martin Jakubčík, Darina Kumičakova ¹⁾

COMPUTER AIDED DESIGN OF UNCONVENTIONAL ROBOTIC DEVICES

Summary: The aid of 3D CAD/CAM/CAE systems represents very important power tool in process of the technical system design. Their utilisation enables an increasing of the high added value of solved construction tasks. But complex CA systems are not “self-solvable” systems and therefore the intellect and abilities of designers will remain on the first position.

Keywords: Biorobotic gripper, computer simulation, flexible elements, pneumatic artificial muscle, stranded wire.

INTRODUCTION

In the case of non-traditional kinematic structure of the robot, respectively application of unconventional types of actuators and transmission mechanisms in the construction of their subsystems, it is necessary to look for new 3D modelling techniques which would provide the creation of virtual models with the required parameters.

Examples of such non-traditional structures may be the construction of biorobotic gripper (BRG) which design is optimised in frame of the dissertation thesis solution in the Department of Automation and Production Systems at the University of Žilina.

BRG is the end effector applicable to industrial and service robots where this one substitutes the conventional handling robot effector by its properties. The basic characteristic of this gripper type is a versatility and flexibility of its use. Application of biorobotic grippers represents a highly innovative approach to the handling tasks executing in the implementation of specialized applications, either in industrial, service or special (e.g., undersea and space) environments.

DESIGN AND SOLUTION OF THE BRG VIRTUAL 3D MODEL VARIANTS

The initial draft version of the biorobotic gripper was modelled in the system CATIA V4. Whereas the work place of the Department of Automation and Production Systems has used the licensed program Pro/ENGINEER WF4

¹ University of Žilina, Department of Automation and Production Systems, Žilina, Slovak Republic.

(*CreoElements/Pro*) [3], it was necessary to ensure migration of data already generated. For this purpose, it was used the principles of the conversion and the export of virtual 3D model data into a neutral formats understandable for both CAD systems. Among several available formats such as STEP, IGES, STL, VRLM, Neutral, 3Dxlm has been turned out as the best IGES through its good readability for Pro/ENGINEER WF4 and maintaining the required elements of the original model (volume, area, coordinate system, the reference plane, axis, etc.). The disadvantage of this solution is failure to maintain the model tree and creating sequence of elements and their parameters of which the model consists (*extrude, cut, hole, round, etc.*). The model is exported just as elemental (solid) object without the possibility of its reverse editing.

Thus the primary variant of the biorobotic gripper was imported and assembled part by part into the assembly (Fig. 1a) [1]. Initial range of motion was detected on the base of utilisation of simplified computer simulation – by the discrete compilation of fingers and their positions in the border cells. Based on the visualization of this variant, the easier recognition of the spatial and functional relationships among different parts of the model were allowed. This made it possible to optimize (simplified) the structure of design with regard to the technology of its production ("Rapid Prototyping - Fused Deposition Modelling"), which led to the reduction in the number of assembly components. The result of these modifications was the second variant of the biorobotic gripper (Fig.1b) [1]. The modified components were manufactured for assembling of the prototype of one finger.

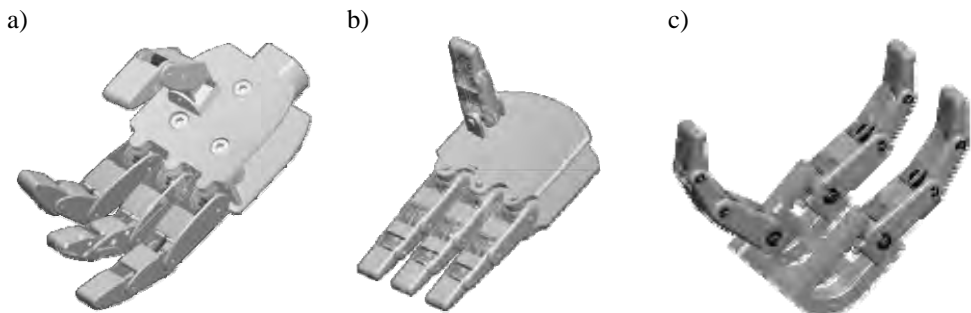


Fig. 1. Virtual 3D models of the biorobotic gripper:
a) the first variant, b) the second variant, c) the third variant

Kinematic limitations detected after functional analysis performed on the finger prototype showed the need of further modification and simplification of the biorobotic finger design. Modificative facilities in the environment of Pro/ENGINEER WF4 allow create new variant from previous model with keeping of initial structural and functional dependencies. Modification procedure consists of suppressing ("*Suppress*") of the parts which forming the palm and removing of the thumb subassembly from the superior hand assembly "*Model*

Tree". The new configuration of BRG is given by new placement of three fingers at the palm. Two fingers are placed in the same row and the third one is in the opposite row – at angle = 90° . This modification is possible to do in the active assembly through the "Edit Definition" of the palm new model via "Component Create". This model is coupled through references to the connecting elements (shaft fingers). It ensures mutual associativity for the modification of mentioned elements in the direction "Parents-Children". The internal section of the first phalanges was modified in analogous manner. The additional element of shaft was modelled after its length editing (Fig. 1c).

The subsystem of actuators for BRG consists of pneumatic artificial muscles (PAMs) which characteristics are currently most similar to the properties of human muscles. The PAMs are considered for the cables movement control. The cables are arranged in internal space of every finger and palm too and led out through hand wrist. PAMs will be placed in the forearm zone.

COMPUTER SIMULATION OF FLEXIBLE ELEMENTS

The basic problem of the described BRG mechanism simulation results from a large number of both degrees of freedom and members of the kinematic chain which movements must be controlled. The finger structure is an open mechanism with serially linkage chain for which the physical parameters and their boundary conditions are not precisely defined. Therefore, the principle of bionics and heuristic approach based on empiricism and analogy with human hands will be used for the motion simulation.

The first phase of the flexible components simulation is focused on computer modelling of artificial tendons (wires) as the flexible elements which constitute the actuation and transformation mechanism of the BRG propulsion subsystem. However, at the present time no known CAD/CAE systems support the possibility of modelling such flexible bodies directly. Therefore, the idea of implementing the necessary simulations is to use Pro/Engineer WF5 and to apply alternative approaches to modelling and simulation mentioned flexible (shape-flexible) elements.

The base stage is to focus an attention to the analysis of solutions of the mechanical system and defining of the problems too. The concept of a flexible element as was presented in the context of a body (e.g., steel stranded wire) is characteristic of its flexibility and/or elasticity. Flexibility means a change of shape in a plane parallel to the largest dimension of the body without altering its volume.

Aiming at the simulation problem of 3D flexible cable in equipment operation simulation platform, the cable model is classified as two types which are named as:

- model of constant length,

– model of changeable length.

Then two different simulation methods are put forward according to their respective 3D shape characteristics. Firstly, the catenary method is adopted to describe the model of constant length considering the gravity. The curve equation is deduced to be the final math model. Secondly, the model of changeable length is equal to draw a 3D line according two given 3D coordinate points and cylinder with certain radius around the line can be drawn with calling OpenGL API. The rendering effect of each model is presented to prove the simulation feasibility. Finally, the realization of mechanism called OpenGL call-back function combining with Vega is brought forward. It shows the greatest traits on the cable simulation in similar virtual reality system.

In this task we consider the cable as a 3D model with a constant length, resulting in the subsequent simulation procedures (chain method). Solution like this one represents the application of simulation based on object modelling features of the mechanism. The basic principle of testing is to simplify the real model to theoretical model, thus eliminating many parameters and variables entering into the process that affect the test results in ways previously unpredictable. Therefore, the BRG 3D model has been simplified to test the one. This is designed as a general mechanism of BRG subassembly containing only the elements directly coupled with the movement of the first wire. It means that the first phalanx is connected with the base through the shaft to the pulley by the motion constrain "*User Defined - Pin*" (defined as rotation around the axis).

Wire model is realized as a string created from the basic building element which is n -times inserted into the assembly and linked to the previous building element. Therefore, in the theoretical analysis we can conclude that if:

- n is number of elements of which the virtual 3D model of cable is composed, it can theoretically take values: $n (1, \infty)$,
- R is degree of similarity between both virtual and real models of wire expressed as a percentage of the fidelity model $R (0, 100)$ and it is expressed in relation to n as: $R = f(n)$ and
- dl is the length of the basic building element of wires and all elements have a constant length: $dl_1=dl_2=\dots=dl_n$,

then l - total length of wire is expressed as:
$$l = \sum_{i=1}^n dl_i$$

The basic building element of wire is modelled as a cylindrical body with given diameter which is closed from the one side by convex cylindrical surface and from the second side by concave surface. These both surfaces create references on the building elements for the mutual interconnection between every couple of elements in the chain. Fundamental element must include also coordinate planes and axes of cylindrical surfaces and coordinate points which are created at the intersection of the axes.

Trajectory of wire is defined by the cable outlet (output) at the base, a rotating guide roller surface and point of its mounting to the phalanges. This trajectory is created in the model as "Sketch" associative curve changing its shape depending on the position configuration of characteristic elements in their mutual movement.

Stranded wire is assembled as the virtual mechanism by using of motion constraint in "Assemble" module where each element of wire is connecting to the motion links "Pin-Axis Alignment" (alignment of axes of cylindrical surfaces) and "Slot - Point on Line" (alignment points and curve-trajectory) (Fig. 2). Characteristic of flexible bodies is their flexibility in a defined direction and a maximum value of bending. So these data are the boundary conditions for the simulation of their movement. Therefore, the angle of the axis rotation of two neighbouring elements in their link "Rotation Axis" is limited in the angle range $\pm 70^\circ$. To connect wire to the motion assembly, the first element is linked through the pivot to the phalange rotationally.

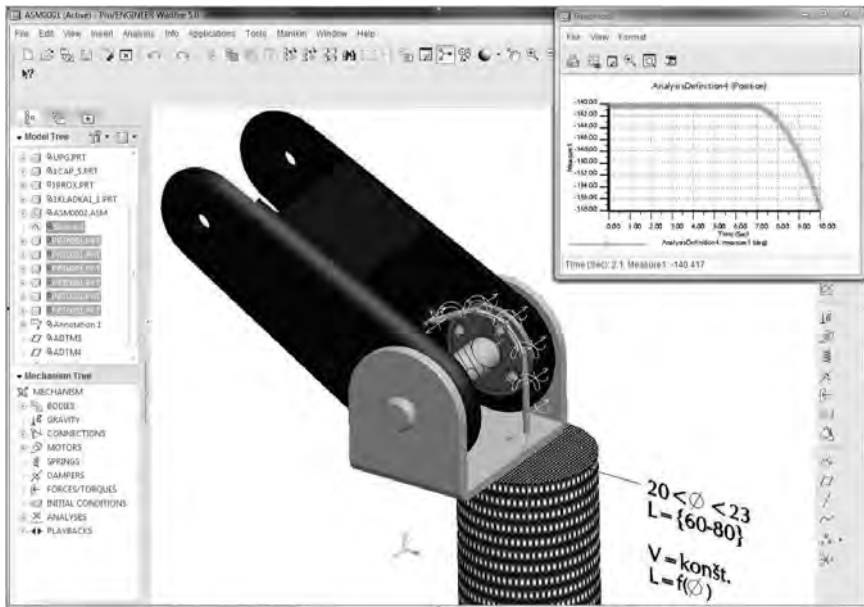


Fig. 2. Simulation of the mechanism 3D virtual model with flexible elements (wire, PAM)

In context with the simulation of pneumatic artificial muscle (PAM) we must know its characteristics. This information is described together with a mathematical equation in [2], where the dependency between length L and diameter $\varnothing d$ of PAM is expressed. On the base of this mathematical relation the graphically simplified PUS parametric model is created in the form of a cylinder. The length and diameter of the cylinder are defined by the function "Tools" and

"Relations" as functions dependent on the control variable P which is determined and its value is changed by "Tools" "Parameters".

The proposed simulation model is possible to test in two ways. The first way is in the application "Mechanism" where the motion mechanism is created by inserting the actuator "Servomotor" to axis of the shaft and by defining its parameters (e.g. Profile-Velocity, Magnitude-Constant, $A = \omega$). Through the function "Mechanism Analysis" we can create "Analysis Definition" which enables to show the behaviour of the simulated mechanism during its movement through Playback, Graph functions. Another way is to connect the second end of wire ("assemble" of the last element) with simulation model of PUS. The length of the PUS will be changed with subsequent change in control parameter P and by regeneration of the model. It causes the tension of cable and rotational movement of the phalange.

The results of the simulations are following:

- in proportion to increasing number of elements n the difficulty and time of simulation calculations are increasing. It could be caused by non-optimized calculation algorithm system for a given application and hardware performance PC.
- simulation based on variations of parameter P enables to obtain only discrete values (angular rotation, position of elements) which provide only a little information in comparison with the method of application *Mechanism*.

The output of the present solutions should lead to the identification of size and speed of shortening of individual stranded wires by realization of predefined movements. These data may represent the important input parameters for control of pneumatic artificial muscles.

DIRECTION OF THE BRG 3D MODEL FURTHER DEVELOPMENT AND TESTING

In the next phase of the biorobotic gripper design verification is planned a virtual testing of the BRG grasping ability. For this purpose the objects of simple shapes called "shape primitives" (e.g. prism, cylinder, cone and sphere) will be used. The main task will be to create the suitable methodology for determining of the contact points among BRG fingers and grasped object in CAE system environment. For this purpose the utilisation of function of program ProENGINEER - "Collision detection" - is considered.

CONCLUSION

A common problem in the phase of the BRG design is verification and reviewing of accuracy of the proposed variants of structures or modifications of the selected version in terms of its functionality. These testing of the BRG

physical prototypes are time-consuming and expensive. The implementation of further design modifications is quite complicated.

Very progressive way is verification of the BRG design with application of both simulation and optimization methods are prepared as a computer program of CAE system on virtual the model. Using the simulation system allows to engineers to determine operationally how the various selected kinematic and geometric parameters affect the monitored links abilities of proposed mechanism - for example: grasping objects of different shapes. In that kind it's possible to evaluate the functionality of the proposed prototype before its physical implementation phase and thus avoid the time, material and financial losses for non-optimal variant.

REFERENCES

1. Jakubčík M., Kumičakova D.: Multi-functional robot hands. In: 11th International Scientific Conference „Automation in Production Planning and Manufacturing”. Žilina – Turčianske Teplice, Slovak Republic: 2010, ISBN 978-80-89276-23-3, pp. 116-121.
2. Kolpach S., Kállay F.: Research of McKibben pneumatic artificial muscle control. In: ELEKTRO 2010 Proceedings of the 8th International Conference. Žilina, Slovak Republic: 2010, ISBN 978-80-554-0196-6, pp 39-44.
3. Web Site IMP Solution, <http://www.ipmsolutions.sk/>

KOMPUTEROWE WSPIERANIE PROJEKTOWANIA NIEKONWENCJONALNYCH URZĄDZEŃ ZROBOTYZOWANYCH

Streszczenie

Wykorzystywanie systemów komputerowych CAD/CAM/CAE w znaczącym stopniu usprawnia proces projektowania urządzeń technicznych. Posługiwanie się nimi zwiększa wyraźnie wydajność pracy i pozwala na skuteczne rozwiązywanie występujących problemów konstrukcyjnych. Jednakże systemy wspierania prac inżynierskich nie są systemami samo-rozwiązującymi napotkane problemy, w związku z czym nadal na pierwszym miejscu niezbędny jest intelekt, wiedza i umiejętności korzystających z nich projektantów.

Słowa kluczowe: chwytak bioniczny, symulacja komputerowa, elementy elastyczne, pneumatyczny sztuczny mięsień, przewód.

Note: The solved problem supports a partial solution of EU Operational Programme – Education: “A Flexible and Attractive Study on University of Žilina for Both Employment Market and Knowledge Society Requirements”; Code ITMS 26110230005.

Ján Kardoš, Nadežda Čuboňová ¹⁾

UTILIZATION DATABASE SYSTEM USING THE PROTOCOL STEP

Summary: Information systems in today's manufacturing enterprises are distributed. Data exchange and share can be performed by computer network systems. The present manufacturing scenario demands the efficient database systems for manufacturing to perform the operations globally. Database systems are the key to implementing information modeling. Engineering informations modeling requires database support. This paper proposes a manufacturing database system for STEP-NC data from EXPRESS entities.

Keywords: STEP, STEP-NC, CNC, EXPRESS, XML file.

INTRODUCTION

Engineering activities are generally performed across departmental and organization boundaries. Product development based on virtual enterprises, for example, is generally performed by several independent member companies that are physically located at different places. Information exchange and share among them is necessary. It is also true in different departments or even in different groups within a member company.

Information systems have become the nerve center of current computer-based engineering applications, which hereby put the requirements on engineering information modeling. Databases are designed to support data storage, processing, and retrieval activities related to data management, and database systems are the key to implementing engineering information modeling. Design and manufacturing companies eager to integrate their engineering processes around product databases, but engineering databases are expensive and difficult to create [2, 3].

Integration around product databases can enable concurrent engineering, a process where multiple engineers work on different facets of a product concurrently. However, integrated product databases are yet to be common in industry in the STEP-NC and EXPRESS entities perspective. Engineering design objects and their components are not independent. Spatio-temporal data modeling is essential in engineering design. The software systems are developed to share and exchange the product and production information in order to effectively organize production activities of enterprise. However, the systems are generally developed

¹ University of Zilina, Department of Automation and Production Systems, Zilina, Slovak Republic.

independently. In such an environment of distributed and heterogeneous computer-based systems, exchanging and sharing data across manufacturing units are very difficult. An effective means must be provided so that the data can be exchanged and shared among deferent applications and organizations [1].

STEP/STEP-NC

The contemporary product design and manufacturing environment requires a bidirectional and seamless data flow throughout all stages of data transactions. Standard for the Exchange of Product (STEP) Model Data is a large and powerful set of ISO (International Organization for Standardizations) standards, all under ISO 10303.

The main objective of STEP is to provide a mechanism that describes a complete and unambiguous product definition throughout the life cycle of a product. STEP provides both broadly useful data modeling methods and data models focused on specific industrial uses. STEP is suitable for not only neutral file exchange, but also as a basis for implementing and sharing product data bases [1].

As an extension to STEP, STEP-NC provides the potential to finally close the gap between design and manufacturing in the drive for a complete, integrated product development environment. The STEP-NC data model is a long overdue improvement in the domain of computer numerical controls (CNC) where G-codes have been in use for more than half a century. STEP-NC brings richer information to CNCs presenting an opportunity for the development of more intelligent, interoperable and informative machining. Two different ISO subcommittees are working towards such a STEP-NC standard with two different foci; ISO TC 184/SC1 is working on ISO 14649, termed the Application Reference Model (ARM) whereas ISO TC 184/SC4 is developing STEP AP-238, termed the Application Interpreted Model (AIM). Both models represent the data model information to program intelligent CNC controllers, but the AIM is fully STEP compliant, whereas the ARM contains the information required to program a CNC machine. The ARM is to be used in an environment in which CAM systems have exact information from the shop-floor, whereas AIM is more suitable for a complete design and manufacturing integration. The ISO 14649 STEP-NC standards were developed and published by the above two sub committees under the different ISO standards such as ISO 14649-1, 14649-10, 14649-11, 14649-12, 14649-111 and 14649-121 bases [1, 3].

STEP-NC CONFORMANCE

In the overall process, from art to part, STEP-NC provides the data interface between CAM systems and CNC machine tools (see Figure 1). CAM systems output STEP-NC data while CNC systems read in STEP-NC data. At present,

“data transfer” is accomplished using a physical file in ISO 10303-21 format; data sharing scenarios (i.e., a common database) may be used in the future.

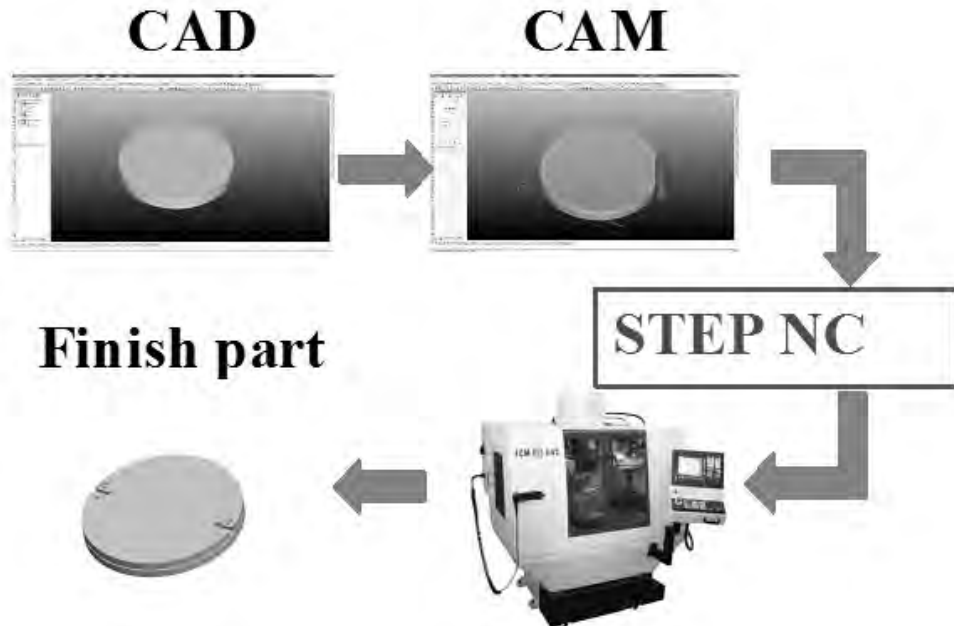


Fig. 1. Overall Process

STEP NC protects machining data as a key manufacturing asset. As long as the company has its database of STEP NC files, the parts can be manufactured regardless of what happens to the external or internal supplier [6].

DATABASES

A database is a system intended to organize, store, and retrieve large amounts of data easily. It consists of an organized collection of data for one or more uses, typically in digital form. One way of classifying databases involves the type of their contents, for example: bibliographic, document-text, statistical. Digital databases are managed using database management systems, which store database contents, allowing data creation and maintenance, and search and other access.

Our task is to create interfaces that bring together the information defined by STEP and STEP NC. Product geometry can be defined by one STEP application protocol. Product features can be defined by another STEP protocol. Machining operations can be defined by STEP NC. However, all three types of data and others must be integrated in a complete product model database. Starting with product geometry in the STEP format is the easy part because STEP translators are built into most CAD systems these days (and they handle 3D geometry, doing so more effectively than IGES ever did, apparently).

STEP NC establishes a hierarchy of workingstep supertypes /subtypes. In other words, it breaks down every machining operation into the steps required to perform the operation. These steps include actions to be taken as well as data (such coordinates of point-to-point motion) to be applied. These steps are then linked to the appropriate part model geometry to fill in the values. STEP Tools is setting up tables to match workingsteps, workingstep-methods, workingstep actions, and machined features.

A key part of STEP Tools approach to the super model database is the use of XML in its interfaces. XML, the eXtensible Markup Language, is a vendor-neutral data exchange language for passing information, not just data, across the Internet. XML allows data to be "tagged" so that software applications reading the database can identify what type of information is stored in the database and extract the data that is needed. HTML, the Hyper Text Markup Language, is a similar "metadata" language that the Web uses so that text can be displayed no matter what Internet browser happens to read it. XML offers a comparable level of interoperability. An XML standard for STEP is nearing completion. This standard will ensure that all data in a product model is "tagged" in the same way

XML provides a convenient means to link manufacturing strategy, tool path, and tool selection information to geometry, features and machining steps in the database. By sorting out data with the appropriate tags, for example, geometry identified as a hole to be drilled can be linked to operations such as rough drilling, boring and counter boring steps. Each of these steps will require that other data be extracted, such as workpiece material, surface finish requirements, and so on, to link with speed and feed tables. XML provides the tags so that the data is sorted correctly [4, 5].

