

I Forum Integracyjne HAJNÓWKA 2002

Konferencja Polskiego Stowarzyszenia Upowszechniania Komputerowych Systemów Inżynierskich „ProCAx”

Przeszło dwa lata temu powstało Polskie Stowarzyszenie Upowszechniania Komputerowych Systemów Inżynierskich „ProCAx”. W minionym okresie główny nacisk członkowie stowarzyszenia położyli na organizowanie warsztatów dla nauczycieli oraz ułatwienie dostępu do profesjonalnego oprogramowania CAx środowiskom szkolnym i uczelnianym. Forum Integracyjne HAJNÓWKA to sposób wymiany doświadczeń w upowszechnianiu systemów CAx, a przy okazji walne zebranie członków Stowarzyszenia. Spotkanie posłużyło wymianie informacji i doświadczeń w zakresie rozwoju, wdrażania i eksploatacji komputerowych systemów wspomagania prac inżynierskich. Szczególną rangę nadano problemom związanym z przygotowaniem absolwentów polskich szkół do konkurowania na przyszłym rynku pracy. Nowoczesne przedsiębiorstwa oferują miejsca pracy jedynie osobom o wysokim poziomie kwalifikacji zawodowych. Podczas trzech dni obrad wygłoszono szereg referatów i przeprowadzono warsztaty tematyczne. W celu przybliżenia uczestnikom zasady pracy inżynierów w krajach Unii Europejskiej, o wygłoszenie referatów poproszono polskich inżynierów pracujących na co dzień w Niemczech.

Na łamach naszego miesięcznika przedstawiamy wybrane referaty. Mamy nadzieję, że fotografie wiernie oddadzą atmosferę forum. Stowarzyszenie już teraz zaprasza zainteresowanych do udziału w kolejnym forum organizowanym jesienią przyszłego roku.

Więcej informacji na stronie Stowarzyszenia www.procacx.prv.pl

Artur Grochowski



Proces projektowania parametrycznego w systemie SOLIDWORKS 2001.

Chcąc sprostać rosnącym wymaganiom rynku, co do jakości projektowanego wyrobu oraz długości czasu potrzebnego do uruchomienia produkcji, biura konstrukcyjne zmuszone są stosować najnowocześniejsze technologie wspomagające pracę inżyniera konstruktora. Obok programów zarządzających danymi, kosztorysowych itp. współcześni konstruktorzy maszyn i urządzeń muszą korzystać z programów CAD/CAM do modelowania 3D (trójwymiarowego). W niniejszym artykule zostanie omówiony proces projektowania stosunkowo prostego detalu, jakim jest etui na okulary z elementami formującymi (stempel i matryca) formy wtryskowej, służącej do wykonania tego etui, na przykładzie parametrycznego programu CAD, jakim jest SolidWorks2001.

Idea produktu i jej przeniesienie do wirtualnej przestrzeni

Bardzo często nowy produkt powstaje w umyśle projektanta wzornictwa przemysłowego, a następnie odwzorowywany jest ręcznie w postaci tzw. master modelu. Konstruktor staje więc przed problemem przeniesienia detalu do wirtualnej przestrzeni komputera, aby na modelu komputerowym dopracowywać szczegóły konstrukcyjne. Systemy CAD dają wiele możliwości odwzorowania rzeczywistego modelu. Można to zrobić ręcznie, odwzorowując kształt detalu na podstawie pomiarów. Jednak sposób ten zdaje egzamin tylko w przypadku prostych detali (tzn. takich, które nie są zbudowane ze skomplikowanych powierzchni o złożonym kształcie). Najbardziej odpowiednia wydaje się dyskretyzacja cyfrowa (skanowanie) powierzchni detalu np. przy pomocy maszyny pomiarowej i odtworzenie kształtu detalu w oparciu o uzyskane dane. Problem obróbki danych (np. z maszyn współrzędnościowych) w celu odtworzenia topografii powierzchni jest dosyć złożony i nie będzie omawiany w niniejszym artykule. Należy jednak nadmienić, iż w systemach CAD są moduły wspomagające ten proces (tzw. moduły rekonstrukcji powierzchni „surface reconstruction”).

Odwzorowanie kształtu etui

W przypadku etui zastosowano pomiar wzorca, w wyniku którego uzyskano punkty w

charakterystycznych przekrojach. Punkty te połączono odcinkami i w postaci pliku dxf wczytano do SolidWorks2001. W ten sposób uzyskano rodzaju szablonu, według którego za pomocą standardowych poleceń SolidWorks2001 odtworzony został kształt etui (rys. 1).



Rys. 1.

Modelowanie w SolidWorks2001

W oparciu o dwie zeskanowane krzywe zbudowano za pomocą operacji SweepExtrude (przeciągnięcia profilu wzdłuż krzywej wiodącej) pierwszą cechę (rys. 2 i 3).



Rys. 2.



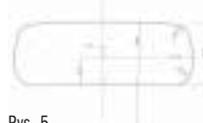
Rys. 3.

Cechę tę następnie odbito symetrycznie poleceniem Mirror (rys. 4):



Rys. 4.