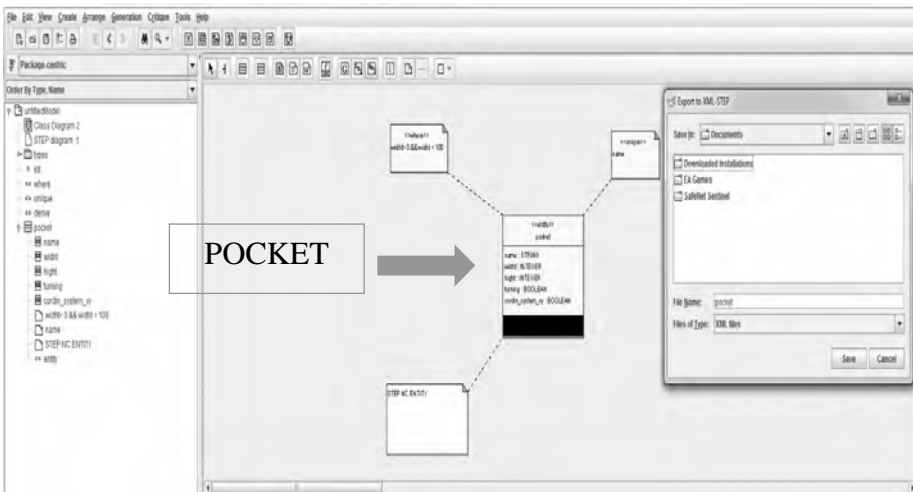


Fig. 2. Creating of EXPRESS entity

On the figure 2 we can see created EXPRESS entity with name „POCKET“ and attributes: NAME, WIDTH, HIGHT, MILING, COORDINATING SYSTEM. This EXPRESS entity is designed as STEP schema, which then we save in XML format.

In the STEP schema editor we can open a particular schema in this case have name „POCKET“. Through the use of text boxes, we can write list of specific data values or a given attribute. On the figure 3 are definite three pockets of different values. Thus definite STEP scheme we can save in the database, or used directly as format 10303 part 21 (STEP physical file).

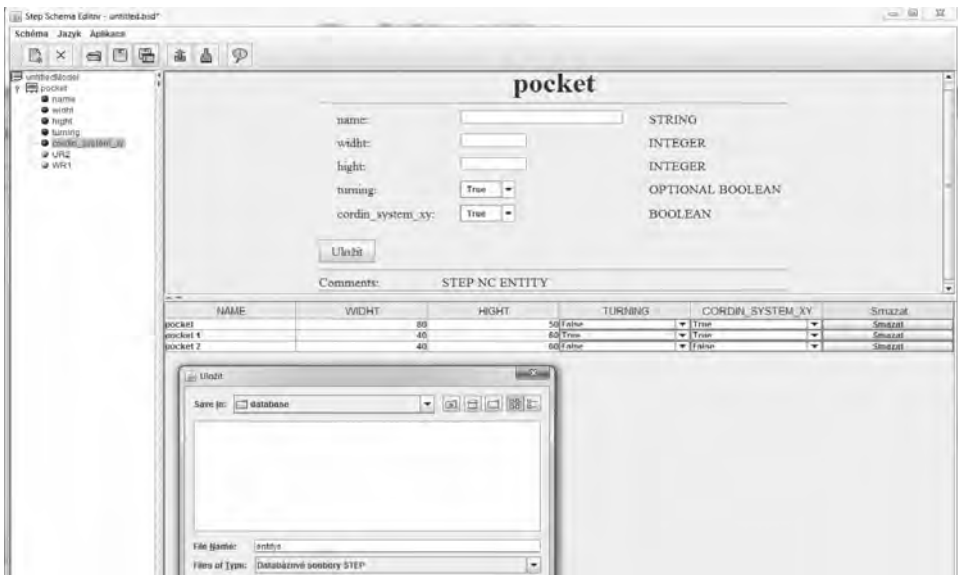


Fig. 3. STEP editor schema

Current Database Models

Engineering information modeling in databases can be carried out at two different levels: conceptual data modeling and logical database modeling. Therefore, we have conceptual data models and logical database models for engineering information modeling, respectively. Database models for engineering information modeling refer to conceptual data models and logical database models simultaneously [3].

Conceptual data models

Much attention has been directed at conceptual data modeling of engineering information. Product data models, for example, can be viewed as a class of semantic data models (i.e., conceptual data models) that take into account the

needs of engineering data. Recently, conceptual information modeling of enterprises such as virtual enterprises has received increasing attention. Generally speaking, traditional ER (entity relationship) and EER (extended entity-relationship) can be used for engineering information modeling at conceptual level [3].

Logical Database model

A logical data model (LDM) in systems engineering is a representation of an organization's data, organized in terms of entities and relationships and is independent of any particular data management technology.

Logical data models represent the abstract structure of some domain of information. They are often diagrammatic in nature and are most typically used in business processes that seek to capture things of importance to an organization and how they relate to one another. Once validated and approved, the logical data model can become the basis of a physical data model and inform the design of a database. Logical data models should be based on the structures identified in a preceding conceptual data model, since this describes the semantics of the information context, which the logical model should also reflect. Even so, since the logical data model anticipates implementation on a specific computing system, the content of the logical data model is adjusted to achieve certain efficiencies.

The term 'Logical Data Model' is sometimes used as a synonym of 'Domain Model' or as an alternative to the domain model. While the two concepts are closely related, and have overlapping goals, a domain model is more focused on capturing the concepts in the problem domain rather than the structure of the data associated with that domain [4].

CONCLUSION

Database system using the protocol STEP are solved by doctoral thesis: utilization of STEP protocol for programming CNC machines (využitie protokolu STEP NC pri programovaní CNC strojov). This paper concentrates on the extraction, storage and management of manufacturing data from STEP-NC file using EXPRESS schema entities are in the backend. This implementation provides flexible environment to the people, who are using STEP-NC data and manage the EXPRESS entity data.

REFERENCES

1. Xun .H., Nee Y.C., Advanced design and manufacturing based on STEP. Springer-Verlag London, 2009, 465s. ISBN 978-84822-738-7.

2. Date, C. J., An Introduction to Database Systems, Fifth Edition. Addison Wesley 1990.
3. International Journal of Engineering Science and Technology (<http://www.ijest.info/docs/IJEST10-02-11-162.pdf>).
4. Developing High Quality Data Model (<http://www.matthew-west.org.uk/documents/princ03.pdf>).
5. STEP NC – The End of G-code (<http://www.mmsonline.com/articles/step-nc-the-end-of-g-codes>).
6. CNC - CAM software firms offer programs for CNC machines (<http://www.cncinformation.com/cad-cam-cad-cam-cad-cam/plugging-into-step-nc-3>).

UŻYTKOWANIE SYSTEMU BAZ DANYCH WYKORZYSTUJĄCYCH PROTO-KÓŁ STEP

Streszczenie

We współczesnych przedsiębiorstwach przemysłowych systemy informatyczne występują powszechnie i są niezbędne. Udostępnienie i wymiana danych odbywa się przy wykorzystaniu sieci komputerowych. Realizacja procesu wytwórczego wymaga wydajnych systemów produkcyjnych baz danych do wykonywania operacji w ujęciu globalnym. Systemy baz danych są kluczem do zarządzania przepływem informacji. Inżynieria zarządzania informacją wymaga odpowiednich metod obsługi bazy danych. Niniejszy artykuł proponuje produkcyjną bazę danych opartą na modelu STEP-NC korzystającą ze języka programowania EXPRESS.

Słowa kluczowe: STEP, STEP-NC, CNC, EXPRESS, plik XML.

Note: The solved problem supports a partial solution of EU Operational Programme – Education: “A Flexible and Attractive Study on University of Žilina for Both Employment Market and Knowledge Society Requirements”; Code ITMS 26110230005.

Tomáš Michalčík, Čuboňová Nadežda ¹⁾

DATA TYPES IN THE EXPRESS LANGUAGE

Summary: Defined data types are provided as part of the language. Every attribute, local variable or formal parameter has an associated data type. The core information modelling language consists of data types that determine its modelling capabilities. Based on the data types of traditional programming languages, language EXPRESS absorbing mechanisms used in object-oriented technologies, such as inheritance mechanism which is used to describe the production data, using a wide range of data types. This article dealt with the data types of EXPRESS language, and describe their basic options.

Keywords: data type, capabilities, value, domain.

INTRODUCTION

EXPRESS language is defined by ISO 10303-11. It is a modelling language for data, which provides a sufficiently rich set of resources to define complex data types. This language is object oriented and easily understood by humans, and also workable with computer as well other computer languages. However this language cannot be considered to be a programming language. Unlike these languages, which are tools for application programming, language EXPRESS is used for object-oriented conceptual description of the products [1, 3]. Because it is highly versatile, it can be used to describe any objects or processes of the real world. The structure of language is similar to other object-oriented programming language, especially language, which define the structure of object-oriented databases.

Data types of the EXPRESS language are classified as [1]:

- simple data types,
- aggregation data types,
- named data types,
- constructed data types,
- generalized data types.

Data types are also classified according their usage as:

- instantiable data types,
- parameter data types,
- underlying data types.

I will be the relationships between these two classifications explain in the last chapter.

¹ University of Zilina, Department of Automation and Production Systems, Zilina, Slovak Republic.

SIMPLE DATA TYPES

The simple data types define the domains of the fundamental data units in EXPRESS. That is, they cannot be further subdivided into elements that EXPRESS recognizes. The simple data types are (ISO 10303-11):

- NUMBER ,
- REAL ,
- INTEGER ,
- STRING ,
- BOOLEAN ,
- LOGICAL ,
- BINNARY .

Number data types

The NUMBER data type has as its domain all numeric values in the language and shall be used when a more specific numeric representation is not important. Since we may not know the context of size, we do not know how to correctly represent it. The size of the crowd at a stadium, for example, would be an INTEGER, whereas the area of the pitch would be a REAL.

Real data type

The real data type has as its domain all rational, irrational and scientific real numbers. It is a specialization of the NUMBER data type. Rational and irrational numbers have infinite resolution and are exact. Scientific numbers represent quantities which are known only to a specified precision. A real number literal is represented by a mantissa and optional exponent. The number of digits making up the mantissa when all leading zeros have been removed is the number of significant digits. The known precision of a value is the number of leading digits that are necessary to the application [1].

Integer data type

The INTEGER data type has as its domain all integer numbers. It is a specialization of the real data type. This example (fig. 1) uses an INTEGER data type to represent an attribute named `elements`. The domain of this attribute is all integers, with no further constraint.

```
ENTITY too;
  components : INTEGER;
  ...
END_ENTITY;
```

Fig. 1. Integer data type

Logical data type

The LOGICAL data type has as its domain the three literals TRUE , FALSE and UNKNOWN . The following ordering holds for the values of the LOGICAL data type: FALSE < UNKNOWN < TRUE. The LOGICAL data type is compatible with the BOOLEAN data type, except that the value UNKNOWN cannot be assigned to a boolean variable.

Boolean data type

The BOOLEAN data type has as its domain the two literals TRUE and FALSE [1]. The BOOLEAN data type is a specialization of the LOGICAL data type. The same ordering holds for values of the BOOLEAN data type as for values of the LOGICAL data type, that is: FALSE < TRUE. In this example (fig. 2), an attribute named `planar` is represented by the BOOLEAN data type. The value for `planar` associated with an instance of `surface` can be either TRUE or FALSE.

```
ENTITY surface;
    planar : BOOLEAN;
    ...
END_ENTITY;
```

Fig. 2. Boolean data type

String data types

The STRING data type has as its domain sequences of characters. A string data type may be defined as either fixed or varying width (number of characters). If it is not specifically defined as fixed width (by using the fixed reserved word in the definition) the string has varying width. The domain of a fixed width string data type is the set of all character sequences of exactly the width specified in the type definition. The domain of a varying width string data type is the set of all character sequences of width less than or equal to the maximum width specified in the type definition.

The following defines a varying length string; values of which have no defined maximum length.

```
string1 : STRING;
```

The following defines a string that is a maximum of ten characters in length; values of which may vary in actual length from zero to ten characters.

```
string2 : STRING(10);
```

The following defines a string that is exactly ten characters in length; values of which must contain ten characters.

```
string3 : STRING(10) FIXED;
```

Fig. 3. String data types

If no width is specified, the domain is the set of all character sequences, with no constraint on the width of these sequences. The case (upper or lower) of letters within a string is significant. The width expression shall evaluate to a positive integer value. Examples are presented on fig. 3.

Binary data type

The BINARY data type has as its domain sequences of bits, each bit being represented by 0 or 1. A BINARY data type may be defined as either fixed or varying width (number of bits). If it is not specifically defined as fixed width (by using the FIXED reserved word in the definition) the binary data type has varying width. The domain of a fixed width BINARY data type is the set of all bit sequences of exactly the width specified in the type definition. The domain of a varying width BINARY data type is the set of all bit sequences of width less than or equal to the maximum width specified in the type definition. If no width is specified, the domain is the set of all bit sequences, with no constraint on the width of these sequences. The width expression shall evaluate to a positive integer value. The following example (fig. 3) might be used to hold character font information.

```
ENTITY character;
  representation : ARRAY [1:20] OF BINARY (8) FIXED ;
END_ENTITY;
```

Fig. 4. Binary data type

AGGREGATION DATA TYPES

Aggregation data types have as their domains collections of values of a given base data type. These base data type values are called elements of the aggregation collection. EXPRESS provides for the definition of four kinds of aggregation data types (ISO 10303-11):

- ARRAY ,
- LIST ,
- BAG ,
- SET .

An ARRAY is a fixed-size ordered collection. It is indexed by a sequence of integers. A transformation matrix (for geometry) may be defined as an array of arrays (of numbers).

A LIST is a sequence of elements which can be accessed according to their position. The number of elements in a list may vary, and can be constrained by the definition of the data type. The operations of a process plan might be represented as a list. The operations are ordered, and operations can be added to or removed from a process plan.

A BAG is an unordered collection in which duplication is allowed. The number of elements in a bag may vary, and can be constrained by the definition of

the data type. The collection of fasteners used in an assembly problem could be represented as a bag. There might be a number of elements which are equivalent bolts, but which one is used in a particular hole is unimportant.

A SET is an unordered collection of elements in which no two elements are instance equal. The number of elements in a set may vary, and can be constrained by the definition of the data type. The population of people in this world is a set.

Array data type

An array data type has as its domain indexed, fixed-size collections of like elements. The lower and upper bounds, which are integer-valued expressions, define the range of index values, and thus the size of each array collection. An array data type definition may optionally specify that an array value cannot contain duplicate elements. It may also specify that an array value need not contain an element at every index position. This example (fig. 4) shows how a multi-dimensional array is declared.

```

Sectors : ARRAY [ 1 : 10 ] OF          -- first
dimension
        ARRAY [ 11 : 14 ] OF         -- second
dimension
        UNIQUE something;
    
```

Fig. 5. Array data type

The first array has 10 elements of data type ARRAY [11:14] OF UNIQUE something. There is a total of 40 elements of data type something in the attribute named sectors. Within each ARRAY [11:14], no duplicates may occur; however, the same something instance may occur in two different ARRAY [11:14] values within a single value for the attribute named sectors. If the unique keyword is specified, each element in an array value of this data type shall be different from (that is, not instance equal to) every other element in the same array value.

List data type

A LIST data type has as its domain sequences of like elements. The optional lower and upper bounds, which are integer-valued expressions, define the minimum and maximum number of elements that can be held in the collection defined by a LIST data type. A LIST data type definition may optionally specify that a list value cannot contain duplicate elements. This example (fig. 5) defines a list of arrays. The list can contain zero to ten arrays. Each array of ten integers shall be different from all other arrays in a particular list.

```
complex_list : LIST[0:10] OF UNIQUE ARRAY[1:10] OF INTEGER;
```

Fig. 6. List data type

If the unique keyword is specified, each element in a list value of this data type shall be different from (that is, not instance equal to) every other element in the same list value.

Bag data type

A bag data type has as its domain unordered collections of like elements. The optional lower and upper bounds, which are integer-valued expressions, define the minimum and maximum number of elements that can be held in the collection defined by a bag data type. This example (fig. 7) defines an attribute as a bag of point (where point is a named data type assumed to have been declared elsewhere).

```
a_bag_of_points : BAG OF point;
```

Fig. 7. Bag data type1

The value of the attribute named `a_bag_of_points` can contain zero or more points. The same point instance may appear more than once in the value of `a_bag_of_points`. If the value is required to contain at least one element, the specification can provide a lower bound, as in fig. 8.

```
a_bag_of_points : BAG [1:?] OF point;
```

Fig. 8. Bag data type2

The value of the attribute named `a_bag_of_points` now must contain at least one point.

Set data type

A set data type has as its domain unordered collections of like elements. The set data type is a specialization of the bag data type. The optional lower and upper bounds, which are integer-valued expressions, define the minimum and maximum number of elements that can be held in the collection defined by a set data type. The collection defined by set data type shall not contain two or more elements which are instance equal. This example (fig. 9) defines an attribute as a set of points (a named data type assumed to have been declared elsewhere).

```
a_set_of_points : SET OF point;
```

Fig. 9. Set data type1

The attribute named `a_set_of_points` can contain zero or more points. Each point instance (in the set value) is required to be different from every other

point in the set. If the value is required to have no more than 15 points, the specification can provide an upper bound, as in fig. 10.

```
a_set_of_points : SET [0:15] OF point;
```

Fig. 10. Set data type2

The value of the attribute named `a_set_of_points` now may contain no more than 15 points.

NAMED DATA TYPES

The named data types are the data types that may be declared in a formal specification. There are two kinds of named data types: entity data types and defined data types (ISO 10303-11).

Entity data type

Entity data types are established by entity declarations. An entity data type is assigned an entity identifier by the user. An entity data type is referenced by this identifier. This example (fig. 11) uses a point entity data type as the representation of an attribute.

```
ENTITY point;                ENTITY line;
  x, y, z : REAL;            p0, p1 : point;
END_ENTITY;                  END_ENTITY;
```

Fig. 11. Entity data type

The line entity has two attributes named `p0` and `p1`. The data type of each of these attributes is `point`.

Defined data type

Defined data types are declared by type declarations. A defined data type is assigned a type identifier by the user. A defined data type is referenced by this identifier. The following example (fig. 12) is a defined data type used to indicate the units of measure associated with an attribute.

```
TYPE volume = REAL;        ENTITY PART;
END_TYPE;                  ...
                           bulk : volume;
                           END_ENTITY;
```

Fig. 12. Defined data types

The attribute named `bulk` is represented as a real number, but the use of the defined data type, `volume`, helps to clarify the meaning and context of the real

number; i.e., it means volume, rather than some other thing which might be represented by a REAL.

CONSTRUCTED DATA TYPES

There are two kinds of constructed data types in EXPRESS: ENUMERATION data types and SELECT data types. These data types have similar syntactic structures and are used to provide underlying representations of defined data types (ISO 10303-11).

Enumeration data types

An enumeration data type has as its domain an ordered set of names. The extent of this set of names is determined depending on the type of ENUMERATION data type. The following types of ENUMERATION data types are distinguished:

- ENUMERATION that is extensible,
- ENUMERATION that is extending an extensible ENUMERATION, in other words: that is based on an extensible ENUMERATION,
- ENUMERATION that is neither extensible nor extending.

This example uses enumeration data types to show how different kinds of vehicles might travel.

```
TYPE car_can_move = ENUMERATION OF
    (left, right, backward, forward);
END_TYPE;

TYPE plane_can_move = ENUMERATION OF
    (left, right, backward, forward, up, down);
END_TYPE;
```

Fig. 13. Enumeration data type1

```
TYPE colour = EXTENSIBLE ENUMERATION; END_TYPE;

TYPE stop_light = ENUMERATION BASED_ON colour WITH (red,
yellow, green); END_TYPE;

TYPE Canadian_flag = ENUMERATION BASED_ON colour WITH (red,
white); END_TYPE;
```

Fig. 14. Enumeration data type2

The enumeration item left has two independent definitions, one being given by each type of which it is a component. There is no connection between these two definitions of the identifier left. A reference to left or right, by itself, is

ambiguous. To resolve the ambiguity, a reference to either of these values must be qualified by the type name, e.g., `car_can_move.left`. The following EXPRESS results in a single enumeration item named `red` as both `stop_light` and `canadian_flag` extend the domain of `colour`.

Select data type

A SELECT data type defines a data type that enables a choice among several named data types. The SELECT data type is a generalization of these named data types in its domain. The defined type for which the SELECT data type is the underlying representation, may add constraints on its domain by declaring local rules. A SELECT data type may be EXTENSIBLE or not.

Examples:

If `a` and `b` are subtypes of `c` and if they are related by an ANDOR expression, and if there is a data type defined by SELECT (`a`, `b`), then it may be that the value of the SELECT data type is an `a` and a `b` at the same time.

```
TYPE attachment_method = EXTENSIBLE SELECT (nail, screw);
END_TYPE;

TYPE permanent_attachment = SELECT BASED_ON
attachment_method WITH (glue, weld);
END_TYPE;

.....
ENTITY wall_mounting;
  Mounting      : product;
  On            : wall;
  Using        : attachment_method;
END_ENTITY;
```

Fig. 15. Select data type

A `wall_mounting` attaches a `product` onto a `wall` using an attachment method. The initial attachment method describes temporary attachment methods. These methods are then extended to add permanent attachment methods. A value of a `wall_mouting` will have a `using` attribute that is a value of one of `nail`, `screw`, `glue` or `weld`.

GENERALIZED DATA TYPES

The generalized data types are used to specify a generalization of certain other data types, and can only be used in certain very specific contexts. The generic type is a generalization of all data types. The aggregate data type is a generalization of all aggregation data types [1, 2]. The general aggregation data type is a generalization of the aggregation data types that relaxes some of the

constrains normally applied to aggregation data types. A `generic_entity` data type is a generalization of all entity data types and a subtype of the generic data type. The `generic_entity` data type is used to constrain extensible select data types. It is also a valid parameter data type for the formal parameters in functions and procedures and for the type representation of attributes in abstract entity data type declarations (ISO 10303-11).

DATA TYPE USAGE CLASSIFICATION

Data types are used in six different ways in EXPRESS (ISO 10303-11):

- as data types of the elements of aggregation data types;
- as the numbers of a select list in defining or extending a select data type;
- as the underlying types of data types;
- as the data types of attributes of entity data types;
- as the data types of constants;
- as the data types of formal parameters and local variables in functions and procedures.

Data types are classified according to their usage as follows (tab. 1):

- instantiable data types are used as representations aggregation elements and as the data types of constants;
- parameters data types are used as representations for explicit and derived attributes and for formal parameters, function results, and local variables in functions and procedures;
- underlying data types are used as representations for defined data types;
- named data types are used as the members of a select list – the possible representations of a value of the SELECT data type.

Table 1. Use of data types

Type	a	b	c	d
Simple data types	•	•	•	
Aggregation Data Types	•	•	•	
Named Data Types	•	•	• ¹⁾	•
Constructed Data Types			• ¹⁾	
Generalized Data Types		•		

a) Instantiable data types – representation of aggregation elements and constants.
 b) Parameter data types – representation of an explicit or derived attribute, a formal parameter, local variable, or function result.
 c) Underlying data types – representation of a defined type.
 d) Named data types – possible representations of a SELECT data type.
¹⁾only the defined data type from the named data types may be used as an underlying data type.

Instantiable data types: instantiable data types are used as the representations of constants, as the representations of elements of aggregation data types, and as the representations of attributes of non-abstract entity data types.

Parameter data types: parameter data types are used as the representation of attributes of entity data types or as the representation of formal parameters to algorithms (functions and procedures). The parameter data types may also be used to represent the return types of functions and the local variables declared in algorithms.

Underlying data types: underlying data types are used as the representation for defined data types.

CONCLUSION

Express language contains all known and widely used data types. If these predefined types are not sufficient or satisfying, it is possible to create new based on the above. The aim of this article was an explanation of the data types in the EXPRESS language [2]. Data types are one of the foundations of language EXPRESS and therefore their knowledge is needed for my dissertation which is entitled: "Application of the file transfer program data for CNC machines using the EXPRESS language". This is a theoretical basis for my dissertation thesis.

REFERENCES

1. The EXPRESS Definition Language for IFC Development. Available on the Internet: <http://www.civ.utoronto.ca/sect/coneng/i2c/civ1283/civ1283-ref-final/civ1283-basic%20ref/ifc/express-101.pdf> >
2. Michalčík T.: 2010. *Možnosti formátu STEP NC pri programovaní NC strojov*: Diploma thesis. Žilina: Sjf ŽU, 2010. s. 47-54.
3. Xun H., Nee Y. C.: *Advanced design and manufacturing based on STEP*. Springer-Verlag London, 2009, 465.

RODZAJE DANYCH W JĘZYKU EXPRESS

Streszczenie

Zdefiniowane typy danych są dostarczane jako część języka programowania. Każdy atrybut, zmienna lokalna lub parametr formalny ma skojarzony typ danych. Kod źródłowy języka programowania zawiera typy danych, które określają jego możliwości programowania. W oparciu o typy danych z tradycyjnych języków programowania, język EXPRESS wykorzystuje mechanizmy stosowane w technologiach programowania obiektowego, takie jak mechanizm dziedziczenia, który jest używany do opisu procesu produkcyjnego, przy użyciu szerokiego zakresu typów danych.

Słowa kluczowe: typy danych, możliwości programowania, domena.

Note: The solved problem supports a partial solution of EU Operational Programme – Education: “A Flexible and Attractive Study on University of Žilina for Both Employment Market and Knowledge Society Requirements”; Code ITMS 26110230005.

Matúš Košinár, Ivan Kuric ¹⁾

MONITORING OF CNC MACHINE TOOL ACCURACY

Summary: There is an influence between qualitative parameters of machine tools and qualitative parameters of products (tolerances, roughness, etc.). It is very important to hold the stability of qualitative parameters of products as a key factor of production quality. Therefore is also importance to evaluate the accuracy of machine tools and make prediction of possible inaccuracy. The paper deals with aspects of qualitative parameters of machine tools and their influencing on product quality. Several methods of measurement of accuracy of machine tools and monitoring methods will be presented.

Keywords: quality, methods of measurement, parameters of machine tools.

INTRODUCTION

Some CNC machine tools are more accurate and some are less accurate, just as some machines have large travels and some have small ones. This view is partially true. The first step in achieving machine tool accuracy is to ensure proper set up. Second is to provide feedback devices on the slides and spindle that will tell how well the machine is, or is not, operating.

However that machining center is also part of a system. The machine is set up a certain way and run a certain way. It exists within an environment in which the temperature, among other factors, is subject to change. And the machine components dynamically affect one another components and their influence on final accuracy are very complex task. That means all of these components influences contribute to the machine's accuracy, so all of them potentially have to be taken into account.

Quality is perhaps the oldest concept by which a product can be evaluated thus identifying or describes the level of customer satisfaction with the product. The state of a machine tool has an enormous impact on the quality of the piece, on which the machining process takes place. Therefore it is important to keep the machine tool in such conditions, that it will be able to produce parts that meet the demanded accuracy. Very low tolerances or very high quality surface can cause unnecessary production costs, hence a high cost product. Positive is high reliability and long-time use. In contrast, products with low prices have a positive impact on enterprise competitiveness.

In terms of achieving higher precision and better performance, requirements are placed on high stiffness for the machine units. This requires the use of quality

¹ University of Zilina, Department of Automation and Production Systems, Zilina, Slovak Republic.

materials and advanced processing technologies. The economic effect in the rational use of automated systems is given primarily through greater productivity, quality and reliability in producing parts. This can of course ensure the company a competitive advantage.

MACHINE TOOL ACCURACY

Machine tool precision is characterized by the ability of the machine to produce parts of the required geometry and dimensions keeping the required tolerances and to achieve the desired roughness. Requirements for precision of the machine tools result from the required precision of components manufactured on the machine. Because on one machine are usually manufactured different surfaces of a component of different geometric shapes, it is necessary to respect the accuracy of fundamental dimension elements of machine, such as: flatness and straightness of guide surfaces, alignment clamping surfaces, parallelism of axes with guides, the perpendicular shaper required from the spindle axis with the clamping surface of the table, etc. Compliance with the required accuracy of manufacture and assembly of parts and machine nodes can achieve static precision of the machine tools. It is known as geometric accuracy. The geometric accuracy of the machine tool is the precision of shape and position of its individual parts and their mutual movements. It is necessary but not a sufficient condition for ensuring the required precision of the machine tool manufacturing. It depends on the accuracy of the relative shape of the path of the work-piece and tool, ultimately, the accuracy of the shape and surface relative position of the work-piece manufacturing on the machine tool. Initial acceptance conditions for the control of geometric accuracy of machine tools compiled in 1927, Professor on Technical University in Berlin - Charlottenburg dr. Georg Schlesinger. These conditions have been taken in the main features by all industrialized countries and appropriately adjusted for current conditions. These are the basis of ISO, DIN, EN, etc.

Precision machine tool is primarily determined by accuracy of the individual parts and its nodes. Because these parts are produced by conventional machining methods, their dimensions, shapes and relative positions are determined on the drawings by tolerances, which have to be in manufacturing and assembly process precisely observed.

Measuring the linear axis displacement is not enough. While all machine tool builders are trying to build the best possible machine, there are many variables that can be a source of potential errors. For example, the transport itself can cause problems. If the machines are installed at the customer, the dividing changes and assembly may also affect the geometry of the machine tool. Naturally, everyday wear during use causes the machine to losing accuracy. That is why the ISO standard specifies machine tools and forming machines calibration in half-year intervals.

INACCURACY OF MACHINING

In production of machined parts it is not practically possible to produce parts with full precision. The machined parts dimensions are always different from the nominal values mentioned in the design drawings. Relevant deviations are bound with many factors, from which the most important one would be the production process. Some finishing operations allows reaching the nominal dimension, coming very close to it, so the difference between the actual dimension and dimension mentioned in the drawing is very small.

Total inaccuracy of machining can arise from series of factors. Among them, these are the most significant:

- inaccuracies due to elastic deformation of technology system machine - tool - workpiece from the cutting forces and resistances,
- inaccuracies caused by thermal deformations of technological system,
- inaccuracies due to wear and tear of cutting tool,
- inaccuracies of machine sorting and of workpiece material composition,
- inaccuracies due to distortions in the workpiece by clamping forces,
- inaccuracies due to geometric and kinematic machine tool inaccuracies,
- inaccuracies due to geometric irregularities of the cutting tool,
- inaccuracies due to internal stresses in the workpiece material,
- inaccuracies due oscillation in the technological system,
- inaccuracies due to fluctuations of input size parameters of the workpiece and the material inhomogeneity.

From the list above it is possible to state, that the most important factor of machining accuracy is the machine tool and its accuracy.

TESTING MACHINE TOOL

Before a machine tool goes into operation, it's essential to check straightness, linear, and squareness. The two key instruments needed to do this are a ballbar QC20 and a laser XL 80 interferometer. Laser systems apply both static and dynamic tests. The static tests include basic measurements such as linear and squareness. The dynamic tests evaluate positioning error. There are laser alignment systems and laser interferometers. The alignment system checks only static conditions. A laser shines a beam on a calibrated target and where the beam strikes the target determines error. The interferometer does both static and dynamic tests. In either operation, a laser beam is bounced off a reflector, and the system electronics compare the outgoing and incoming beam to determine such things as distance and rotation. The ballbar QC20 is an instrument that evaluates the volumetric accuracy of a machine tool. One end is attached by a magnetic coupling to a point on the machine tool worktable, the other end to the spindle. The machine is programmed to follow a circular path. As the spindle moves, any variation from a

constant radius forces the ballbar QC20 to extend or retract. Any deviation from the programmed radius is measured via the extensions and retractions. The resulting signal is transmitted to a computer or other recording device. Earlier ballbar QC20 systems required the user to interpret the plot. This task is now becoming easier. Readings from these tests may require anything from a slight adjustment to a major rework of some machine tool element. In some cases, the errors can be factored out by allowing for them in the programming.

CNC machine TOOLS diagnostics

Machine tools condition monitoring is main prerequisite for maintaining production quality as well as necessary requirement in quality control systems according to ISO 9001 standards. Obsolete machinery preventive geometry according to production wasters is obsolete. Current tendency is to foresee - predict machinery condition and ensure production quality accordingly. Following this it is possible to ensure satisfactory production even on machinery with worse characteristics.

This provides monitoring by decreasing machinery service costs and at the same time maintains high production quality by means of NC and CNC machinery diagnostics. This is applied throughout our customer base especially companies working in machinery industry.

Registry is being compiled from performed measurements which gives us continual view of machinery development. Which particular machine tool is capable of fulfilling requirements for manufacturing accuracy can be assessed with use of this registry. With this classification and its periodical repeating is possible to decrease scrap costs coming from allocating product to particular machine. By observing development trend of manufacture accuracy is possible to schedule machinery maintenance/repair before major malfunction occurs. This will significantly decrease costs caused by machinery breakdowns. Customer gets overview of his machine pool accuracy including machinery accuracy protocols according to ISO 9001 standards.

Technical diagnostics can be divided from the viewpoint of complex solution to the following:

- discovery of rising malfunction – detection,
- assigning of defective unit or node – localization,
- prognosis of remaining operating life – prediction.

The technical diagnostics has the following aspects:

- very high assurance and reliability with perspective on prolongation of maintenance cycles and reduction of further damage,
- objective technical condition must be determined without dismounting and operation discontinuation,
- evaluation must be done based on reliability of whole machine system.

Diagnostics from the viewpoint of machinery is known as:

- preassembly diagnostics,
- diagnostics after final assembly - during debugging and final inspection,
- operating time diagnostics - service, inspectional or monitoring.

It is possible to meet with the following types of diagnostics:

- vibrodiagnostics,
- tribodiagnosics,
- thermography,
- acoustics,
- geometric parameters.

DIAGNOSTICS USING LASER XL80 AND BALLBAR QC20

Laser XL80

The Renishaw XL laser measurement system enables the complete calibration of machine tools and other position sensitive systems, allowing the measurement of a wide range of geometric and dynamic machine characteristics and has many applications in scientific and engineering research. This is so far the most accurate machinery diagnostics.

Machine geometry can be checked up with this measurement (perpendicularity, straightness, flatness, cross clearance, backlash, gauge adjustment). It depends all on the used optics.



Fig. 1. Laser optics XL80

Measuring is always carried out on unloaded machine. Measuring period depend on machine type and number of measured planes.

Protocol is compiled from actual measurement and contains:

- graphical representation of error behaviour along measured axis length,
- table of measured data,
- machine`s condition evaluation,
- recommendations on found faults.

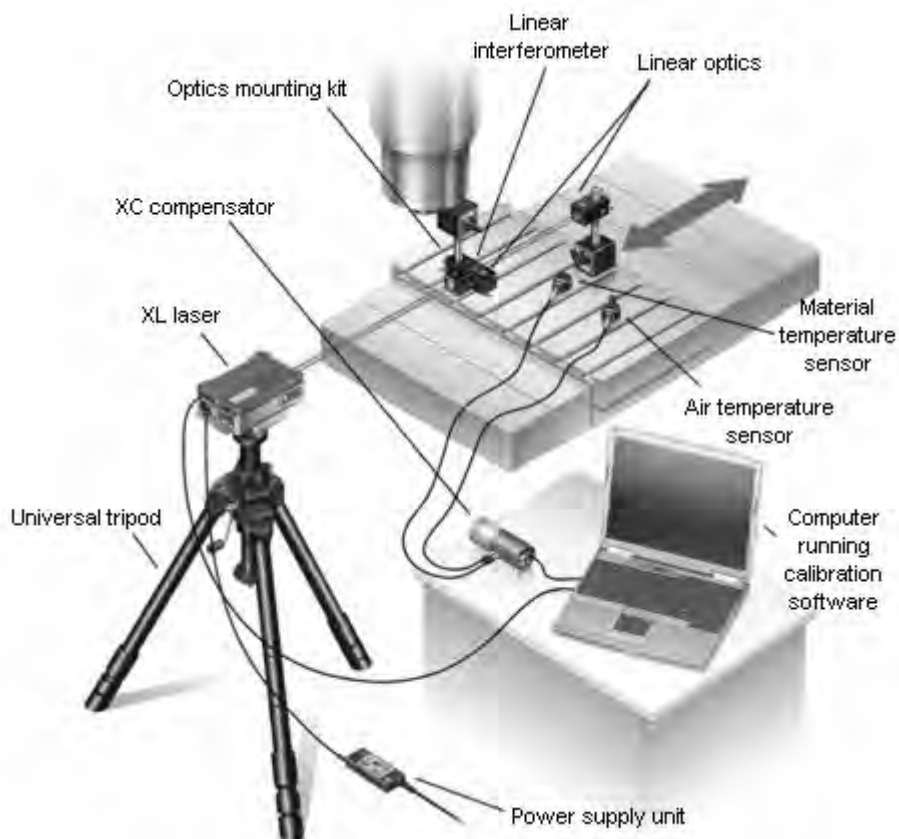


Fig. 2. Measurement using Laser interferometer

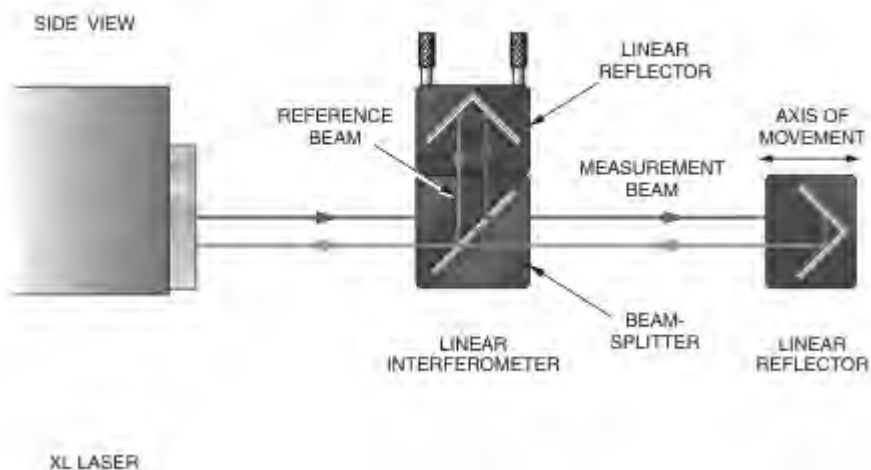


Fig. 3. Principle of measurement

Measurement of gauge adjustment including corrections: the beam from the XL Laser enters the linear interferometer, where it is split into two beams. One beam (known as the reference beam) is directed to the reflector attached to the beam-splitter, while the second beam (the measurement beam) passes through the beam-splitter to the second reflector. Both beams are then reflected back to the beam-splitter where they are re-combined and directed back to the laser head where a detector within the head monitors the interference between the two beams.

Captured data can be analysed in accordance with a number of international standards (fig. 4). Individual international standards describe the method required for collecting and analysing data, with various factors, such as the number of target positions required, varying depending on the standard used and machine type being tested. When carrying out any analysis of captured data, ensure the analysis you select is suitable for the type of machine you are testing and your test requirements. Data capture is carried out by moving the machine to a number of different positions (or 'targets') along the axis under test and measuring the machine's error. You can write a part program to drive the machine from one target position to the next, pausing for a few seconds at each target position. Measurements are taken during each pause. When choosing the target positions for a calibration of a machine's axis, the target positions should usually span the working zone of the axis.

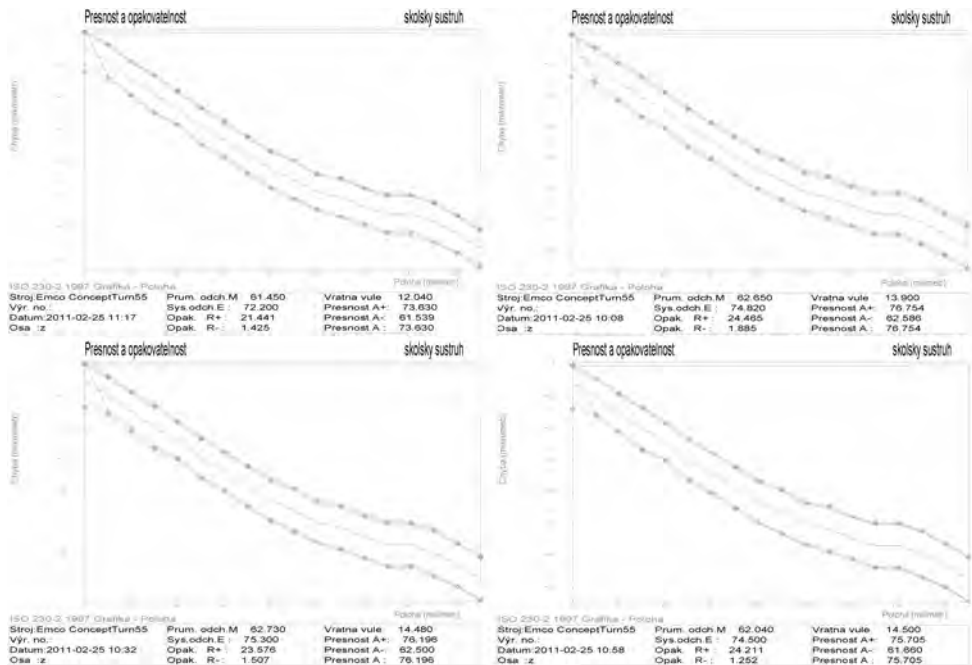


Fig. 4. Evaluation of the result at various velocities machining

Ballbar QC20

The Renishaw Ballbar QC20 and software is used to measure geometric errors present in a CNC machine tool and detect inaccuracies induced by its controller and servo drive systems. If the machine had no errors, the plotted data would show a perfect circle. The presence of any errors will distort this circle, for example, by adding peaks along its circumference and possibly making it more elliptical. These deviations from a perfect circle reveal problems and inaccuracies in the numerical control, drive servos and the machine's axes. During the data capture session, the Ballbar moves in a clockwise and counter-clockwise direction through 360° data capture arcs with 180° overshoot arcs. The items of hardware that you will use during your test with a QC20-W ballbar are shown in the figure 5.

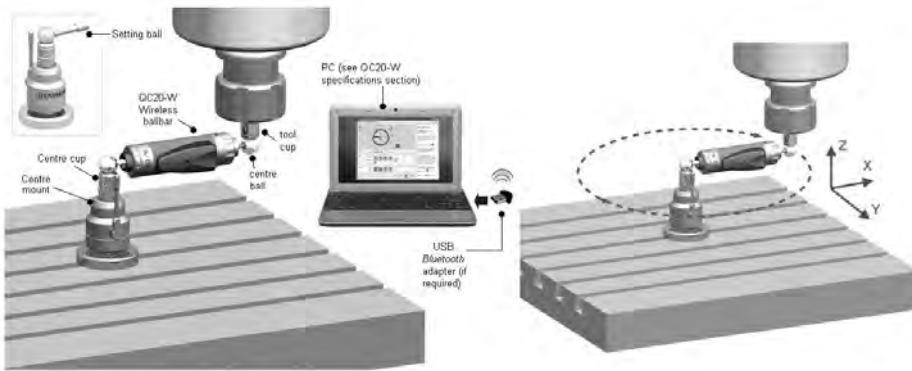


Fig. 5. The items of hardware Ballbar QC20

The QC20-W allows machine calibrations to be conducted in the XY, ZX and YZ planes without having to setup and re-centre the machine between each test. Therefore, with one setup, machine volumetric performance can be evaluated using the volumetric analysis software. Renishaw diagnostics can be performed on data captured from the three planes, allowing machine errors to be diagnosed.

The Ballbar 20 software can automatically analyse 360° and 220° ballbar plots and diagnose machine errors (fig. 6).

Plot errors can be caused by machine errors and test errors. Machine errors are errors or faults in the machine under test. Test errors are errors or faults in either the ballbar or the way the test was carried out.

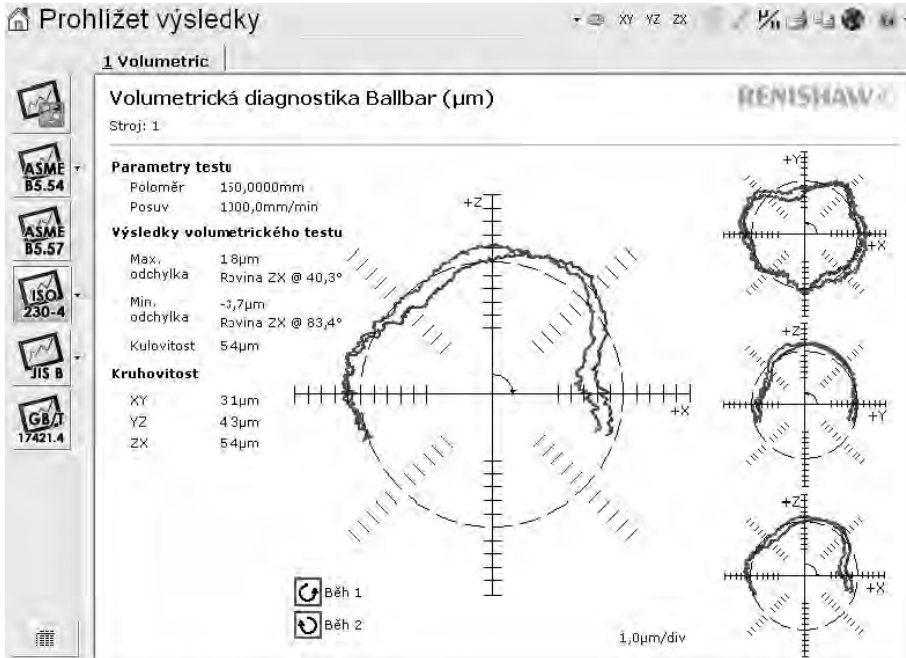


Fig. 6. Background software ballbar

CONCLUSION

For each methods of machine tool diagnose must follow certain procedures – measurement a methodology and evaluation. Proper technical diagnosis is provided high security and reliability with a view to extended maintenance cycles and limiting consequential damages. Objective technical status should be determined without dismantling and disruption. Determination of inaccuracy of CNC machine tool is very complex task. There is a lot of confluences in the machine tool as all components and nods have some inaccuracy.

The quality of every component produced on a CNC machine is highly dependent on the machine's performance. Many inspection procedures take place after the component is produced. This is too late. To avoid scrap it is better to check the machine before cutting any metal. Determining a machine tool's capabilities before machining, and subsequent post-process part inspection, can greatly reduce the potential for scrap, machine downtime and as a result, lower manufacturing costs. It doesn't matter if your machine is new or old, all have errors. Process control and improvement is the key to raising quality and productivity.

REFERENCES

1. Demeč, P.: Presnosť obrábacích strojov a jej matematické modelovanie, Viena Košice, 2001.
2. Pilc, J., Čilliková, M.: Trendy vývoja výrobných techník, Edis Žilina, 2004.
3. Kuric, I., Novák-Marcinčin, J., Cotetiu, R., Ungureanu, N.: Development of Progressive Technologies - Computer Support for Progressive Technologies. Vienna 2007, s.253.
4. Cotetiu, R., Kuric, I., Marcinčin, J., Ungureanu, N.: New Trend in Mechanical Design and Technologies. RISOPRINT Cluj Napoca Publisher 2005 , 210p.
5. Košinár, M.: Analýza presnosti obrábacieho stroja v rôznych miestach pracovného stola, ŽU Žilina, 2009.
6. Košinár, M. – Kuric, I.: Hodnotenie a metodika pre meranie obrábacích strojov. 11th International Conference „Automation in Production Planning and Manufacturing“ Turčianske Teplice, 2010.
7. Svoboda, O.: Volumetric positioning accuracy of a vertical machining center equipped with linear motor drives. 1 Research center of Manufacturing Technology, Czech Technical University in Prague.
8. Aronson, Robert B: Monitoring the machine. Manufacturing Engineering, May 1995,
9. Renishaw help - Laser XL and Ballbar QC20.

MONITOROWANIE DOKŁADNOŚCI OBRABIAREK CNC

Streszczenie

Występuje wyraźny związek między parametrami jakościowymi obrabiarek i parametrów jakościowymi produktów (tolerancja, chropowatość, itp.). W związku z tym bardzo ważne jest, aby trzymać stabilność wskaźników jakościowych produktów, będącej kluczem do jakości produkcji. Wynika z tego, że równie ważna jest ocena dokładności obrabiarek i narzędzi oraz możliwość prognozowania możliwości wystąpienia niedokładności. W artykule omówiono aspekty parametrów jakościowych obrabiarek i ich wpływ na jakość produktów, a także przedstawiono kilka metod pomiaru dokładności obrabiarek oraz metod monitorowania.

Słowa kluczowe: jakość, metody pomiaru, parametry obrabiarek.

Magdalena Olszewska, Adam Gąska ¹⁾

PORÓWNANIE RÓŻNYCH URZĄDZEŃ METROLOGICZNYCH WYKORZYSTYWANYCH W ZASTOSOWANIACH BIOMEDYCZNYCH

Streszczenie: Postęp w zaawansowanych technikach pomiarowych umożliwia tworzenie coraz to nowszych metod diagnostycznych w medycynie. W celu prawidłowego zdiagnozowania choroby, należy rozpatrzeć zarówno wewnętrzną strukturę narządów jak i ich budowę zewnętrzną poprzez określenie parametrów geometrycznych, wysokości, szerokości itp. Dlatego też szczególną uwagę należy zwrócić na urządzenia metrologiczne, które odgrywają sporą rolę w medycynie. Autorzy w pracy przedstawili wykorzystanie Współrzędnościowych Maszyn Pomiarowych (WMP) i Współrzędnościowych Ramion Pomiarowych (WRP) w ustaleniu struktury zewnętrznej, wymiarów oraz kształtu mierzonego obiektu (część kości i stawów). Przedstawione także zostało wykorzystanie tomografu komputerowego (TK) w zastosowaniach medycznych, a następnie zestawiono porównane wyniki pomiarów otrzymane na poszczególnych urządzeniach. Autorzy w pracy zwracają uwagę również na praktyczne znaczenie wyników pomiarów uzyskanych za pomocą tomografu komputerowego.

Słowa kluczowe: tomograf, ramię pomiarowe, WMP.

WSTĘP

Metrologia jest nauką, która rozwiązuje problemy dotyczące pomiarów z niemal wszystkich dziedzin nauk: technicznych, środowiskowych i medycznych. Obecnie istnieje coraz więcej zastosowań w metrologii biomedycznej i związanych z nią pomiarów geometrii narządów wewnętrznych istot żywych. Dlatego istnieje potrzeba skoncentrowania się na możliwościach, jakie daje metrologia biomedyczna. Postęp w zaawansowanych technikach pomiarowych umożliwia tworzenie coraz to nowszych metod diagnostycznych w medycynie. W celu prawidłowego zdiagnozowania choroby, należy poznać wewnętrzną i zewnętrzną strukturę narządów, ich parametry geometryczne, szerokość, wysokość, itp. W tym punkcie, szczególnie znacząca jest współpraca pomiędzy metrologią współrzędnościową i medycyną. Urządzenia metrologiczne mogą być z powodzeniem zastosowane w celach diagnostycznych w medycynie. Dzięki współrzędnościowym maszynom pomiarowym (WMP) i współrzędnościowym ramionom pomiarowym (WRP) możliwe jest określenie zewnętrznych konstrukcji, wymiarów i kształtu mierzonego obiektu (na przykład część kości lub stawów). W przypadku, gdy jest to niemożliwe lub nie zaleca się stosowania mierzenia obiektów za po-

¹ Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, Politechnika Krakowska

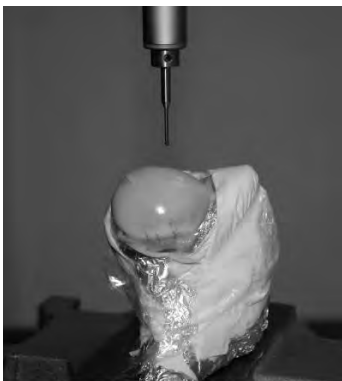
mocą sond stykowych, mogą one również wykonywać pomiary w sposób optyczny, bez fizycznego kontaktu z badanym obiektem. Tomografy komputerowe (TK), oprócz możliwości pomiaru zewnętrznej powierzchni narządu mogą także wykonywać pomiary jego wewnętrznej struktury [3].

W niniejszym artykule przedstawiony został opis i metodologia wykorzystania wspomnianych urządzeń. Ich zastosowanie zostanie zaprezentowane na przykładzie rzeczywistych pomiarów medycznych. W dalszej części artykułu przedstawione zostanie również porównanie wyników pomiarów uzyskanych na poszczególnych urządzeniach. Oprócz tego, artykuł dotyczy kwestii związanych z praktycznym znaczeniem wyników uzyskanych z pomiarów TK, tak więc poruszone zostaną problemy związane z odwzorowania kształtu i jego dokładnością. Głównym celem przeprowadzonych badań jest porównanie różnych urządzeń metrologicznych w zastosowaniach biomedycznych i ustalenie, które z nich najlepiej sprawdzają się w poszczególnych zadaniach pomiarowych. Celem tych badań jest również porównanie dokładności pomiarów wykonywanych za pomocą różnych urządzeń metrologicznych.

URZĄDZENIA METROLOGICZNE WYKORZYSTYWANE W ZASTOSOWANIACH MEDYCZNYCH

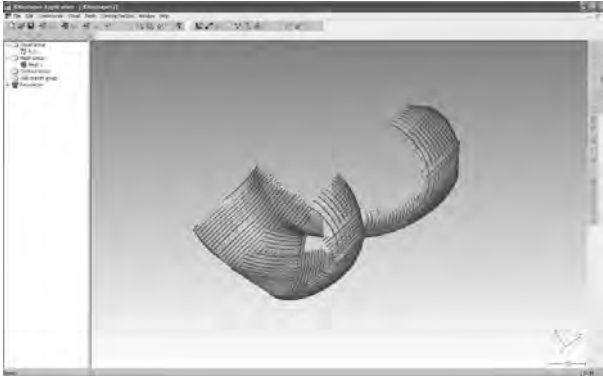
Współrzędnościowe maszyny pomiarowe

Podstawowym narzędziem współrzędnościowej techniki pomiarowej są maszyny pomiarowe, w których strukturze kinematycznej można wyróżnić trzy kinematyczne pary przesuwne we wzajemnie prostopadłych kierunkach (x, y, z w układzie kartezjańskim). Maszyny te mogą być również wykorzystywane w zastosowaniach biomedycznych, a ich dokładność jest najmocniejszym punktem takich pomiarów. Niektóre z nich (na przykład maszyna Leitz PMM 12106, której praktyczne zastosowania będą przedstawione w tym artykule) dają możliwość pomiaru obiektów z niepewnością niższą niż 1 μm . Możliwe jest również skanowanie powierzchni mierzonej za pomocą sondy skanującej.



Rys. 1. Pomiar przeprowadzono na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Leitz 12106
Fig. 1. Measurement of joint performed on Leitz 12106

Pomiar stawu kolanowego poprzez skanowanie wybranych powierzchni, przeprowadzono na Leitz 12106 PMM, której równanie niepewności wynosi: $U=0,8+L/400$ [μm]. Wyniki pomiarów następnie przeanalizowano w programie 3DReshaper. Wyniki otrzymane za pomocą WMP są najdokładniejsze biorąc pod uwagę wszystkie urządzenia przedstawione w tym artykule i dlatego też zostały one potraktowane jako wyniki odniesienia. Na rys. 2 zaprezentowane zostały wyniki pomiarów na WMP w postaci punktów kontrolnych i linii tworzących powierzchnie odniesienia modelu 3D kłycki kolana.



Rys. 2. Punkty pomiarowe uzyskane z pomiaru na WMP oraz model powierzchni kłycki kolana uzyskany z tych punktów.

Fig. 2. Measuring points performed on CMM and the surface of knee condyles

Współrzędnościowe Ramiona Pomiarowe

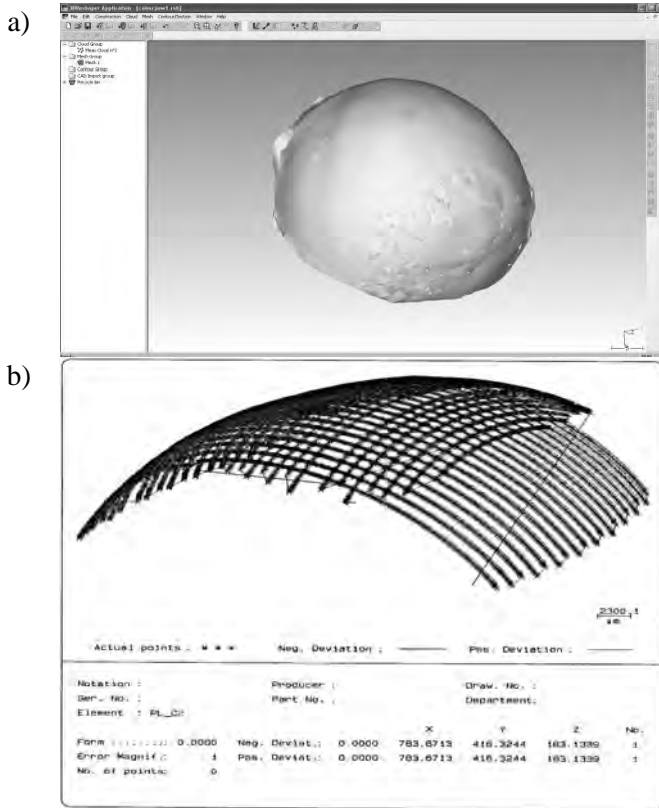
Współrzędnościowe Ramiona Pomiarowe są urządzeniami pomiarowymi wyposażonymi w kilka osi obrotowych (zwykle sześć), w każdej osi znajduje się enkoder mierzący kąt obrotu pary kinematycznej. Współrzędnościowe Ramiona Pomiarowe umożliwiają zarówno pomiary dotykowe, jak również pomiary optyczne (dzięki skanującym głowicom jak: G-SCAN lub RX2 Scan). Wyniki pomiarów stawu biodrowego wykonanych na WRP wyposażoną w głowicę RX2 Scan (rys. 3) porównano z innymi metodami.



Rys. 3. Pomiary wykonane na ramieniu Omega z pomocą skanującej głowicy RX2 Scan

Fig. 3. Measurements performed on Omega Arm with use of scanning head RX2 Scan

Przykładowe wyniki pomiarów stawu biodrowego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. a) powierzchnia będąca wynikiem pomiarów na ramieniu Omega z wykorzystaniem głowicy skanin-gowej RX2 Scan, b) punkty uzyskane przez skanowanie na maszynie Leitz PMM 12106

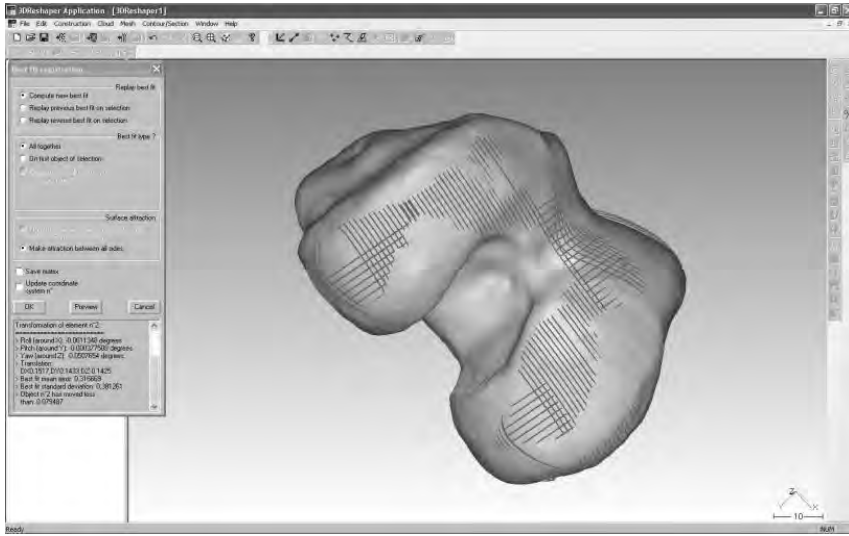
Fig. 4. a) surface being a result of measurements performed on Omega Arm with use of scanning head RX2 Scan, b) points obtained by scanning on Leitz PMM 12106 machine

Tomografia komputerowa

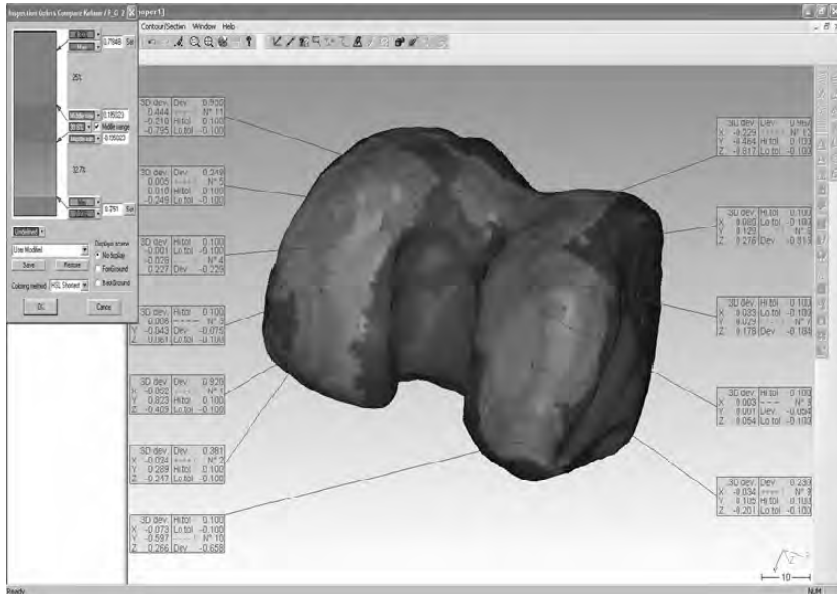
Tomografia komputerowa jest jedną z najnowszych technik diagnostycznych. Jest szczególnie ważna ze względu na coraz powszechniejsze jej zastosowanie w celach medycznych oraz przemysłowych. W obu z tych zastosowań tomografia komputerowa pozwala na kontrolę nie tylko parametrów geometrycznych przedmiotu, ale również umożliwia wnikięcie do wnętrza badanego obiektu i ocenę jego struktury wewnętrznej [1].

Z zastosowaniem TK dokonano pomiarów stawu kolanowego. Modele CAD kolana zostały wygenerowane za pomocą oprogramowania Amira i porównane z innymi metodami pomiarowymi omawianymi w artykule. Wyniki tego porównania przedstawione zostały na rys. 5 i rys.6.

Mapa odchyłości dokładności odwzorowania kształtu uzyskanego poprzez badania TK została przedstawiona na rysunku 6. Odchyłka dopasowania do powierzchni w 80% nie przekracza $\pm 0,5\text{mm}$. Maksymalne wartości (do $\pm 3\text{ mm}$) miały miejsce w obszarze skrzyżowania obu powierzchni kłykci i na czubkach kłykci.



Rys. 5. Staw kolonowy - nałożenie punktów pomiarowych z WMP na powierzchnię uzyskaną na podstawie pomiarów TK poprzez użycie metody "najlepszego dopasowania"
Fig. 5. Knee-joint - the imposition of measuring points from CMM on the surface obtained from measurements on CT using the 'best fit' method



Rys. 6. Staw kolonowy - mapy odchyleń odwzorowania kształtu jako porównanie nałożenia powierzchni uzyskanej w wyniku badania TK na powierzchnię referencyjną (otrzymaną poprzez pomiar na WMP)

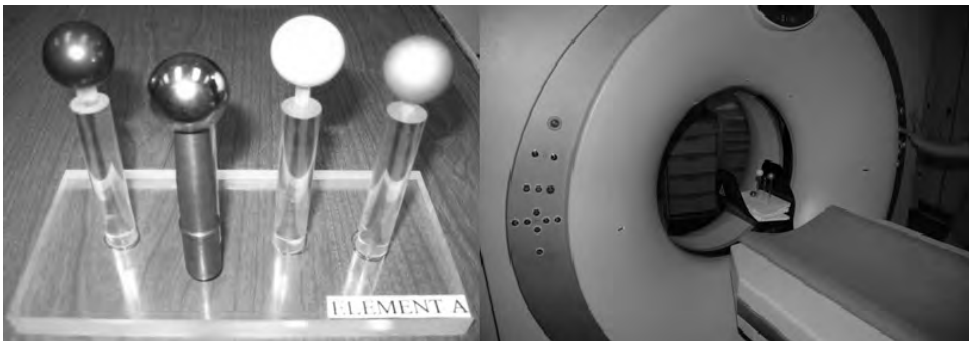
Fig. 6. Knee-joint – the map of deviations of shape mapping as the comparison of the imposition of the surface derived from the CT studies with the surface obtained from studies on CMM

DOKŁADNOŚĆ ODWZOROWANIA KSZTAŁTU

Problem oceny dokładności odwzorowania kształtu bioelementów, szczególnie chrząstek i tkanek kostnych i ich struktury wewnętrznej jest niezwykle ważny. Naukowcy starają się zgłębić ten problem od wielu lat w różnych dziedzinach. Najnowsze techniki odwzorowywania takie jak, spiralna tomografia komputerowa (STK) i rezonans magnetyczny (RM) częściowo rozwiązują ten problem, ale opis geometrii stwarza nadal wiele problemów. Techniki te nie umożliwiają, przy zachowaniu określonych przedziałów niepewności pomiaru, jednoczesnego wyznaczenia geometrii struktury kości i chrząstki w całym obszarze badań. Zagadnienie to jest szczególnie istotne dla oceny stopnia zaawansowania choroby zwyrodnieniowej stawów [2, 4]. Została zaproponowana nowa metoda oceny dokładności odwzorowania kształtu za pomocą wskaźników syntetycznych, która zostanie pokrótce przedstawiona poniżej.

Analiza dokładności odwzorowania kształtu za pomocą kulki ceramicznej

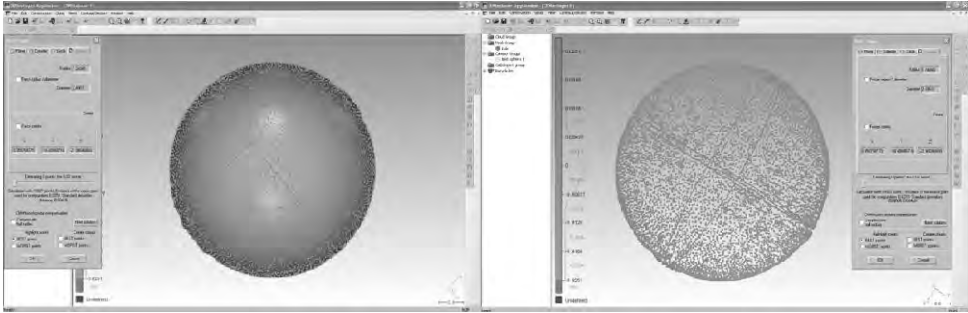
Analizę dokładności odwzorowania kształtu za pomocą tomografii komputerowej (CT) przeprowadzono dla dwóch przypadków: bazując na ceramicznej kulce referencyjnej (rys. 7) i naturalnym wzorcu - stawie kolanowym. Poniżej przedstawiono wyniki pierwszej z wymienionych wcześniej analiz.



Rys. 7. Referencyjne kulki odniesienia i ich badanie z użyciem tomografii komputerowej
Fig. 7. Reference balls and their test using computer tomography

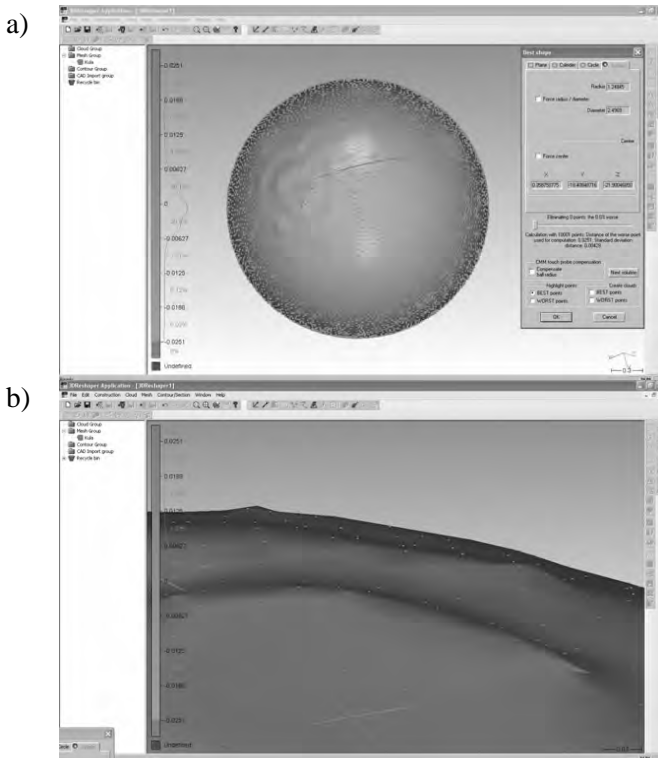
Strategia pomiarowa zawiera serię 3 cykli pomiarowych, a dla kulek ponadto dodatkowe pomiary w dwóch prostopadłych kierunkach. Pomiary były wykonywane na TK (rys. 7). Ocena dokładności odwzorowania kształtu kuli została przeprowadzona w oparciu o numeryczny wzorec sfery [4].

W przypadku pomiarów naturalnych artefaktów pomiary przeprowadzono na tomografie Siemens i na współrzędnościowej maszyny pomiarowej (WMP).



Rys. 8. Odchylenie odwzorowania powierzchni ceramicznych kulek referencyjnych wynikających z błędów pomiaru przeprowadzonych przy użyciu tomografii komputerowej w widoku bocznym i transparentnym.

Fig. 8. Mapping deviations of the surface of ceramic reference ball resulting from the errors of measurement performed on computer tomography in the side view and transparent view.



Rys. 9. a) Odchylenia odwzorowanie powierzchni ceramicznych kulek referencyjnych wynikających z błędów pomiaru promienia wykonywane na TK - widok w centrum polarnym TK, b) faliste powierzchnie modelu 3D w pobliżu bieguna CT.

Fig. 9. a) Mapping deviations of the surface of ceramic reference ball resulting from the errors of measurement of the radius performed on computer tomography - a view in the polar axis of CT, b) wavy surface on the 3D model in the vicinity of the pole CT

Do oceny dokładności odwzorowania stawu kolanego wykorzystano technikę TK, element odniesienia został opracowany na podstawie wyników pomiarów na WMP. Wyniki badań tomografii oraz analiza dokładności odwzorowania

kształtu opracowano za pomocą metody "najlepszego dopasowania" w programie 3D Reshaper. Wyniki pomiarów zostały przedstawione jako: odchylenia odwzorowania powierzchni ceramicznych kulek referencyjnych wynikających z błędów pomiaru przeprowadzonych z wykorzystaniem tomografii komputerowej (rys. 8), odchylenia odwzorowania powierzchni ceramicznych kulek odniesienia wynikające z błędów pomiarów promienia wykonane na tomografii komputerowej (rys. 9). Rysunek 9b przedstawia również falistą powierzchnię na modelu 3D, który został uzyskany w pobliżu bieguna tomografu komputerowego.

Badania pozwalają na stwierdzenie, że dla 90,7% wyników błąd pomiarowy promienia kuli przy użyciu TK znajduje się w zakresie $\pm 0,063\text{mm}$, a dla 98,5% mieści się w $\pm 0,125\text{mm}$. Odchylenie standardowe wynosi $0,0428\text{mm}$, a średnia wartość średnicy kuli 24.969mm .

WNIOSKI

Przedstawione wyniki pokazują, że rozwój technik współrzędnych pozwala na pomiary i analizę narządów ludzkich w bardziej komfortowy sposób. Dzięki narzędziom pomiarowym oraz nowoczesnym rozwiązaniom w zakresie oprogramowania możliwa jest analiza dokładności odwzorowania kształtu różnych bioelementów z wykorzystaniem różnych rodzajów technik. Najczęstszym odwzorowaniem elementów w medycynie jak do tej pory były i nadal są metody związane z zastosowaniem tomografu. Głównym powodem tej sytuacji jest to, że TK pozwala na pomiar obiektów w sposób bezinwazyjny, a także pozwala diagnozować wewnętrzne struktury mierzonych narządów.

Dlatego też dokładność odwzorowania kształtu przy wykorzystaniu TK jest tak ważna. Autorzy przedstawili sposób szacowania tej dokładności. Opracowany system pozwala na ocenę urządzeń opartych na TK i do określenia jakości całego urządzenia opartego na dominacji parametrów lub właściwości, w odniesieniu do ich funkcji albo według niektórych zespołów. Jednocześnie system ten może być użyty do porównania liczby urządzeń funkcjonalnie podobnych z punktu widzenia wybranych cech lub charakterystyk. Określenie wskaźników syntetycznych pozwala na wyznaczenie wpływu wybranych parametrów (geometrycznych lub kinematycznych) na analizowane cechy użytkowe. System ma budowę modułową, może współpracować z każdym urządzeniem pomiarowym wyposażonym w interfejs umożliwiający przesyłanie danych do komputerowej kontroli i oceny urządzenia.

PIŚMIENNICTWO

1. Cierniak R.: Computed Tomography. Algorithms of reconstruction, Warsaw 2005.
2. Flohr T.et all.: Perfomance evolution of a 64 slice CT system with z-flying focal spot. Fortschr. Rbntgenstr 2004, 176 1803-1820.

3. Hofer M.: Teaching Manual of color duplex tomography, 2nd edition, Tieme, New York 2004.
4. Ryniewicz A.: Traceability needs for geometrical identification of form of biobearing working surface and defect of joint cartilage. Wydział ELSEVIER MEASUREMENT ISSN 0263-2241, vol. 42. nr 10, 2009, page 1463-1469, meas. nr 1198.

COMPARISON OF DIFFERENT METROLOGICAL DEVICES USED IN BIOMEDICAL APPLICATIONS

Summary

Thanks to the progress in examination of human body, it is possible to create new methods of diagnostics. To diagnose diseases properly, one should recognize the internal and external structure of organs, their geometrical parameters, width, height, etc. And this is a place, in which cooperation between coordinate metrology and medicine is the most strong. Metrological devices could be used in this area, in a variety of uses. Paper shows usage of Coordinate Measuring Machines (CMM) and Coordinate Measuring Arms (CMA) in determination of external structure, dimensions and shape of measured objects (part of bones and joints). Also use of Computed Tomographs (CT) in medical applications will be presented. Then the comparison of results of measurements performed on each device will be made. Apart from this, article puts attention on practical meaning of results obtained from CT measurements. Problem of the shape mapping and its accuracy will also be discussed.

Keywords: tomography, measuring arm, CMM.

Mateusz Kania ¹⁾, Mirosław Ferdynus ²⁾

WIRTUALNE PROTOTYPOWANIE UKŁADU STEROWANIA POCHYLANIA I PRZECHYLANIA ŚMIGŁOWCA JEDNOWIR- NIKOWEGO W UKŁADZIE KLASYCZNYM

Streszczenie: W publikacji przedstawiono wirtualny prototyp układu sterowania śmigłowcem w aspekcie jego pochylenia i przechylenia. Model daje możliwość wszechstronnych badań bez konieczności budowy rzeczywistego prototypu.

Słowa kluczowe: Sterowanie, śmigłowiec, układ sterownia, CatiaV5, wirtualne prototypowanie.

WSTĘP

W śmigłowcu występuje szereg układów, których zadaniem jest udział w realizacji funkcji sterowania. Śmigłowiec jako obiekt techniczny podczas lotu posiada sześć stopni swobody, co sprawia, że sterowanie jego ruchem jest niezwykle skomplikowane. Podstawowym układem sterowania jest układ sterownia lotem. Opracowanie mechanizmu sterowania skokiem cyklicznym jest związane z nazwiskiem B.N. Juriewa - rosyjskiego inżyniera, który w znacznym stopniu przyczynił się do rozwoju techniki i teorii śmigłowca [2]. Układ sterowania analizowany w tej publikacji przeznaczony jest dla śmigłowców jednowirnikowych w układzie klasycznym dla wirnika przegubowego.

Celem publikacji jest przedstawienie analizy wirtualnego prototypu układu sterownia śmigłowca z możliwością analizy odpowiedzi układu łopat wirnika na cykliczną zmianę kąta nastawienia.

Sterowanie lotem śmigłowca jednowirnikowego realizuje się poprzez zmianę sił i momentów działających na statek podczas lotu względem trzech osi. W prezentowanym modelu badany jest układ sterowania tylko dla dwóch osi to jest podłużnej i poprzecznej [1, 2]. Sterowanie podłużne realizowane jest poprzez przemieszczanie sterownicy ręcznej w tym samym kierunku. Skutkuje to zmianą skoku cyklicznego, powodując zmianę kąta nachylenia siły wypadkowej na wirniku nośnym w kierunku podłużnym. Zmianę składowej siły wirnika nośnego w opisywanym kierunku określa wzór:

$$F_{hx} = a_1 \cdot T \quad (1)$$

¹ Politechnika Lubelska, Koło Naukowe Komputerowego Wspomagania Prac Projektowych oraz Instytut Lotnictwa w Warszawie, Engineering Design Center, Customer Support Engineering

² Politechnika Lubelska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

gdzie: F_{hx} -składowa ciągu wirnika w opisywanej płaszczyźnie, a_1 - kąt pochylenia stożka wirnika nośnego, T - całkowity ciąg wirnika.

Zadanie tych wymuszeń skutkuje również powstaniem momentu pochylającego na wirniku nośnym oraz zmianą momentu wypadkowego względem osi poprzecznej. Sterowanie podłużne zmienia kąt pochylenia i zadarcia śmigłowca. Sterowanie poprzeczne realizowane jest poprzez przemieszczanie drążka pilota na boki. Skutkuje to zmianą skoku cyklicznego powodując zmianę kąta nachylenia siły wypadkowej na wirniku nośnym w kierunku poprzecznym. Składowa siły ciągu wirnika nośnego w kierunku poprzecznym wyraża się wzorem:

$$F_{hy} = b_1 \cdot T \quad (2)$$

gdzie b_1 - kąt pochylenia stożka wirnika nośnego.

Powstanie momentu przechylającego na wirniku nośnym wywołuje zmianę momentu wypadkowego względem osi podłużnej. Sterowanie poprzeczne zmienia kąt przechylenia śmigłowca.

Głównym zadaniem układu sterownia jest jak najdokładniejsze przeniesienie kinematyki ruchu pomiędzy sterownicami pilota a dźwigniami sterującymi na łopatach wirnika nośnego. Bardzo ważną funkcją jest również wspomaganie pilota w sterowaniu trajektorią lotu oraz utrzymaniu stabilizacji śmigłowca w przestrzeni [2, 3].

Sterowanie śmigłowcem może być realizowane za pomocą sztywnego układu popychaczy, układu elastycznego z wykorzystaniem linek, sterowania elektrycznego za pomocą siłowników, nazywanego układem Fly-by-Wire lub światłowodów nazywanego Fly-by-Light [4]. W opracowanym modelu został utworzony klasyczny układ sterowania składający się z drążka sterowania umieszczonego w kabinie pilota, popychaczy i tarczy sterującej. Głównym elementem układu jest mechanizm tarczy sterującej, składający się m.in. z dwóch pierścieni. Dolny pierścień nie obraca się, lecz może przechylać się w dowolnym kierunku zadawanym przez pilota za pomocą drążka sterowania cyklicznego. Górny pierścień obraca się wraz z wałem wirnika w taki sposób, że jest on zawsze równoległy do pierścienia dolnego. Pierścień górny jest połączony z łopatom za pomocą popychaczy i dźwigni przekręceń łopat. Przechylenie tarczy sterującej powoduje zmianę kąta nastawienia łopaty, co daje ruch łopaty względem przegubu osiowego. Przy obrocie wirnika, łopaty zmieniają kąt nastawienia cyklicznie raz na obrót, co daje możliwość zmiany wartości siły nośnej na profilu łopaty. Zmiana ta wpływa na kierunek wektora ciągu całego wirnika nośnego, co umożliwia sterowanie kierunkowe statku powietrznego w locie. Oś prostopadła do płaszczyzny pierścieni tarczy sterującej i przechodząca przez środek piasty nazywa się osią sterowania.

Podczas prototypowania jednym z głównych problemów wpływających na konstrukcję układu sterownia jest masa startowa śmigłowca. Wzrost ciężaru startowego śmigłowca powoduje wzrost obciążeń w układzie sterowania, w tym na sterownicach pilota. W śmigłowcach o masie startowej około 2000kg pilot nie

jest w stanie sterować śmigłowcem bez nadmiernego wysiłku, zaś w powyżej 5000 kg nie istnieje możliwość sterowania wyłącznie przez pilota. Sytuacja taka zmusza do zastosowania w układzie sterowania wspomaganie hydraulicznego bądź elektrycznego na poziomie niezawodności 10^{-9} . Zastosowanie systemów wspomaganie komplikuje i rozbudowuje układ sterowania. Układ hydrauliczny wymaga zastosowania wielu dodatkowych elementów, co wpływa na masę startową oraz komplikuje konstrukcję układu sterowania. Używanie systemów wspomaganie pociąga za sobą wprowadzenie do układu sterowania urządzeń symulujących obciążenie na sterownicach skoku cyklicznego, gdzie obciążenia te powinny narastać ze wzrostem wielkości przemieszczenia sterownicy.

Kolejnym czynnikiem utrudniającym konstrukcję takiego układu jest wzrost wielkości gabarytowej śmigłowca, która rośnie ze wzrostem ciężaru startowego i powoduje zwiększenie odległości między sterownicami pilota, a dźwigniami wykonawczymi. Wzrost ten wpływa na znaczną rozbudowę ciągów sterowania, zwiększenie tarcia, pogorszenie dokładności odtwarzania ruchu sterownic pilota na dźwigniach wykonawczych. Dzieje się tak na skutek odkształceń sprężystych w ciągach sterowania [2, 4].

Ostatnim i najważniejszym czynnikiem jest brak stateczności dynamicznej opisywanego statku powietrznego. Śmigłowiec jednowirnikowy z wirnikiem głównym konstrukcji przegubowej jest obiektem niestatecznym dynamicznie. Ta właściwość wymaga od pilota włożenia znacznego wysiłku fizycznego i psychicznego w sterowanie śmigłowcem. Dla odciążenia pilota od wysiłku związanego z utrzymaniem stabilizacji śmigłowca w układach sterowania stosuje się system autostabilizacji lub system autopilota. Zastosowanie układów sztucznej stabilizacji jest konieczne w śmigłowcach użytkowanych według IFR (loty bez widoczności ziemi).



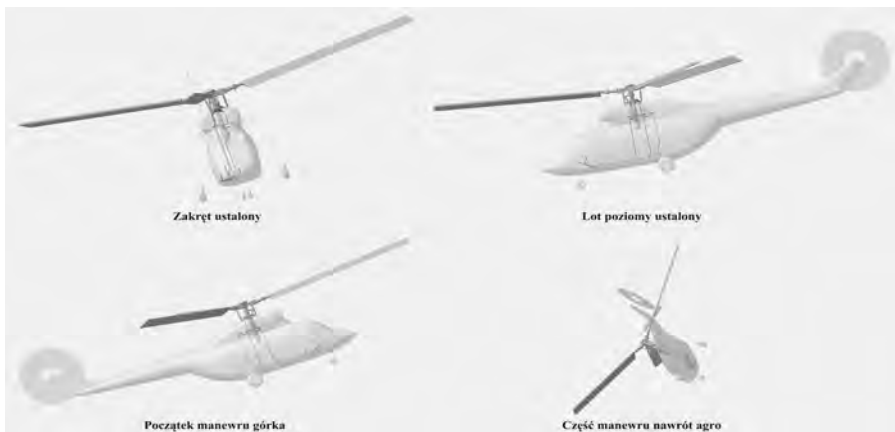
Rys. 1. Wirtualny model układu sterowania śmigłowca jednowirnikowego
Fig. 1. Virtual model of helicopter steering system

Przedstawiony model umożliwia sterowanie śmigłowcem w płaszczyźnie przechyleń i odchyłeń za pomocą wymuszeń pochodzących z drążka pilota. Jest to układ klasyczny z możliwością rozszerzenia o różne warianty sterowania. Utworzony prototyp pozwala na zbadanie odpowiedzi łopaty w postaci kąta nastawie-

nia i wpływu tego kąta na cykliczną zmianę kąta wahań względem przegubu poziomego, pionowego i przekreśień. Pozwala na analizę maksymalnych wartości przemieszczeń łopat prototypu w płaszczyźnie ciągu. Daje również możliwość zaobserwowania odpowiedzi kadłuba projektowanego śmigłowca na zmianę siły nośnej na poszczególnych łopatach wywołanych sterowaniem.

OPIS MODELU

Wirtualny prototyp układu sterownia przedstawiony w pracy realizowany jest za pomocą układu popychaczy, których rozmieszczenie, długość i punkty mocowania zostały narzucone podczas tworzenia projektu wstępnego. Mechanizm zespołu popychaczy oraz tarczy sterującej został utworzony w module DMU Kinematics systemu Catia V5. Stworzony model umożliwia realizację dziewięciu wymuszeń wpływających na jego kinematykę. Dwa z nich są to wymuszenia pochodzące od drążka pilota i są zadawane w sposób dowolny poprzez podanie parametrów zmiany położenia, zaś pozostałe siedem jest sterowne za pomocą zależności utworzonych w module Knowledge Advisor. Są to równania kinematyki ruchu łopat, prędkość obrotowa wirnika nośnego oraz zależności pomiędzy wartością sterowań, a kątami przechylenia lub pochylenia całego śmigłowca. Istnieje możliwość analizy sterownia kierunkowego śmigłowca poprzez zadanie parametru kąta odchylenia śmigłowca w rozpatrywanym manewrze.



Rys. 2. Analizowany prototyp śmigłowca w różnych stanach lotu
Fig. 2. Different cases of virtual helicopter flight

Niezbędne jest podanie danych wejściowych do modelu takich jak: masa startowa prototypowanego śmigłowca, masa łopaty wraz ze współczynnikiem C_z charakteryzującym jej profil, nominalna prędkość obrotowa wirnika nośnego, promień wirnika, odległości przegubu poziomego od osi obrotu wirnika nośnego L_{ph} , wysokość lotu według atmosfery wzorcowej, czas rozpędzania i czas hamo-

wania wirnika nośnego [2, 4]. Wszystkie te parametry można wprowadzić w prosty sposób dzięki użyciu dodatkowego programu sterującego modelem, którego główne okno widoczne jest na rysunku 3.



Rys. 3. Okno sterowania analizą prototypu śmigłowca
Fig. 3. Main window of virtual prototype steering application

Zależności używane do obliczania wartości amplitud drgań łopaty w płaszczyźnie obrotów przedstawiają odzwierciedlenie wpływu ośrodka gazowego jakim jest powietrze, w którym porusza się śmigłowiec, na ruch łopaty, poprzez zmianę wartości siły nośnej. Zakłada się, że wielkość momentu aerodynamicznego będącego odzwierciedleniem ciągu wirnika na poszczególnych łopatach, jest stała wzdłuż długości łopaty. Moment ten przedstawia zależność:

$$M_a = T \cdot \frac{R_{blade}}{N_b} \quad (3)$$

gdzie: T - całkowity ciąg wirnika nośnego dla wykonywanego manewru, R_{blade} - długość łopaty zaś N_b - liczba łopaty.

Wartości kąta stożka tworzonego przez odchylone łopaty wirnika nośnego od płaszczyzny prostopadłej a_0 do osi wału wirnika są uzależnione od wartości kąta nastawienia i można je określić za pomocą równania:

$$a_0 = \frac{\gamma}{4} \theta_0 \quad (4)$$

gdzie: I_{ph} - masowy moment bezwładności łopaty, ω - prędkość obrotową, θ_0 - kąt nastawienia łopaty dla skoku ogólnego, γ - liczba Locka, którą można przedstawić wzorem:

$$\gamma = \frac{\rho a c R^4}{2 I_{ph}} \quad (5)$$

Wszelkie analizy manewrów są przeprowadzane dla atmosfery wzorcowej na wysokości 0 m n.p.m. jednakże istnieje możliwość zadania dowolnej wartości wysokości lotu. Parametry związane z profilem łopaty pobierane są z utworzonego wirtualnego modelu łopaty.

Wahania łopat uzależnione są od wartości azymutu na jakiej znajduje się łopata i można je wyrazić równaniem:

$$\beta = a_0 - a_1 \sin(\psi) - b_1 \sin(\psi) \quad (6)$$

gdzie: a_1 i b_1 - kąty nachylenia dysku wirnika do tyłu i w bok w kierunku 90° , co jest tożsame z kierunkiem łopaty nacierającej zaś ψ - kąt azymutu.

W modelu użyty został również współczynnik wahań i przekreń nazywany również kompensatorem wahań i oznaczany, przez k_H :

$$\Delta\theta = -k_H \cdot \Delta\beta \quad (7)$$

Działanie kompensatora wahań jest takie, że jeśli łopata zwiększa kąt β , to równocześnie zmniejsza się jej kąt nastawienia.

Wynikiem wymuszeń zadanych przez drążek sterownia pilota jest zmiana kąta wahań łopat w przegubie poziomym oraz wartości kątów pochylenia i przechylenia śmigłowca.

ANALIZA WYNIKÓW FUNKCJONOWANIA PROTOTYPU UKŁADU STEROWNIA ŚMIGŁOWCA

Wirtualny prototyp powstał dla sprawdzenia wielu przypadków sterownia śmigłowcem podczas lotu, startu czy lądowania. Analiza funkcjonowania prototypu obejmuje: obserwacje poprawności działania układu przeniesienia wymuszeń z drążka pilota na tarczę sterującą, zbadanie maksymalnych amplitud wahań dla projektowanego układu wirnika nośnego oraz ocenę skuteczności zespołu sterowania podczas wykonywania manewrów. Analizę przeprowadzono dla kilku stanów lotu takich jak na przykład: lot poziomy ustalony, zakręt ustalony, manewr górka, nawrót agro, zwrot bojowy oraz startu i lądowania śmigłowca.

Podczas projektowania śmigłowca niezbędna jest weryfikacja stworzonego układu sterowania lotem jeszcze we wstępnej fazie projektu pozwalająca ocenić jego poprawność. Opracowany model daje możliwość zbadania wpływu modyfikacji niektórych węzłów konstrukcyjnych na polepszenie zakresu sterowania śmigłowcem. Analiza takiego prototypu pozwala ocenić, czy funkcja jaką powinien on spełniać jest realizowana w sposób poprawny i czy założenia projektowe były trafne czy należałoby je zmienić. Prototyp ten daje również możliwość sprawdzenia układu pod kątem norm EASA.

Dzięki zastosowaniu modułu Knowledge Advisor, możliwa jest również weryfikacja konstrukcji ograniczników zwisu łopat oraz analiza możliwości kolizji łopaty z kadłubem śmigłowca podczas rozruchu bądź hamowania wirnika nośnego. Badanie amplitud drań łopat daje możliwość sprawdzenia pod względem ki-

nematycznym możliwości oraz zakresu takich wahań co ma bezpośredni wpływ na sposób rozmieszczenia ograniczników [5].

Możliwość zastosowania równań opisujących wymuszenia powodowane przez siły aerodynamiczne daje okazję do szerszego badania prototypu oraz jego weryfikacji. Badanie reakcji śmigłowca na wartości wymuszeń, pozwala jeszcze na poziomie prototypowania, na wirtualnym obiekcie, ocenić poprawność przeprowadzonych obliczeń wstępnych.

WNIOSKI

Wirtualny prototyp układu sterowania śmigłowcem wydaje się być prawidłowy. Analiza poprawności funkcjonowania układu wskazuje, że śmigłowiec prawidłowo reaguje na zadane sterowania. Utworzony prototyp daje możliwość szerokiego badania tego układu bez konieczności budowy rzeczywistego modelu. Zależności opisujące oddziaływania aerodynamiczne umożliwiają szerokie badania modelu. Moduł odpowiedzialny za powiązanie wymuszeń z odpowiedzią całego badanego obiektu daje możliwość analizy sterowności śmigłowca we wczesnej fazie projektu, co umożliwi konstruktorom jego zmianę bez konieczności wykonywania kosztownych badań w locie na gotowym obiekcie.

Analiza realizowana poprzez możliwość zadania wartości wymuszeń pochodzącego od układu drążka pilota w kierunku porzecznym i podłużnym oraz obserwowanie odpowiedzi kąta nastawienia i kąta wahań łopat daje wirtualny obraz zakresu amplitud drań tych obiektów. Wirtualne prototypowanie pozwala na analizę poprawności konstrukcji popychaczy, przegubów, układu tarczy sterującej oraz umieszczenia przegubów w zależności od założeń projektowych co do osiągnięć bądź konstrukcji tego zespołu.

Przedstawiony model jest perspektywiczny i jest ciągle rozwijamy. Istnieje możliwość dodania sterowania wirtualnym śmigłowcem za pomocą joysticka komputerowego poprzez język programowania Visual Basic. Daje to możliwość we wczesnej fazie projektu weryfikacji śmigłowca przez pilotów i oceny jego sterowności według skali Coopera – Harpera.

Istnieje możliwość dodanie kolejnych podukładów sterownia takich jak: sterownie skokiem ogólnym, sterowanie zespołem napędowym, prędkością wirnika nośnego, hamulca wirnika nośnego, podwoziem oraz systemem sterowania opcjonalnym bądź specjalistycznym (np uzbrojenia). Taka rozbudowa modelu pozwala na analizę śmigłowca w zakresie funkcji jakie powinien on spełniać (ocenę jego własności lotnych i dodatkowych w pełnym zakresie).

PIŚMIENNICTWO

1. Bramwell A. R. S.: Helicopter Dynamics. Butterworth-Heinemann. Oxford 2001.
2. Juriew B.N.: Aerodinamiceskij raszczet wiertoletow. Obarangiz. Moskwa 1956.

3. Mil M.L.: Helicopters. Calculation and design. Volume II. NASA Technical Translation, NASA TT F-519. Washington, D. C. 1968
4. Szumański K.: Badania symulacyjne procesów projektowania i eksploatacji śmigłowców w celu zwiększenia ich trwałości, Instytut Lotnictwa, Opracowanie nr BL-727, wydanie wewnętrzne, Warszawa, 1990.
5. Węlyczko A.: Catia v5. Przykłady efektywnego zastosowania systemu w projektowaniu mechanicznym. Helion. Gliwice 2005.

VIRTUAL PROTOTYPING OF CONTROL SYSTEM IN TERMS OF ANGLING AND TILTING OF CLASSIC TYPE SINGLE-ENGINE HELICOPTER

Summary

The paper presents a virtual prototype of a helicopter control system in terms of angling and tilting. The model allows comprehensive tests without having to build an actual prototype.

Keywords: Control system, steering, helicopter, CatiaV5, virtual prototyping.

Łukasz Giersberg ¹⁾, Andrzej Łukaszewicz ²⁾

NOWOCZESNE METODY WYTWARZANIA W RZEŹBIARSTWIE WYKORZYSTUJĄCE PODEJŚCIE INŻYNIERII ODWROTNEJ

Streszczenie: W niniejszym artykule omówiony został przebieg procesu wytwarzania rzeźby kamiennej przy pomocy siedmioosiowego robota przemysłowego, z wykorzystaniem oprogramowania CAM (przygotowanie i ustawienie modelu w programie CAD, tworzenie programu obróbkowego z wykorzystaniem oprogramowania CAM, przeprowadzenie obróbki), oraz porównanie z klasycznymi metodami wytwarzania.

Słowa kluczowe: Inżynieria odwrotna, wytwarzanie, CAD, CAM.

WSTĘP

Jak powszechnie wiadomo rzeźbiarstwo jest rzemiosłem bardzo starym i niezwykle cenionym już od zamierzonych czasów [3]. Do jego wykonywania niezbędna jest zarówno bardzo dobrze rozwinięta wyobraźnia przestrzenna jak również odpowiednie zdolności manualne. Pomimo, iż wykonanie modelu danej rzeźby z tworzyw miękkich takich jak glina, lub w plastelinie należy do czynności zbyt uciążliwych, odwzorowanie kształtu stworzonego obiektu w materiale, z którego ma on zostać ostatecznie wykonany, przy użyciu narzędzi konwencjonalnych wiąże się obecnie z dużym nakładem pracy oraz czasu. W dobie wszechobecnego postępu technicznego proces ten może zostać w dużym stopniu usprawniony dzięki zastosowaniu w trakcie jego realizacji metod inżynierii odwrotnej, co zostanie zaprezentowane w niniejszym artykule.

PODSTAWY TEORETYCZNE

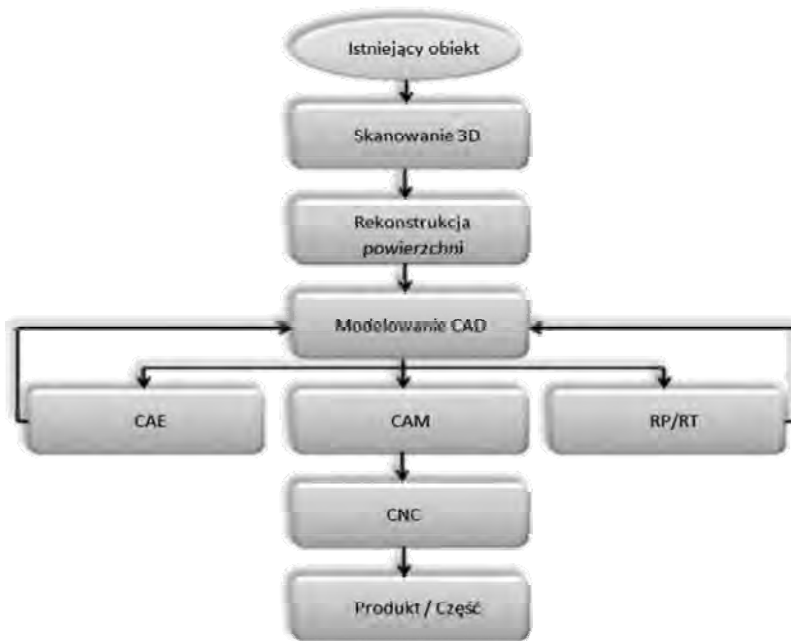
Inżynieria odwrotna (ang. *Reverse Engineering*) – jest to proces odkrywania zasad technologicznych powstawania urządzeń stworzonych przez człowieka, za pomocą analizy jego struktury, funkcji, kształtu oraz działania. Proces ten często polega na rozmontowaniu na części istniejącego produktu (na przykład: urządzenia mechanicznego, komponentu elektronicznego lub programu komputerowego) w celu ich wykorzystania w nowym urządzeniu, bądź też ich skopiowaniu [2, 5].

¹ Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Studenckie Koło Naukowe Mechaniki i Informatyki Stosowanej.

² Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej.

Wśród metod inżynierii odwrotnej wyróżnić można cztery zagadnienia [1]:

- a) ponowna dokumentacja – jest to gałąź technik inżynierii odwrotnej polegająca na odtworzeniu (jeżeli takowa istniała), bądź też opracowaniu na nowo dokumentacji technicznej danego obiektu lub urządzenia na podstawie istniejącego obiektu fizycznego,
- b) powtórne definiowanie projektu – ponowne udokumentowanie danego projektu z zastosowaniem informacji uzyskanych z zewnętrznych baz danych, w celu wykorzystania nowych rozwiązań technicznych,
- c) rekonstrukcja – odwzorowanie danego elementu, lub urządzenia na podstawie istniejącego modelu fizycznego, przy zachowaniu jego uprzedniej funkcjonalności i zastosowania. Przebieg niniejszego procesu przedstawiony został na rys. 1.



Rys. 1. Rekonstrukcja obiektu z wykorzystaniem metod inżynierii odwrotnej
Fig. 1. Reconstruction of an object using the methods of reverse engineering [4]

- d) ponowne projektowanie - połączenie metod projektowania oraz inżynierii odwrotnej, polegające na dokładnym zbadaniu danego obiektu fizycznego w celu przeanalizowania zastosowanych w nim rozwiązań technicznych, co umożliwi pracę nad ich dalszym udoskonalaniem, bądź też na ich zastosowanie w innym projekcie.

PRZEBIEG PROCESU WYTWARZANIA RZEźB Z WYKORZYSTANIEM METOD INŻYNIERII ODWROTNEJ

Przygotowanie modelu CAD pod wymagania programu CAM: przed przystąpieniem do planowania procesu obróbki danej rzeźby, konieczne jest uprzednie przygotowanie jej modelu przy użyciu oprogramowania typu CAD. Na potrzeby niniejszego artykułu wykorzystany został uprzednio wykonany i odpowiednio przygotowany cyfrowy model 3D rzeźby „Aniołek”, przedstawiony na rys.2.



Rys. 2. Skan 3D modelu rzeźby „Aniołek”
Fig. 2. Scan 3D model of the sculpture
 "Angel"



Rys. 3. Model CAD rzeźby wraz z wrysowaną przygotowką
Fig. 3. CAD model of a sculpture with raw drawn into

Pierwszą czynnością, którą należy wykonać tuż po zaimportowaniu modelu 3D danej rzeźby do programu typu CAD, jest jego odpowiednie przeskalowanie. Czynność ta jest konieczna ze względu na fakt iż modele fizyczne poszczególnych rzeźb, które następnie mają podlegać skanowaniu, zazwyczaj są znacznie mniejsze od produktu końcowego, co pozwala na zmniejszenie czasochłonności procesu ich wytwarzania.

Kolejnym etapem w trakcie przygotowywania modelu CAD pod wymagania systemu CAM jest wrysowanie doń przygotowki, będącej odwzorowaniem kształtu materiału z którego wykonana zostanie rzeźba, oraz postumentu (o ile takowy nie istnieje w modelu), który sprawi iż obrabiany element nie ulegnie wywróceniu podczas obróbki. Ważne jest aby utworzona bryła jak najdokładniej odzwierciedlała materiał wyjściowy, gdyż jej nieprawidłowe wykonanie może doprowadzić do komplikacji w czasie procesu obróbki takich jak np. kolizja narzędzia z obra-

bianym elementem. Faktem jest, iż niektóre aplikacje typu CAM oferują możliwość generacji prostych brył, które następnie mogą zostać wykorzystane jako model przygotówki, należy jednak pamiętać, że tego typu rozwiązania należy stosować tylko wówczas, gdy mamy do czynienia z materiałem wyjściowym którego kształt został już wstępnie przygotowany. Przygotówka oraz postument stworzone na potrzeby niniejszego projektu przedstawione zostały na rysunku 3.

Ostatnią czynnością, którą należy wykonać przed zaimportowaniem pliku CAD do systemu CAM, jest odpowiednie usytuowanie punktu zerowego przedmiotu. Dokonuje się tego poprzez transformację układu współrzędnych przedmiotu w wybranym przez użytkownika punkcie do globalnego układu współrzędnych programu CAD. Co prawda, podobnie jak w przypadku tworzenia przygotówki, wiele programów typu CAM oferuje możliwość ustawienia punktu zerowego przedmiotu już po zaimportowaniu pliku, jednak w przypadku, gdy aplikacja wykorzystywana przez użytkownika pozbawiona jest wyżej wymienionej cechy, za punkt zerowy przedmiotu obierany jest automatycznie początek układu współrzędnych pobrany z pliku CAD.

TWORZENIE PROGRAMU OBRÓBKOWEGO Z WYKORZYSTANIEM OPROGRAMOWANIA CAM

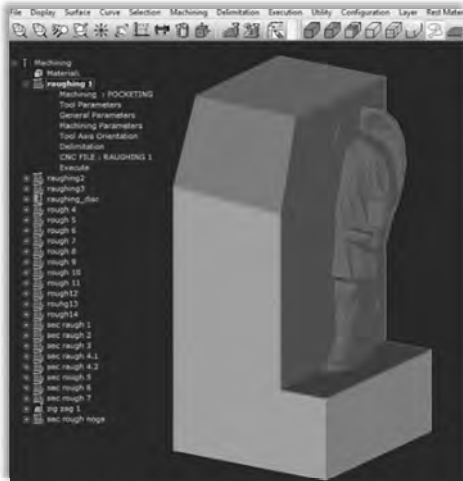
Po zaimportowaniu uprzednio przygotowanego modelu CAD do aplikacji typu CAM, użytkownik ma możliwość rozpoczęcia procesu tworzenia programu obróbkowego. Jest to zazwyczaj proces stosunkowo prosty i nie stwarzający większych trudności osobom zaznajomionym z tego typu oprogramowaniem.

Pierwszą czynnością, jaką należy wykonać rozpoczynając tworzenie programu obróbkowego, jest wskazanie aktualnie wykorzystywanej aplikacji, która część zaimportowanego modelu CAD uznana ma zostać za przygotówkę, a która za element docelowy, co umożliwi dalszą pracę nad projektem.

Kolejnym krokiem który użytkownik musi wykonać w celu wygenerowania kodu na obrabiarkę CNC, jest wstawienie do programu nowej operacji obróbczej, po czym konieczne jest zdefiniowanie poszczególnych parametrów, od których ów zabieg jest zależny, takich jak np. parametry wykorzystywanego narzędzia, posuw, grubość warstwy skrawanej, czy kąt nachylenia narzędzia względem przedmiotu obrabianego (obróbka 5-cio osiowa) oraz wiele innych. W trakcie wykonywania wyżej wymienionych czynności należy zachować szczególną ostrożność, ponieważ wprowadzenie nieprawidłowych wartości, może doprowadzić nie tylko do uszkodzenia obrabianego materiału, ale również narzędzia lub obrabiarki.

Zakres operacji możliwych do wykorzystania przez osobę obsługującą daną aplikację, uzależniony jest w dużej mierze od stosowanego systemu CAM. Duża część tego typu oprogramowania posiada budowę modułową, dzięki czemu możliwy jest wybór opcji programowej umożliwiającej obsługę dostępną dla użytkownika grupy obrabiarek (moduły: frezarskie, tokarskie, wiertarskie, itp.).

Ostatnimi czynnościami, które użytkownik powinien wykonać, przed wygenerowaniem kodu na obrabiarkę CNC, jest wydanie komendy policzenia ścieżek narzędzia na podstawie wcześniej wprowadzonych parametrów oraz przeprowadzenie symulacji stworzonej operacji. Pozwala to na odszukanie ewentualnych błędów w programie, oraz wykrycie wszelkiego rodzaju kolizji narzędzia z obrabianym przedmiotem. Daje to również użytkownikowi możliwość obejrzenia pozostałego po przeprowadzeniu planowanej operacji materiału reszkowego (rys. 4).



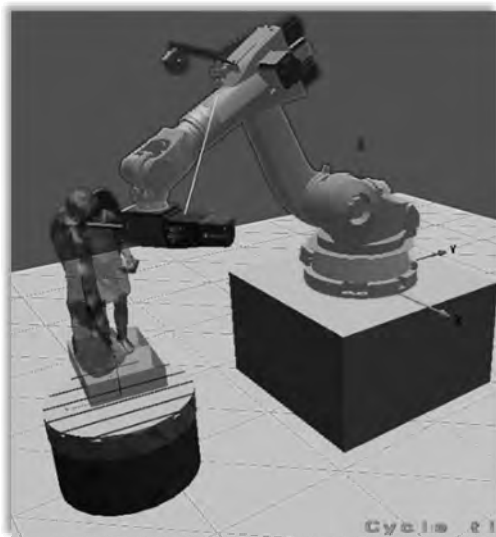
Rys. 4. Materiał reszkowy pozostały po przeprowadzeniu operacji
Fig. 4. The rest material remaining after operation

Po wykonaniu wszystkich wyżej wymienionych czynności rola użytkownika programu ogranicza się jedynie do wybrania typu postprocesora (rodzaj kodu wyjściowego) i generacji programu na obrabiarkę CNC. Programy obróbkowe kolejnych operacji tworzone są w sposób analogiczny.

W niektórych przypadkach kod programu wygenerowany przez aplikację typu CAM okazuje się niewystarczający do przeprowadzenia obróbki i konieczny jest jego dalszy postprocessing, co można zauważyć na podstawie niniejszego projektu.

Ze względu na bardzo skomplikowaną geometrię wykonywanego elementu, do obróbki wykorzystany został 7-osiowy robot przemysłowy, co spowodowało, że pomimo iż ruchy narzędzia zostały ściśle sprecyzowane w programie obróbkowym, konieczne było zdefiniowanie ruchów poszczególnych ramion robota, w celu uniknięcia ich kolizji z przedmiotem obrabianym, co zostało przedstawione na rysunku 5. Zazwyczaj w tym celu wykorzystywane są specjalistyczne aplikacje dostarczane przez producentów wraz z obrabiarkami, o ile jest ono niezbędne do ich obsługi.

Przygotowany w ten sposób program obróbkowy jest gotowy do przeniesienia na obrabiarkę, a następnie do jego uruchomienia, co będzie skutkowało rozpoczęciem procesu obróbki.



Rys. 5. Definiowanie ruchów ramion robota z wykorzystaniem aplikacji Robomove
Fig. 5. Defining the robot arm movements using the application Robomove



Rys. 6. Wytwarzana rzeźba na poszczególnych etapach obróbki
Fig. 6. Produced sculpture in various stages of processing

Zdjęcia przedstawiające rzeźbę wytwarzaną na potrzeby niniejszego projektu, po poszczególnych etapach obróbki przedstawione zostały na rysunku 6.

WNIOSKI

Całkowity czas obróbki rzeźby omawianej w niniejszym artykule wyniósł 62 godziny robocze, podczas gdy osiągnięcie podobnego efektu z wykorzystaniem narzędzi konwencjonalnych, na podstawie danych szacunkowych, wyniosłoby około 200 godzin, czyli ponad trzykrotnie dłużej. Świadczy to o tym, iż zastosowanie nowoczesnych technik wytwarzania przełożyło się bezpośrednio na skrócenie czasu potrzebnego na wykonanie elementu, a co za tym idzie obniżenie kosztów jego produkcji.

Pozwoliło to również na niemal całkowite wyeliminowanie konieczności obróbki ręcznej, która w chwili obecnej ogranicza się jedynie do wykonania czynności wykończeniowych.

Artykuł powstał przy współpracy, z pracownią rzeźbiarską Michała Jackowskiego, w Białymstoku.

PIŚMIENNICTWO

1. Sokovic M., Kopac J.: RE (reverse engineering) as a necessary phase by rapid product development – Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Askercева 6, SI-1000 Ljubljana, Slovenia 2005.
2. Nelson M. L.: A Survey of Reverse Engineering and Program Comprehension - Software Engineering Survey 1996.
3. Santamera C.: Scultura in pietra. Il Castello 2006.
4. <http://www.digitalmanu.com/tech02-e.htm>
5. http://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_engineering

MODERN MANUFACTURING METHODS IN SCULPTURE USING A REVERSE ENGINEERING APPROACH

Summary

In this article, the process of manufacturing sculptures using reverse engineering methods and modern systems of computer-aided design and manufacturing CAD/CAM was shown.

Keywords: Reverse engineering, manufacturing, CAD, CAM.

Edward Lisowski, Paweł Kot ¹⁾, Andrzej Młyniec ²⁾

UTILIZATION OF PLASTIC MATERIALS FOR PRODUCTION OF LOADED ELEMENTS OF PNEUMATIC SERVOS

Summary: The advantages of plastic materials applied for the production of vehicles and devices meant that they are used increasingly common also for production of loaded structural elements. In this work, we studied the possibility of replacing the aluminium housing of a pneumatic servo with fibre-reinforced plastic materials. The studies in question were conducted using the methods of coupled elements under the MOLDFLOW and ABAQUS system.

Keywords: polymers, injection moulding simulation, MOLDFLOW, ABAQUS.

INTRODUCTION

In construction of new machines and devices, elements or sub-assemblies made from plastic materials are used increasingly frequently. Availability of new materials with much better mechanical and thermal properties provide further possibility to extend the application of plastic materials in the development of machines and devices. Their application for development of mechanically loaded structure elements is a non-trivial task, since typical plastic materials have very low volumetric elasticity, simultaneously with much lower mechanical resistance, lower resistance to high temperatures and potential dynamic fatigue with long-term mechanical loads. In order to prevent such phenomena, plastic materials are reinforced with doping materials, such as fibres or glass balls, or even through chemical and thermal processing. In order to prevent such phenomena, plastic materials are reinforced with doping materials, such as fibres or glass balls, or even through chemical and thermal processing. In this work, we conducted simulation analysis of a design of a pneumatic servo made from plastic materials using fibre reinforcement.

FLOW MODEL

In order to examine the potential for proper injection of the designed element, computer-aided systems are used, employing appropriate flow models for the given plastic material. For example, in the Moldflow system, it was assumed that the injection mold is filled according to the fountain flow model. Individual parti-

¹ Politechnika Krakowska, Instytut Informatyki Stosowanej.

² Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki.

cles of the plastic material flow faster in the core region of the mould, while in the area adjacent to the stream front they are directed towards the surface. When the particles reach the surface, the solidification process takes place. The flow of the plastic material within the mould is presented in Figure 1. The speed of the plastic material particles moving around in the mould has a parabolic distribution. The highest speed value is observed in the core region, and diminishes gradually moving outwards. The solidification velocity changes in a similar manner, i.e. it has the highest value at the border of the liquid and solid material. The viscosity of the plastic material depends proportionally from the solidification velocity and temperature, and it reaches the highest value when both the parameters have their minimum, i.e. at the contact point between the liquid plastic material and the mould wall.

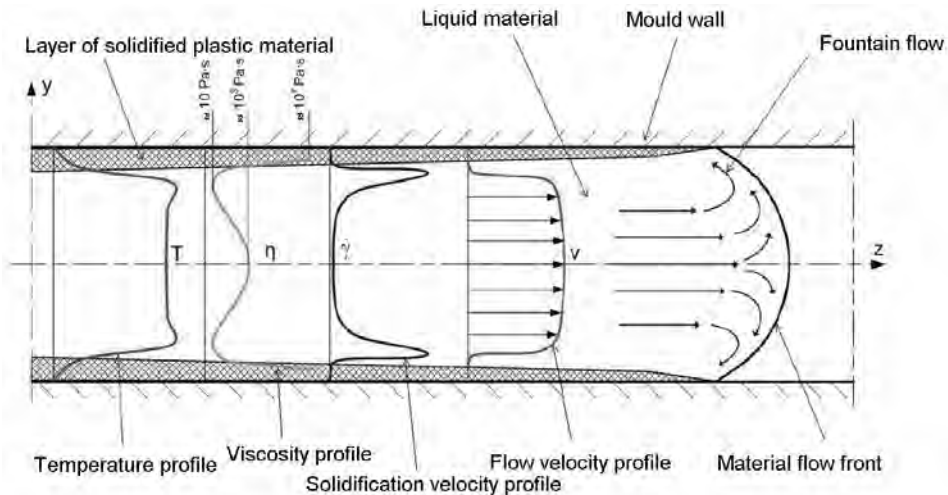


Fig. 1. The process of plastic material flow covering the flow speed, solidification velocity, viscosity and temperature characteristics [4]

The flow of plastic materials is complex in terms of liquid mechanics. Liquid plastic materials are considered non-Newtonian liquids, creating non-isothermal material injection model. The Moldflow system solves preservation equations for continuous media mechanics for the target material models under the strictly defined flow conditions. These equations represent the principle of preservation of motion, mass and energy and create the following set of equations [5]:

(mass) continuity equation
$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (1)$$

motion equation
$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\operatorname{grad} p + \operatorname{div} \vec{\tau} + \rho \vec{g} \quad (2)$$

Energy equation
$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \bar{\tau} : \text{grad } \bar{v} \quad (3)$$

Definition of the material model, under specific flow conditions
$$\bar{\tau} = F(D) \quad (4)$$

Where:

- $\frac{d\rho}{dT}$ - complete derivative of density against time,
- ρ - density,
- $\text{div } \bar{v}$ - divergence of the velocity vector,
- $\frac{D\bar{v}}{Dt}$ - complete derivative of the velocity vector against time,
- $\text{grad} p$ - gradient of the hydrostatic pressure (the isotropic part of the stress tensor $\bar{\sigma}$,
- $\text{div } \bar{\tau}$ - divergence of the extra-stress tensor (the deviator part of the stress tensor $\bar{\sigma}$,
- g - acceleration components,
- $c_p \frac{DT}{Dt}$ - complete derivative of the internal energy, where c_p represents the specific heat capacity under constant pressure,
- k - thermal conductivity coefficient,
- T - temperature,,
- $\bar{\tau}$ - extra-stress tensor,
- $\text{grad } \bar{v}$ - tensor of the gradient of the velocity field.

These equations represent a set of six scalar equations, which results from the fact that the motion equation is of vector type. In this set, there are twelve unknown values: scalar functions of the hydrostatic pressure p and temperature T , function of the velocity vector \bar{v} , function of a symmetric stress tensor $\bar{\tau}$ and density ρ .

Currently, the Moldflow system is based on Jeffrey's equations and assumptions, who was the forerunner in research on mathematical model describing orientation of plastic materials within manufactured elements. A few improvements were introduced though, improving the precision of calculations when compared to the real distribution. Jeffrey reduced a single fibre to a non-deformed body with the shape of an ellipsoid (see Figure 2) [6]. The orientation tensor for this ellipsoid can be described as follows:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}; [e_1 \ e_2 \ e_3] \quad (5)$$

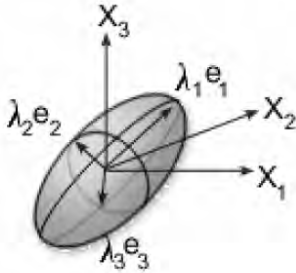


Fig. 2. Fibre model according to Jeffrey [6]

The verified version of the Jeffrey's equations is used by the Folgar-Trucker models, later employed within the Moldflow system.

These models assume the possibility of interaction between individual fibres, introducing possible random location of fibres in the core [1, 2]. This model is described with the following equation:

$$\frac{DA_{ij}}{Dt} + \frac{1}{2}(\omega_{ik}A_{kj} - A_{ik}\omega_{kj}) = \frac{1}{2}\kappa(\dot{\gamma}_{ik}A_{kj} + A_{ik}\dot{\gamma}_{kj} - 2\dot{\gamma}_{kl}A_{ijkl}) + 2C_1\dot{\gamma}(\delta_{ij} - 3A_{ij}) \quad (6)$$

Where:

A_{ij} and A_{ijkl} – tensors of the second and fourth order orientation vectors,

ω_{ij} – rotation tensor,

$\dot{\gamma}_{ij}$ – velocity and deformation tensor,

– material constant, depending on the ratio between the fibre

κ length L and its radius r $\kappa = \frac{\left(\frac{L}{r}\right)^2 - 1}{\left(\frac{L}{r}\right)^2 + 1}$,

– material constant, representing fibre interaction coefficient depending on the volumetric share of the fibres in the plastic material,

δ_{ij} – deformation.

INFLUENCE OF MANUFACTURING PROCESS ON MATERIAL STRUCTURE

Changes in the thickness of the element walls, manufactured from plastic materials reinforced with glass fibres, generates automatically changes in the fibre distribution, which become oriented in the flow direction only next to the mould walls. This happens because when increasing the wall thickness, the thickness of cross-section where glass fibres are distributed in a random manner also increases, while the thickness of the layer with fibre oriented along the flow direction virtually does not change. This relationship is illustrated in Figure 3 [1].

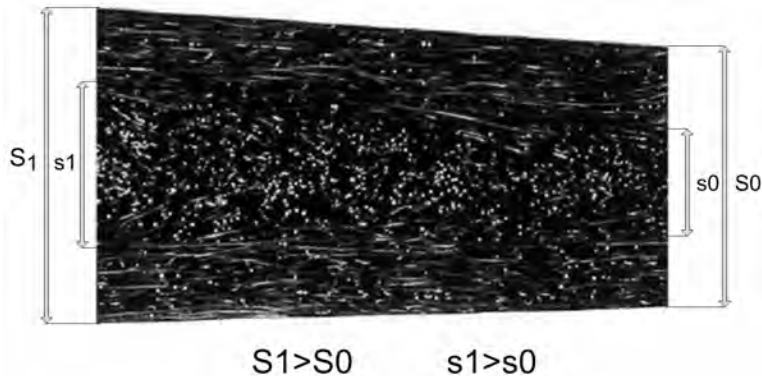


Fig. 3. Orientation of glass fibres in the core and edge regions $S_1-s_1=S_0-s_0$

When examining Figure 3, it is possible to note then when increasing the wall thickness, the share of the edge region in the wall cross-section decreases, while in the case of plastic materials reinforced with glass fibres, this particular edge region defines the overall element stiffness [7].

COUPLING LINES

During the injection of plastic materials, two or more flows can come across each other, creating thus the coupling lines. Varied wall thickness can also cause such coupling lines. Figure 4 presents results obtained under the Moldflow system, depicting the distribution of coupling lines for the edge injection process (injection - left side of the image).

Deterioration of the mould properties in vicinity of the coupling lines clearly depends on the type and number of injectors or reinforcing additives. This makes evaluation of the degree to which the mechanical resistance deteriorates in these locations more challenging. In the area of coupling lines, which are characterized with sufficiently good resistance to stretching, resistance to lateral mechanical load is not necessarily that good [3].

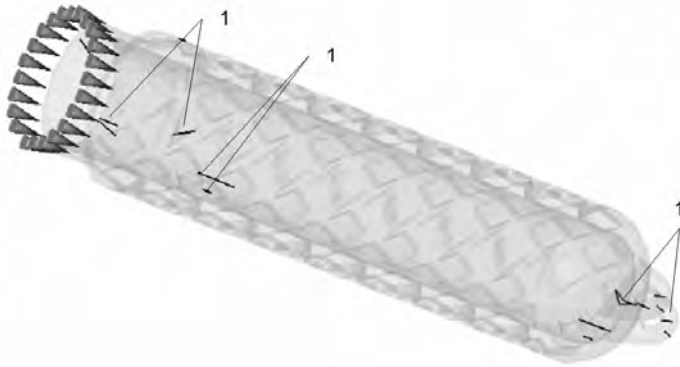


Fig. 4. Injection locations for a model of a servo body and coupling lines - 1

When using reinforcing materials, fibres are typically located transversely in the area of the coupling lines, causing deterioration in the mechanical properties of this particular element area, as depicted in Figure 5 [1, 2].

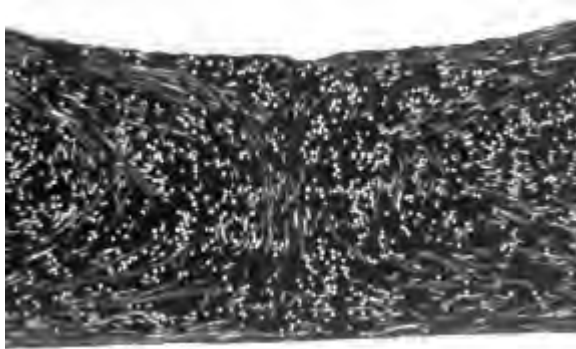


Fig. 5. Orientation of glass fibres in the vicinity of coupling lines

ANALYSIS OF MECHANICAL RESISTANCE OF PLASTIC MATERIALS ACCOUNTING FOR ORTHOTROPIC PROPERTIES

In components with orthotropic structure, anisotropy occurs in three, reciprocally perpendicular axes of symmetry. The schematic describing the procedure of analysis of mechanical resistance, accounting for orthotropic properties of the examined material, was presented in Figure 6.

Based on the above-referred schematic, it is clear that the work must be divided into two independent phases. In the first phase, it is necessary to simulate the process of injecting the plastic material in the servo body, based on which it is possible to observe the coupling lines for the plastic material (see Figure 4) as well as distribution of glass fibres in the core and surface layers of the element (see Figure 7).

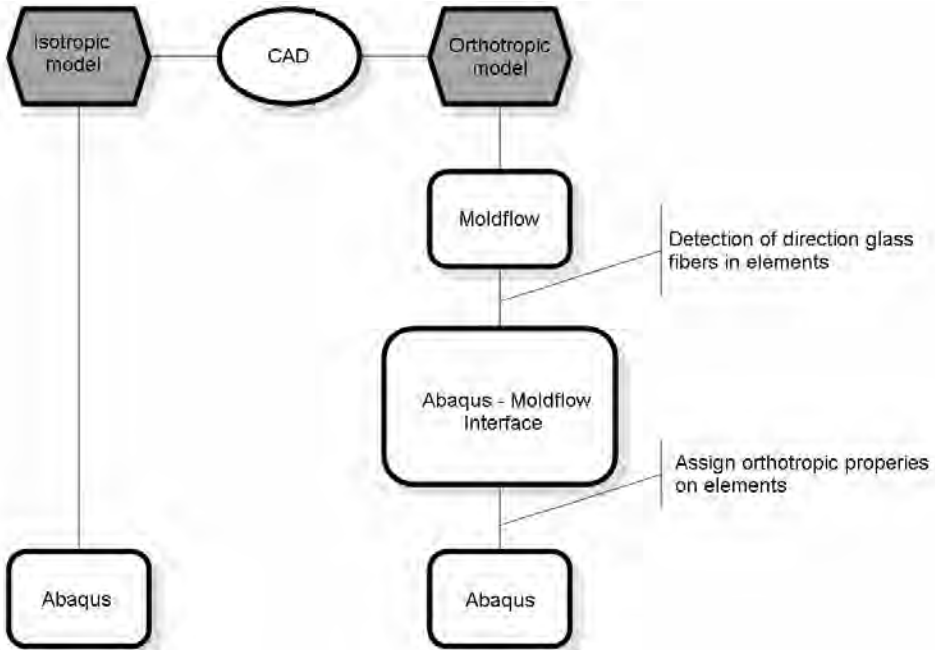


Fig. 6. Schematic representation of mechanical resistance analysis for a pneumatic servo body, accounting for orthotropic properties of the used materials.

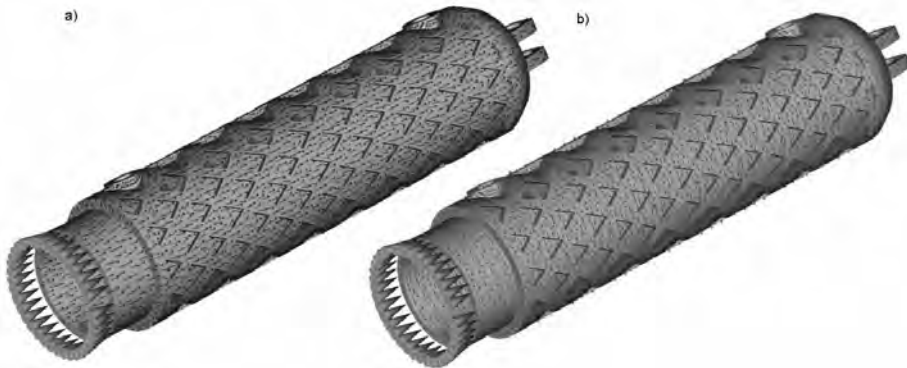


Fig. 7. Orientation of glass fibres in a) core layers of the servo body, b) surface layers of the servo body.

In the subsequent phase, special macros were created in the Python language, which examine the simulation results for the plastic material injection process obtained from the MoldFlow system and assign appropriate material properties to individual finite elements. The interface requires the appropriate location of the 3D model both in the Moldflow system and the Abaqus system, which was used to carry out the remainder of the mechanical resistance calculations. In this way,

the mechanical properties of the plastic material were made dependent on the orientation of the fibres in the mould, achieving in this way the orthotropic structure of the examined component (see Figure 8) [8]. During the simulation of the plastic material injection process and mechanical resistance analysis carried out in the Abaqus system, material data was used as presented in Table 1.

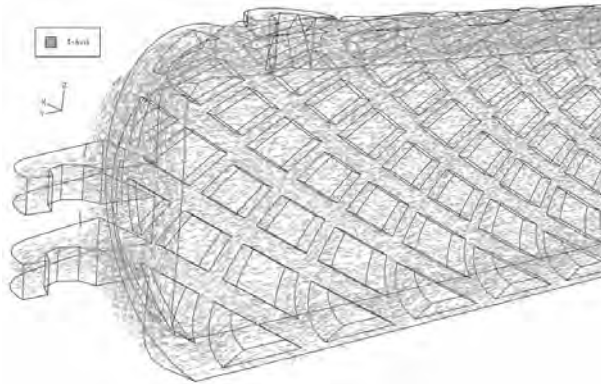


Fig. 8. Orthotropic structure of the examined component

Table 1. Information about PBT GF20

Material model	Young module	Poisson coefficient	Kirchhoff module	Density
Isotropic	$E = 4200$ [MPa]	$\nu = 0,3$	-	1460 [kg/m ³]
Orthotropic	$E1 = 4200$ [MPa] $E2 = 2700$ [MPa] $E3 = 2700$ [MPa]	$\nu12 = 0,3$ $\nu13 = 0,35$ $\nu23 = 0,35$	$G12 = 2300$ [MPa] $G13 = 2300$ [MPa] $G23 = 2600$ [MPa]	1460 [kg/m ³]



Fig. 9. Deformation maps for a pneumatic servo body:
a) orthotropic model, b) isotropic model

Figure 9 presents deformation maps for the servo body made from PBT GF20 material, for the orthotropic and isotropic models. Comparing both results, it is clear that using the isotropic material properties, the maximum deformation caused by exerting pressure to the internal walls of the servo body do not exceed 2%, which might indicate that the design was properly optimized. Examining the deformation map using the orthotropic material properties, substantial increase in the deformation along the body circumference is observed.

CONCLUSIONS

In this article, we address the topic of modelling elements of mechanically loaded bodies of pneumatic servos made from plastic materials. The process of designing elements made from plastic materials is a complex process, apart from problems related with modelling objects, includes also problems with selection of proper materials. Non-Newtonian parameters of material flow, varied pressure fields and statistical estimation of distribution of glass fibres are just some of the problems that need to be tackled when designing such elements. The developed models in connection with the analysis using such systems as Moldflow, Abaqus and custom-designed software, allowed for manufacturing a prototype servo body with the expected parameters.

In the next step author is planning to run an experiment with real parts. After this activity there will be a possibility to compare results from performed simulations and real world.

REFERENCES

1. Zawistowski H., Frenkler D.: Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych. Warszawa: WNT, 1999.
2. Hasenauer J., Kuper D., Laumayer J. E., Welsh I.: Zasady konstrukcji detali z tworzyw sztucznych, DuPoint, 2010.
3. Kurowski P.M.: Analysis Tools for Design Engineers. SAE, 2001.
4. Strang G., Fix G. J.: An Analysis of the Finite Element Method. New York. Englewood Cliffs, 1973.
5. Wilczyński K.: Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych. Warszawa. WNT, 2001.
6. Linn J.: The Folgar-Tucker Model as a differential algebraic system for fiber orientation calculation. Fraunhofer. ITWM Nr.75, 2005.
7. Chitinis M., Agaewal R., Taneja A., Kumar S., Agarwal G.: Metal Replacement and Shape Optimization of Plastic Condenser Brackets Rusing Altair OptiStruct, Kasna Industrial Estate, India 2008.
8. Chitinis M., Shah S., Hammer M., Acre J., Wu E., Victor G., Analysis of Fiber-Reinforced Plastic Tanks by capturing Anisotropic Material Properties, SAE, USA 2008.

WYKORZYSTANIE TWORZYW SZTUCZNYCH NA OBCIĄŻONE ELEMENTY SIŁOWNIKÓW PNEUMATYCZNYCH

Streszczenie

Zalety tworzyw polimerowych stosowanych w konstrukcji maszyn i urządzeń sprawiły, że coraz częściej wykorzystywane są one również na obciążone elementy konstrukcji. W pracy zbadano możliwość zastąpienia aluminiowego korpusu siłownika pneumatycznego tworzywem polimerowym wzmocnianym włóknami szklanymi. Badania przeprowadzono metodą elementów skończonych z wykorzystaniem systemów MOLDFLOW i ABAQUS.

Słowa kluczowe: polimery, symulacja wtryskiwania, MOLDFLOW, ABAQUS.

Henryk Figiel, Bartosz Proniewski ¹⁾

PROJEKTOWANIE I KONSTRUKCJA CEWEK NADAWCZO- ODBIORCZYCH DO OBRAZOWANIA MAGNETYCZNO- REZONANSOWEGO W POLU O INDUKCJI 0,088 T

Streszczenie: Rozwój obrazowania magnetyczno-rezonansowego (OMR) skupia się na zastosowaniu wysokopolowych systemów OMR, jednak w wielu przypadkach diagnostyka medyczna w niskim polu magnetycznym umożliwia uzyskanie porównywalnych rezultatów. Zastosowanie tego typu systemów wymaga użycia dedykowanych cewek wysokiej częstości (w.cz.) w celu uzyskania maksymalnego stosunku sygnału do szumu (SNR). Wykorzystując m.in. analizy numeryczne, zaprojektowano oraz skonstruowano objętościowe, a także powierzchniowe cewki w.cz., których przydatność do OMR została określona przy pomocy pomiarów testowych oraz obrazów MR uzyskanych dla fantomów. Przeprowadzone eksperymenty wykazały możliwość zastosowania cewek innych typów niż cewki solenoidalne, stosowane dotychczas do obrazowania w bardzo niskim polu magnetycznym.

Słowa kluczowe: nisko-polowy OMR, cewka częstości radiowej, cewka powierzchniowa, cewka objętościowa.

WSTĘP

Od czasu pierwszych obrazów uzyskanych techniką obrazowania magnetyczno-rezonansowego (OMR) w 1977 roku [4] nastąpił gwałtowny rozwój tej metody, która obecnie uważana jest za jedną z lepszych i bezpieczniejszych, wśród technik obrazowania wykorzystywanych w diagnostyce medycznej. W systemach obrazowania bardzo ważną rolę odgrywają cewki częstości radiowej (cewki w.cz.), odpowiedzialne za nadawanie i/lub odbiór sygnału MR. Projektowanie cewek w dużym stopniu jest kompromisem, pomiędzy wytwarzaniem jednorodnego pola magnetycznego i wysokim stosunkiem sygnału do szumu (SNR, z ang. „signal to noise ratio”). W konsekwencji cewki RF są często projektowane jako elementy dedykowane do konkretnych zastosowań. Istnieje wiele typów cewek stosowanych w MRI, które najogólniej można podzielić na dwie kategorie: cewki objętościowe oraz powierzchniowe. Do pierwszej grupy zaliczane są cewki wytwarzające jednorodne pole magnetyczne w regionie zainteresowania, a obrazowany obiekt zostaje umieszczony wewnątrz cewki. Cewki powierzchniowe to w najprostszym przypadku pojedyncza pętla przewodnika, która jest przykładana do regionu zainteresowania. Cewki te

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Katedra Fizyki Medycznej i Biofizyki.

odznaczają się wysokim SNR, kosztem niskiej jednorodności pola, stąd najczęściej stosowane są tylko do odbioru sygnału. W artykule przedstawiony został proces projektowania i konstrukcji nadawczo-odbiorczych cewek RF do obrazowania kończyny górnej człowieka w niskopolewym systemie MR o indukcji pola magnetycznego 0,088 T.

PODSTAWY TEORETYCZNE

Wektor magnetyzacji precesujący wokół kierunku stałego pola magnetycznego B_0 powoduje pojawienie się w cewce RF siły elektromotorycznej indukcji. Jej wartość jest znikoma (rzędu μV), zatem konieczna jest detekcja za pomocą układu rezonansowego opisywanego jakościowo przez współczynnik dobroci Q :

$$Q = \frac{\omega L}{r} \quad (1)$$

gdzie ω – częstość rezonansowa, L – indukcyjność oraz r – rezystancja cewki RF. Czułość S cewki nadawczo-odbiorczej (określającą końcową wartość SNR) przy założeniu o pochodzeniu szumu termicznego, dla danych warunków aparaturowych oraz danej próbki jest proporcjonalna do [3]:

$$S \sim \frac{B_1}{I\sqrt{r}} \quad (2)$$

gdzie B_1 – wartość indukcji pola magnetycznego wytwarzanego przez cewkę, I – natężenie płynące w uzwojeniu prądu. Zgodnie z (2) należy dążyć do minimalizacji strat cewki (najniższa wartość r) oraz maksymalnej efektywności, wyrażonej stosunkiem B_1/I . Warto zwrócić uwagę na fakt, że choć obecność układu rezonansowego o wysokiej dobroci jest istotna z punktu widzenia amplitudy sygnału, nie wpływa na czułość cewki [7].

Wartość indukcji pola magnetycznego dB punkcie P , w odległości R od elementu cewki $d\vec{l}$, w którym płynie stały prąd o natężeniu I zgodnie z prawem Biota-Savarta:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{R}}{R^3} \quad (3)$$

gdzie μ_0 to przenikalność magnetyczna próżni. Zasada superpozycji umożliwia obliczenie wypadkowej indukcji pola magnetycznego, pochodzącej od wszystkich elementów uzwojenia. Stało-prądowe obliczenia rozkładu pola magnetycznego można ekstrapolować do niskich częstotliwości, dopóki rozmiar cewki jest dużo mniejszy od długości fali elektromagnetycznej. Ilościowe porównanie jednorodności pola cewek różnego rodzaju można wykonać korzystając z metody histogramów pola, która uwydatnia sumaryczną jednorodność pola [8].

Maksymalny przekaz energii zachodzi przy równej impedancji nadajnika i odbiornika, dlatego impedancję cewki RF należy dopasować do impedancji źródła, standardowo $Z_0=50\Omega$. Polega to na dostrojeniu częstotliwości rezonansowej cewki w.cz. tak, aby część rzeczywista impedancji była równa 50Ω , a następnie kompensacji reaktancji cewki przy danej częstotliwości, poprzez szeregowe podłączenie zmiennej impedancji sprzężonej do reaktancji.

METODYKA BADAWCZA

Zaprojektowane zostały dwie cewki objętościowe o długości 20cm i średnicy wewnętrznej 11cm, wykonane z miedzianej taśmy o szerokości 1cm: solenoidalna (13 zwojów) oraz siodłowa (3 zwoje), a także dwie powierzchniowe, wykonane z drutu miedzianego o średnicy 1,5mm: płaska (5 zwojów, średnica efektywna 14cm) oraz zaokrąglona (4 zwoje, średnica efektywna 15,5cm) (rys. 1).



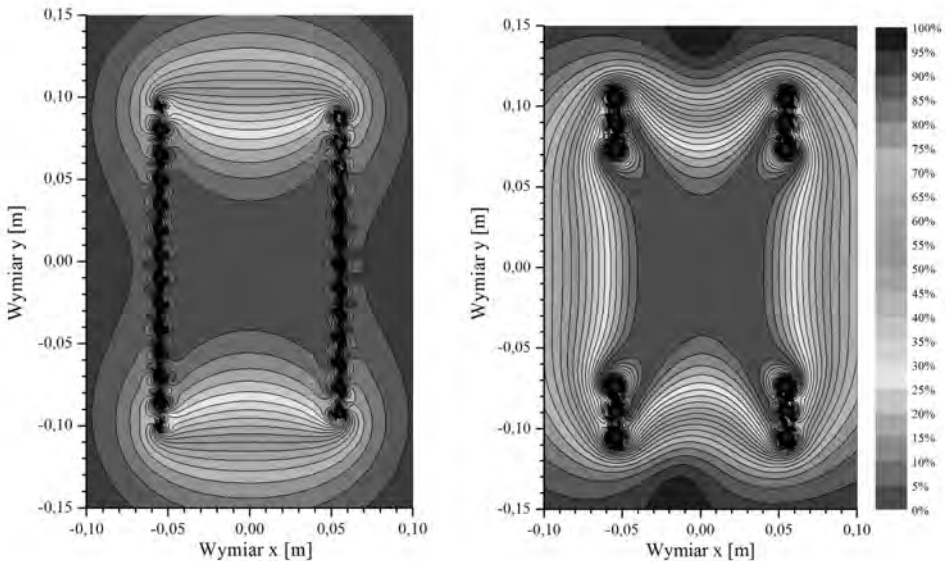
Rys. 1. Wykonane cewki w.cz. - od lewej do prawej w pierwszym rzędzie: cewki objętościowe: solenoidalna i siodłowa; poniżej cewki powierzchniowe: płaska i zaokrąglona

Wymiary geometryczne cewek w.cz. zostały zoptymalizowane pod kątem przeznaczenia, wykorzystując dane antropometryczne [5]. Liczba zwojów projektowanych cewek została dobrana tak, aby indukcyjność własna znalazła się w zakresie odpowiadającym częstotliwości rezonansowej systemu MR [7]. Dla każdej projektowanej cewki w.cz. obliczono rozkład pola magnetycznego, który posłużył do przygotowania map jednorodności pola cewek objętościowych (rys. 2). Cewki RF zostały dostrojone i dopasowane do częstotliwości pracy przy pomocy szeregowego układu dopasowującego [7], gdzie kondensator C_T (z ang. „tuning”) podłączony jest równolegle do cewki i do tak stworzonego układu rezonansowego podpięty zostaje szeregowo kondensator C_M (z ang. „matching”). Dobroć cewek RF została określona poprzez wyznaczenie współczynnika odbicia

w zależności od częstości $\Gamma(\omega)$ przy -3dB dla dopasowanej cewki podłączonej do analizatora widma. Do jakościowej oraz ilościowej analizy obrazów otrzymanych przy pomocy wykonanych cewek wykorzystano wypełnione solą fizjologiczną fantomy. Fantomy jednorodnie wypełnione solą fizjologiczną umożliwiły wyznaczenie eksperymentalnych profili i map jednorodności pola, które zostały porównane z przewidywaniami teoretycznymi. Przy ich pomocy wyznaczono również stosunek sygnału do szumu SNR, poprzez wybór regionu zainteresowania (ROI) w obszarze sygnału oraz drugiego ROI w obszarze tła na amplitudowych obrazach MR. SNR obliczono według zależności [2, 6]:

$$SNR = \frac{0.66 \times \text{mean signal}}{SD \text{ background}} \quad (4)$$

Współczynnik we wzorze (4) bierze się z założenia, że szum opisany jest rozkładem Rayleigha. Dodatkowe fantomy posłużyły do porównania zniekształceń geometrycznych oraz rozdzielczości przestrzennej wykonanych cewek w.cz. metodą modulacji amplitudy [6].



Rys. 2. Jednorodność pola w płaszczyźnie czołowej dla cewki: solenoidalnej (po lewej) oraz siodłowej (po prawej). Skala wskazuje procentowe odchylenie od wartości pola magnetycznego w środku cewki

WYNIKI BADAŃ

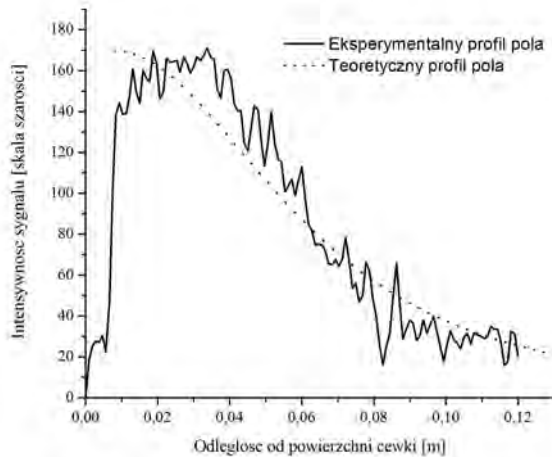
Cewki w.cz. dostrojono do częstotliwości 3,78MHz i uzyskano wartość parametru S_{11} poniżej -30dB na analizatorze widma, a także zmierzono ich dobroć Q . Przy pomocy amplitudowych obrazów fantomów (sekwencja FSE, 8 uśrednień, matryca 128x128) określono wartość SNR oraz modulację, dającą

informację o zdolności rozdzielczej systemu. Nie zaobserwowano wyraźnej różnicy w SNR dla cewek solenoidalnej oraz siodłowej, co jest zbliżone z rezultatem zaprezentowanym w [1]. Płaska cewka powierzchniowa prezentuje SNR na poziomie cewek objętościowych (Tabela 1). Wartość modulacji wskazuje, że wykonane cewki objętościowe umożliwiają uzyskanie typowej dla badanego systemu MR rozdzielczości przestrzennej, natomiast użycie cewek powierzchniowych spowodowało nieznaczne ograniczenie osiągalnej zdolności rozdzielczej. Eksperymentalne profile pola, uzyskane dzięki obrazom MR jednorodnych fantomów, pokazały wysoką zbliżość z obliczeniami analitycznymi (rys. 3).

Tabela 1. Wyniki pomiarów projektowanych cewek w.cz.

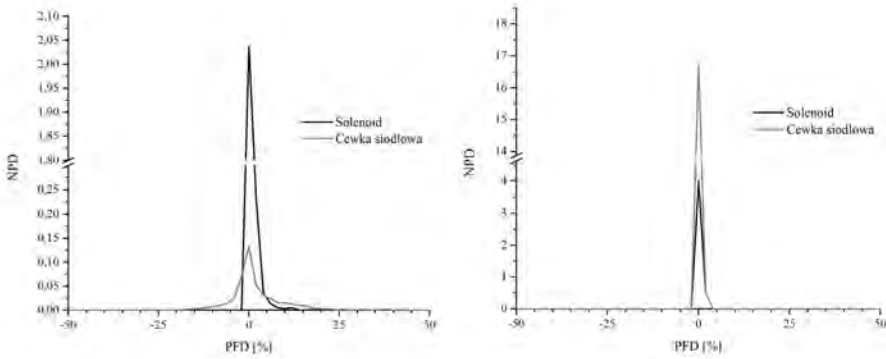
Table 1. Experimental results for designed RF coils

Typ cewki	Q	SNR	Modulacja
Cewka solenoidalna	189 ± 47	14.0	0.7 ± 0.12
Cewka siodłowa	54 ± 4	13.3	0.76 ± 0.15
Powierzchniowa płaska	252 ± 84	12.7	0.6 ± 0.12
Powierzchniowa zaokrąglona	47 ± 3	8.0	0.53 ± 0.13



Rys. 3. Porównanie teoretycznego oraz eksperymentalnego profilu pola w płaszczyźnie prostopadłej dla cewki powierzchniowej płaskiej

Korzystając z metody histogramów pola cewek objętościowych wywnioskowano, że w płaszczyźnie poprzecznej do osi długiej, cewka solenoidalna wytwarza pole magnetyczne o wyższej jednorodności, natomiast w płaszczyźnie czołowej to cewka siodłowa wytwarza bardziej jednorodne pole dla zadanego ROI, co przedstawiono na rys. 4.

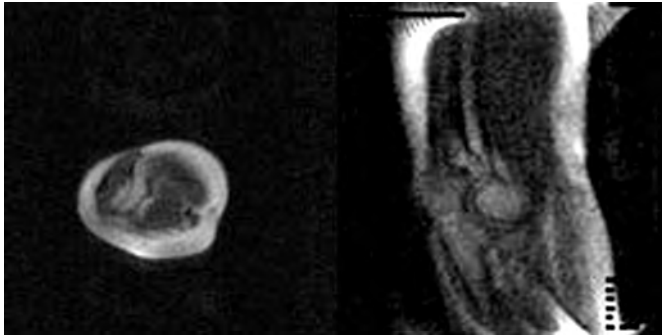


Rys. 4. Porównanie teoretycznej jednorodności pola cewek objętościowych metodą histogramów pola: w płaszczyźnie poprzecznej (po prawej) oraz czołowej (po lewej).

PFD – procentowe odchylenie pola, zdefiniowane w stosunku do wartości pola w centrum ROI; NPD - znormalizowane odchylenie populacji, reprezentujące populację danego PFD.

PODSUMOWANIE

Wykonane cztery cewki w.cz. przetestowano pod kątem ich przydatności do obrazowania stawu łokciowego w polu 0,088T. Analizę ilościową przeprowadzono w oparciu o teoretyczne mapy oraz histogramy jednorodności pola, pomiary dobroci, wartości SNR oraz modulacji. Obrazy MR fantomów oraz stawu łokciowego (rys. 5) uzyskane przy pomocy wykonanych cewek są dobrej jakości.



Rys. 5. Obrazy gęstości protonowej stawu łokciowego płaszczyźnie poprzecznej (po lewej) oraz czołowej (po prawej) uzyskane przy pomocy cewki siodłowej (FSE, FOV 16 cm, grubość warstwy 15 mm, matryca 128x128, 4 uśrednienia)

W przypadku jednokanałowego obrazowania MR w niskim polu optymalne jest zastosowanie cewek objętościowych, umożliwiających jednorodne wzbudzenie i odbiór sygnału MR. Obrazowanie struktur płytko położonych lub o ograniczonej objętości (szczególnie w wymiarze prostym do powierzchni cewki) jest możliwe przy pomocy cewek powierzchniowych stosując

odpowiednie ogniskowanie impulsu nadawczego. Biorąc pod uwagę mapy oraz histogramy jednorodności pola dla wykonanych cewek objętościowych możemy stwierdzić, że z powodzeniem można stosować zaproponowane typy cewek do obrazowania.

PIŚMIENNICTWO

1. Arakawa M., Crooks L., McCarten B., Hoenninger J., Watts J., Kaufman L.: A comparison of saddle-shaped and solenoidal coils for magnetic resonance imaging. *Radiology* 1985, 154, 1, 227-228.
2. Dietrich O., Reeder S., Reiser M., Schoenberg S.: Influence of parallel imaging and other reconstruction techniques on the measurement of signal-to-noise ratios. *Proceedings 13th Scientific Meeting, International Society for Magnetic Resonance in Medicine. Miami Beach 2005*, 158.
3. Hoult D., Richards R.: The signal-to-noise ratio of the magnetic resonance experiment. *Journal of Magnetic Resonance* 1976, 24, 1, 71-85.
4. Mansfield P., Maudsley A.: *Medical imaging by NMR*. British Journal of Radiology 1977, 50, 591, 188-194.
5. McDowell A., Fryar C., Ogden C.: Anthropometric reference data for children and adults: United States, 1988-1994. *Vital and Health Statistics* 2009, 11, 249, 67-68.
6. McRobbie D., Moore E., Graves M., Prince M.: *MRI: From Picture to Proton 2nd Edition*. Cambridge University Press, Cambridge 2006.
7. Mispelter J., Lupu M., Briquet A.: *NMR Probeheads for Biophysical and Biomedical Experiments*. Imperial College Press, London 2006.
8. Yang Q., Smith M.: A Method for Evaluating the Magnetic Field Homogeneity of a Radiofrequency Coil by Its Field Histogram. *Journal of Magnetic Resonance, Series A* 1994, 108, 1, 1-8.

THE DESIGNING AND CONSTRUCTION OF SEND-RECEIVE COILS TO MAGNETICAL RESONANCE DISPLAYING IN THE FIELD WITH INDUCTION 0.088 T

Summary

Recent advancements in magnetic resonance imaging (MRI) are mostly directed towards high-field imaging hardware, rapid pulse sequences and multiple channel phased array coils. Nonetheless, for many diagnostic tests performed using MRI, low-field scanners also provide sufficient quality of images. Using these types of systems requires special dedicated radiofrequency coils (RF coils) in order to achieve the highest possible signal to noise ratio (SNR) for a given magnetic field strength. This work describes the process of designing and constructing transceiver RF coils for a 0,088 T MRI system. Two volume and two surface coils were built and their performance was tested on the bench and through comparing the simulated magnetic field created by each coil with experimentally collected results from phantom MR images. Experiment proved that it is possible to use successfully different RF coils, than the most frequently used solenoid design for MRI at 0,088 T.

Keywords: low-field MRI, RF coil, surface coil, volume coil.

Włodzimierz Przybylski ¹⁾

ZASTOSOWANIE OBRÓBKI NAGNIATANIEM W TECHNOLOGII SIŁOWNIKÓW HYDRAULICZNYCH

Streszczenie: Opisano zintegrowaną technologię tulei cylindrów hydraulicznych polegającą na obróbce skrawaniem i powierzchniowej obróbce plastycznej przez nagniatanie. Przedstawiono konstrukcję specjalnych głowic roztaczająco-nagniatających, stanowisko obróbkowe i rezultaty obróbki tulei o średnicy otworu 100H7 i długości 1400mm. Osiągnięto chropowatość powierzchni $R_a=0,16\pm 0,32\mu\text{m}$. Proponowana technologia cylindrów hydraulicznych jest kilka razy krótsza od tradycyjnej polegającej na roztaczaniu i honowaniu.

Słowa kluczowe: cylindry hydrauliczne, nagniatanie, narzędzia.

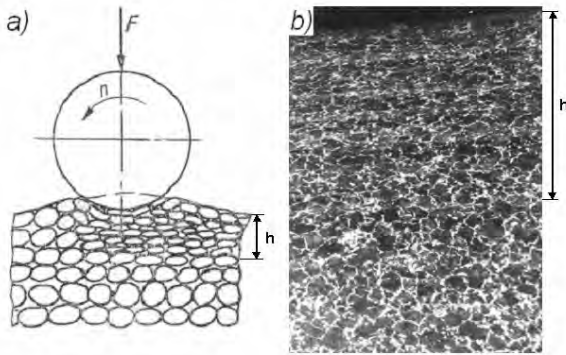
WSTĘP

Duży wpływ na trwałość części maszyn ma rodzaj ich obróbki wykończeniowej, podczas której ostatecznie kształtowane są wymiary i właściwości użytkowe warstwy wierzchniej [1, 2]. Korzystne właściwości otrzymuje się wskutek obróbki nagniataniem. Nagniatanie jest powierzchniową obróbką plastyczną (rys.1), realizowaną na obrabiarkach skrawających jako obróbka wykończeniowa i umacniająca, m. in. zamiast tradycyjnej obróbki ścierniej przez szlifowanie, dogładzanie czy honowanie. W procesie nagniatania nie wytwarza się wiórow i iskier, jak w przypadku stosowania obróbki wiórowej i ścierniej. Z tego względu m. in. zalicza się obecnie nagniatanie do ekologicznych metod obróbki. W technice wytwarzania następuje obecnie wzrost udziału metod bezwiórowych w tym także w obróbce dokładnych części maszyn [3, 4]. Współczesne obrabiarki CNC umożliwiają, bowiem obróbkę powierzchni z dużą dokładnością wymiarową (w 7 i 6 klasie dokładności), co umożliwia w praktyce osiągnięcie wielu korzyści wynikających ze stosowania nagniatania na obrabiarkach skrawających.

Należą do nich:

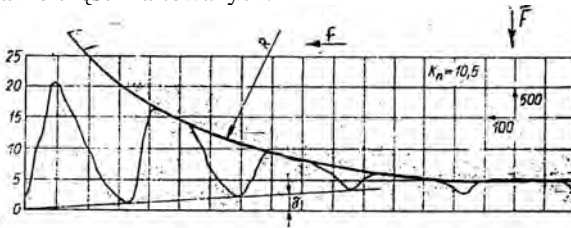
- możliwość uzyskania powierzchni o dużej gładkości ($R_a=0,32\pm 0,04\mu\text{m}$) i dużym udziale nośnym profilu chropowatości (90%) (rys. 2),
- brak w nagniatanej powierzchni ziaren ściernych,
- wzrost wytrzymałości na zużycie ściernie powierzchni i wytrzymałości zmęczeniowej,
- możliwość stosowania narzędzi nagniatających na uniwersalnych tokarkach jednocześnie z obróbką skrawaniem (koncentracja obróbki na jednym stanowisku) [4],
- eliminacja lub ograniczenie czasochłonnych operacji takich jak gładzenie (honowanie), docieranie, szlifowanie, polerowanie,
- możliwość uzyskania wzrostu twardości powierzchni (do 40%) [2],
- duża wydajność procesu (jedno przejście robocze narzędzia) i redukcja kosztów wytwarzania, szczególnie w jednoczesnej obróbce skrawaniem i nagniataniem.

¹⁾ Politechnika Gdańska, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji.



Rys. 1. Odształcenia plastyczne warstwy wierzchniej po nagniataniu: a) schemat, b) warstwa wierzchnia przedmiotu ze stali 45 po nagniataniu krążkiem z $F=5\text{kN}$, $f=0,214\text{mm/obr}$, $R=10\text{mm}$, powiększenie ok. 250x

Podczas obróbki nagniataniem w zależności od rodzaju procesu, możemy zwiększyć dokładność wymiarową przedmiotów lub praktycznie powtórzyć istniejącą dokładność po ostatnim zabiegu obróbki toczeniem lub roztaczaniem. Dokładność obróbki poprzedzającej nagniatanie ma zawsze wpływ na ostateczne wymiary obrabianego przedmiotu, szczególnie, gdy docisk elementów nagniatających do przedmiotu jest realizowany przez sprężyny lub układ pneumatyczny. Zwiększenie dokładności obróbki poprzedzającej, np. podczas toczenia na centrach obróbkowych i tokarkach CNC stwarza szansę na szersze stosowanie nagniatania w obróbce dokładnych i długich cylindrach hydraulicznych w tym także części hartowanych.



Rys. 2. Przebieg odształcenia nierówności powierzchni po toczeniu ($R_{zt} = 80 \mu\text{m}$) podczas nagniatania rolką o $R=10\text{mm}$ z siłą docisku $F=2\text{kN}$

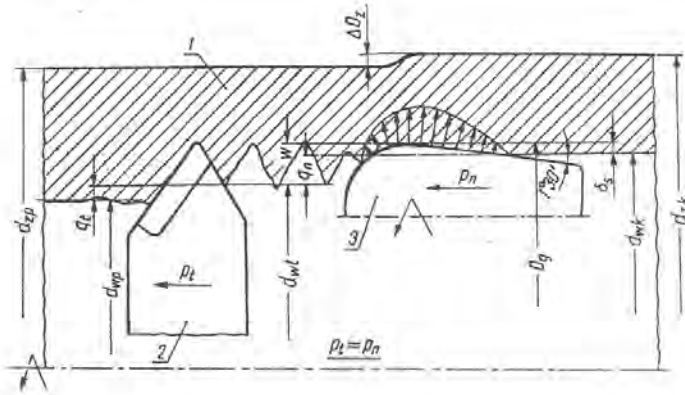
OBRÓBKA TULEI CYLINDRÓW HYDRAULICZNYCH

W technologii cylindrów hydraulicznych i pneumatycznych najbardziej pracochłonna i trudna do wykonania jest tuleja cylindra, w której przesuwa się tłok wraz z uszczelnieniami. Powierzchnia robocza otworu tulei powinna być bardzo gładka $R_a=0,16\div 0,32\mu\text{m}$ oraz odporna na zużycie ścierne i chemiczne.

Wykonanie powierzchni otworów roboczych tulei cylindra jest szczególnie trudne, gdy stosunek ich długości do średnicy otworu jest większy od 10. W tradycyjnej technologii tulei stosuje się operacje obróbki skrawaniem przez roztaczanie i gładzenie, (honorowanie). Jest to metoda stosunkowo droga i z tego między innymi powodu poszukuje się nowych ekonomicznych metod produkcji tulei cylindrowych, np. nagniatanie z jednoczesnym roztaczaniem specjalnymi głowicami.

Nagniatanie może być zrealizowane jako oddzielny zabieg po zabiegu roztaczania otworu lub też jako łączny zabieg nagniatanie z jednoczesnym roztaczaniem. Schemat takiej obróbki przedstawiono na rys. 3. W tym przypadku trzeba stosować specjalne głowice skrawająco-nagniatające, w których przed stopniem nagniatającym wbudowane są noże roztaczające 2. Rolki nagniatające 3 toczą się po pierścieniowych bieżniach stożko-

wych lub kształtowych, tworząc z obrabianą tuleją układ nagniatania o tzw. docisku sztywnym. Docisk ten zależy od wartości wcisku nagniatania, (w), który może być regulowany wysunięciem noża wykańczaka 2 w stosunku do nastawionego wymiary D_g stopnia nagniatającego. Wymiar otworu po przejściu głowicy zmniejsza się w stosunku do wymiaru nastawionego D_g o wartość odkształcenia sprężystego δ_g . Zwiększa się natomiast średnica zewnętrzna obrabianej tulei cylindrowej (zwłaszcza cienkościennej) o wartość ΔD_z .

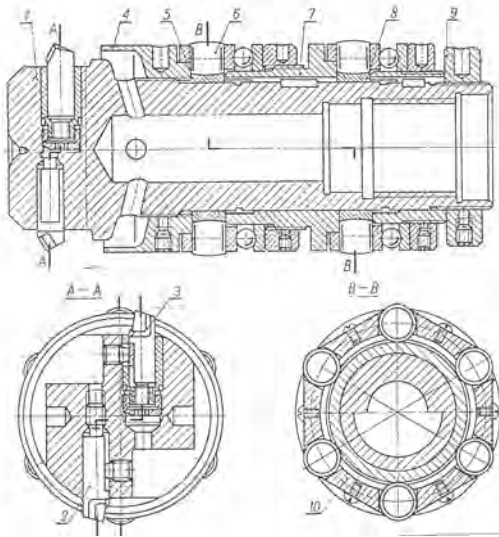


Rys. 3. Schemat obróbki tulei cylindrowej przez nagniatanie z jednoczesnym roztaczaniem: 1- obrabiana tuleja, 2- nóż roztaczający, 3- rolka nagniatająca specjalnej głowicy wielorolkowej, q_t – naddatek na toczenie, q_n – naddatek na nagniatanie, w – wciski nagniatania, δ_g – odkształcenie sprężyste, ΔD_z – zwiększenie średnicy zewnętrznej w skutek odkształcenia plastycznego, D_g – średnica stopnia nagniatającego głowicy, d_{wk} – średnica otworu po nagniataniu, d_{zk} – średnica zewnętrzna tulei po obróbce, d_{wt} – średnica otworu po roztaczaniu, d_{wp} – średnica otworu tulei po obróbce zgrubnej, d_{sp} – średnica zewnętrzna tulei przed obróbką

Dokładność obróbki, zwłaszcza kształtu, zależy w dużym stopniu od równomierności ścianki rury, z której wykonuje się tuleje cylindrowe i jednorodności jej materiału. W niektórych przypadkach rury te należy toczyć zgrubnie na powierzchni zewnętrznej (bazując na otworze), w celu wyrównania grubości ich ścianek. Można wówczas uzyskać po nagniataniu dokładność wymiaru i kształtu otworu w klasie IT7.

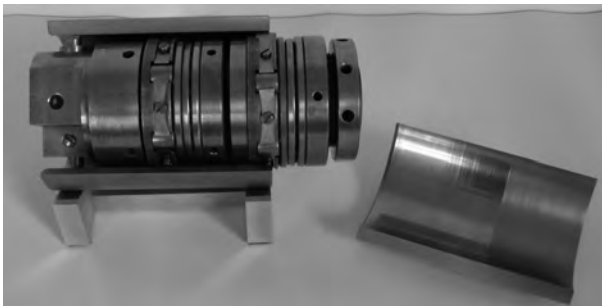
NARZĘDZIA I STANOWISKO OBRÓBKOWE

Głowice roztaczająco–nagniatające wprowadza się do otworu obracającej się tulei na drażonym trzpieniu (rys. 5, poz. 5), przez który doprowadza się ciecz chłodząco-smarującą. Ciecz ta, oprócz chłodzenia i smarowania strefy obróbki, wypłykuje w kierunku posuwu wióry, które wypływają przez otwór obrabiany do urządzenia filtrującego. Wydatek przepływu cieczy wynosi 1÷8 l/s. Przedstawiona schematycznie na rys. 4 głowica ma w części skrawającej dwa noże. W części nagniatającej są umieszczone rolki nagniatające (od 6-ciu sztuk w zależności od średnicy). Wypływ cieczy do części skrawającej następuje przez szczelinę obwodową o szerokości 0,3÷0,4mm, znajdującą się między korpusem głowicy a powierzchnią obrabianego otworu (jego części po nagniataniu).



Rys. 4. Konstrukcja dwurzędowej głowicy ($\varnothing 100\text{mm}$) roztaczająco-naginatącej z mikroregulacją wymiaru (patent PRL nr 91550) i wewnętrznym przepływem cieczy chłodzącej; 1- korpus, 2 – nóż skrawający, 3 – nóż wykańczak z mikroregulacją, 4- nakrętka ustawcza, 5- kształtowa bieżnia, 6 – rolka baryłkowa, 7 – tuleja dystansowa, 8 – bieżnia, 9 – nakrętka blokująca, 10 – koszyczek rolek

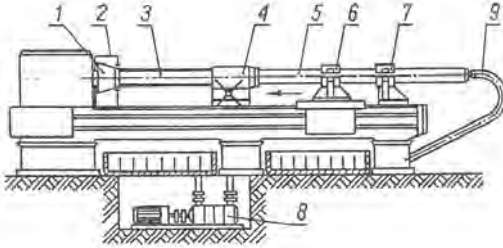
Na rys. 4 przedstawiono konstrukcję głowicy roztaczająco-naginatącej wg patentu PRL nr 90483 (Politechnika Gdańska). Jest ona przeznaczona do obróbki umacniającej i gładkościowej głębokich otworów $\varnothing 180\text{H}8$ w tulejach cylindrowych. W części skrawającej umieszczone są dwa noże skrawające 2 i 3, przy czym nóż wykańczak 3 ma dokładną regulację wysunięcia w kierunku promieniowym. Skrawanie dwoma nożami w takich głowicach, rozmieszczonymi na obwodzie co 180° , jest korzystne ze względu na rozkład sił skrawania i wymaganą dokładność kształtu obrobionego otworu ($IT7\div IT8$). Widok głowicy cylindrowych pozycji roboczej cylindrowych fragmentem tulei ze strefy obróbki przedstawiono na rys 5. Obróbkę tulei cylindrowych z użyciem głowic roztaczająco-naginatąjących można przeprowadzić na tokarkach specjalizowanych, lub wiertarkach do głębokiego wiercenia. Schemat takiej adaptacji tokarki przedstawiono na rys. 6. Polega ona przede wszystkim na zamontowaniu na jej łożu, między wrzecionem a suportem zespołu mocującego prowadzącego 4 z częścią mocującą cylinder 3 oraz tuleją do wprowadzania głowicy.



Rys. 5. Widok głowicy w pozycji roboczej wraz z fragmentem tulei cylindra ze strefy obróbki

Obrabiarka musi mieć drążony trzpień 5, na którym mocuje się głowicę i odłącza instalację obiegu cieczy chłodzącej 9. Trzpień ten jest podparty na suporcie wzdłużnym

tokarki (w uchwycie 6), od którego uzyskuje przesuw, prowadzony jest także w podtrzymce 7. Należy również zainstalować pompę cieczy chłodzącej 8 o dużym wydatku, oraz sita dla oddzielenia wiórów od cieczy. Cylinder podczas obróbki obraca się, a głowica wykonuje ruch posuwowy. Po skończonym cyklu głowicę odkręca się z trzpienia roboczego 5 w specjalnym otworze obudowy uchwytu centrująco-zabierającego 1.

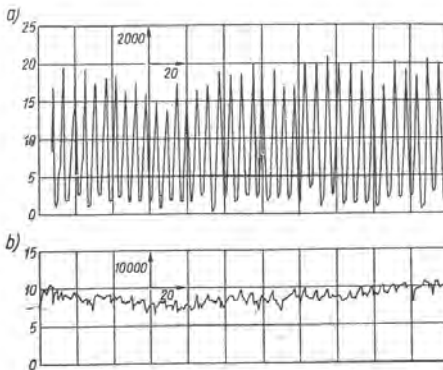


Rys. 6. Stanowisko do obróbki tutei cylindrycznych głowicą roztaczająco-nagniatającą na tokarce uniwersalnej: 1- uchwyt z zabierakiem centrującym, 2 – osłona, 3 – obrabiany cylinder, 4- zespół mocujący prowadzący, 5 – trzpień drażony, 6 – uchwyt trzpienia na suporcie, 7 – podtrzymka, 8- pompa chłodziwa, 9 – przewód elastyczny cieczy

WYNIKI BADAŃ I ZALECENIA TECHNOLOGICZNE

Głowice roztaczająco-nagniatające można stosować do otworów o żądanej chropowatości $R_a = 0,16 \div 0,32 \mu\text{m}$, w klasie wymiarowej IT8, z następującymi warunkami obróbki (dla cylindrów ze stali R35 lub R45): $v_c = 2 \div 2,5 \text{ m/s}$, $f = 0,2 \div 0,3 \text{ mm/obr}$, $w = 0,04 \div 0,08 \text{ mm}$ przy wydatku objętościowym cieczy chłodząco-smarującej $4 \div 5 \text{ l/s}$.

Przykład uzyskanej chropowatości powierzchni tutei ze stali 45 po obróbce głowicą roztaczająco-nagniatającą (rolkową) przedstawiono w postaci profilogramu na rys 7. Warunki obróbki były następujące: prędkość nagniatania i roztaczania $v_c = 2 \text{ m/s}$, posuw głowicy $f = 0,2 \text{ mm/obr}$, wartość wciśnięcia $w = 0,08 \text{ mm}$. Chropowatość po toczeniu (nożem wykańczającym z płytką z węglika S20) wynosiła $R_{at} = 3,5 \mu\text{m}$ a po nagniataniu $R_{an} = 0,15 \mu\text{m}$. pomiary twardości HV powierzchni nagniatanej wykazały, że twardość powierzchni tutei była większa o 50 % od twardości powierzchni po wytaczaniu.



Rys. 7. Przykładowy profilogram chropowatości powierzchni tutei cylindra hydraulicznego ze stali 45 obrobionego głowicą roztaczająco-nagniatającą: a) chropowatość powierzchni po roztaczaniu ($R_{at} = 3,5 \mu\text{m}$), b) chropowatość powierzchni po nagniataniu ($R_{an} = 0,15 \mu\text{m}$)

Przy doborze technologicznych parametrów obróbki tutei cylindrycznych głowicami roztaczająco-nagniatającymi należy zwracać szczególną uwagę na dobór właściwego dla

materiału tulei wcisku nagniatania, ponieważ jego wartość większa od 0,08mm może spowodować niedopuszczalne łuszczenie powierzchni.

WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz eksploatacyjnych można wyciągnąć następujące wnioski, dotyczące możliwości stosowania obróbki głowicami roztaczająco-nagniatającymi:

- stosowanie powierzchniowej obróbki plastycznej przez nagniatanie w technologii cylindrów hydraulicznych i pneumatycznych jest korzystne, ponieważ wytwarzana warstwa wierzchnia ma twardość zwiększoną ok. 40% a chropowatość powierzchni osiaga $R_a=0,16\pm 0,32\mu\text{m}$, oraz mniejszy powinien być współczynnik tarcia w porównaniu z powierzchniami obrobionymi przez skrawanie metodą gładzenia [2],
- nagniatanie, szczególnie z zastosowaniem głowic skrawająco-nagniatających, jest ekonomiczną operacją obróbki tulei cylindrów o znacznej długości, wymaga jednak specjalnego oprzyrządowania stanowiska tokarskiego i jest zalecane dla seryjnej produkcji cylindrów hydraulicznych.

PIŚMIENNICTWO

1. Kaczmarek J., Przybylski W.: The surface characteristic after sliding and rolling burnishing, *Advanced in Manufacturing Science and Technology*, Vol. 26, Nr 1, KBN PAN Rzeszów 2002.
2. Przybylski W.: *Technologija powiechnostnoj plasticzeskoj obrabotki*, Metallurgija, Moskwa 1991.
3. Przybylski W.: CNC Machine Tool for Burnishing – New Conception, *International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIM'96*, Zakopane, 1996.
4. Przybylski W., Siemiątkowski M.: Selecting manufacturing variants of shafts using integrated CNC turning-burnishing technologies, *Annals of DAAAM Symposium*, Vienna 1999.

IMPLEMENTATION OF BURNISHING PROCESS IN MANUFACTURING THE HYDRAULIC CYLINDER

Summary

The integrated technology of sleeves of hydraulic cylinders presented in this article is based on the machining process combined with plastic processing of burnishing. There is the construction of special chambering–burnishing heads the scribed and analyzed together with the process on machining station and result at of processing of sleeves of diameter 100H7 and 1400mm length. The achieved roughness of the surface was $R_a=0,16\pm 0,32\mu\text{m}$. The proposed technology of hydraulic cylinders' machining is several times shorter than traditional which is based on chambering and honing.

Keywords: hydraulic cylinder, burnishing, tools.