Kolejna operacja to ukształtowanie konturu w widoku z góry. W oparciu o zeskanowane krzywe naszkicowano profil, którym obcięto bryłę utworzoną we wcześniejszych operacjach. Tę fazę modelowania oraz obcięcie dołu etui pokazują rysunki od 5 do 8.



Rys. 5.



Rys. 6.



Rys. 7.



Rys. 8.

Następna operacja modelowania to nadanie „cienkościenności” otrzymanej bryle, by ścianki boczne miały grubość 2,2 mm, zaś górne 1,6 mm (rys. 9).



Rys. 9.

Końcowa faza modelowania etui dodaje kołnierz na obrzeżu oraz zaokrąglenia wykona-



Rys. 10.



Rys. 11.



Rys. 12.

ne zmiennym promieniem (rys. 10, 11).

Po dodaniu kołnierza model etui jest gotowy (rys. 12).

Analogicznie stworzony został model drugiej części etui. W złożeniu projektowane etui przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13.

Modelowanie części formujących (stempla i matrycy formy)

Korzyści z zastosowania systemu CAD (w tym wypadku SolidWorks2001) ograniczają się do tego, iż można w pełni zweryfikować konstrukcję etui (np. na podstawie złożenia 3D można sprawdzić czy nie zachodzą kolizje pomiędzy elementami składowymi etui), a także niemal automatycznie wygenerować dokumentację konstrukcyjną. Jednak systemy CAD pozwalają na osiągnięcie znacznie większych korzyści. W omawianym przypadku zbudowane modele można wykorzystać w dalszym etapie przygotowania produkcji gotowego wyrobu, a mianowicie na ich podstawie zaprojektować elementy tworzące formy powiązane z elementem wyjściowym. Powiązanie to powoduje, że zmiana elementu wyjściowego pociąga za sobą zmianę części formujących. Model CAD-owski można wykorzystać także w procesie szybkiego prototypowania (rapid prototyping), dzięki któremu w bardzo krótkim czasie i przy niewielkich kosztach otrzymujemy model rzeczywisty detalu (np. metodą stereolitografii). Model ten można wykorzystać np. do sprawdzenia poprawności działania konstrukcji, czy do celów marketingowych. Proces tworzenia elementów formujących zostanie pokazany na przykładzie górnej części etui (rys. 14)

Pierwszym krokiem jest stworzenie złożenia formowanej części oraz półfabrykatu stanowiącego „przygotówkę”, z której zostaną wydobyte stempel i matryca (rys. 15)



Rys. 14.



Rys. 15.



Rys. 16.

Kolejny krok to odjęcie materiału etui od materiału „przygotówki”, przy pomocy funkcji Cavity ze standardowego zestawu poleceń SolidWorks2001. Funkcja ta umożliwia także zdefiniowanie przewidywanego skurczu materiału. Po jej wykonaniu otrzymano „przygotówkę” z wybraną przestrzenią na etui (rys. 16). Tak przygotowany model, po zapisaniu na dysku, posłuży do stworzenia kolejno stempla i matrycy. Aby utworzyć matrycę, do nowego pliku wczytuje się geometrię „przygotówki”, jako tzw. Base Part. Funkcja ta gwarantuje powiązanie geometrii matrycy z projektowanym detalem przez plik „przygotówki”. Następnie wycięto część „przygotówki” po stronie stemplowej w wyniku czego otrzymano matrycę. (rys. 17, 18).



Rys. 17.



Rys. 18.



Rys. 19.



Rys. 20.

Postępując analogicznie, otrzymano stempel i zapisano go wraz z matrycą w jednym pliku złożenia. Proces ten został przedstawiony na rys. od 19 do 21.

Takie postępowanie umożliwia sprawdzenie przez stworzone części formujące, wyglądu zaformowanego detalu. Innymi słowy, pozwoli w pewnym sensie na symulację pracy formy. Aby wykorzy-



stać tę możliwość należy w kontekście złożenia stempla i matrycy stworzyć prostopadłościan obejmujący obszar formowania, a następnie poleceniem Cavity odjąć od niego materiał stempla i matrycy (rys. 22 i 23).

Sprawdzając otrzymany detal, można wykryć grube błędy. Porównując zaś masę „wypaski” z elementem wzorcowym, otrzymuje się pewność co do poprawności formowania. Ponieważ kształt formowanego detalu, a w szczególności tzw. powierzchnia zamknięcia był stosunkowo prosty, stworzenie elementów formujących wymagało niewiele operacji. W przypadku konstrukcji o bardziej skomplikowanych kształtach wyseparowanie stempla i matrycy wymaga nieco więcej wysiłku, lecz nie jest niemożliwe. Stworzenie stempla i matrycy nie jest końcowym etapem przygotowywania produkcji części formujących w systemie CAD. Należy jeszcze stworzyć dodatkowe elementy. Są to elektrody służące do elektrodrążenia żeber czy powierzchni formujących w celu nadania faktury. Tworzenie tych elementów przebiega tak samo jak tworzenie stempla i matrycy. Aby poprawić efektywność SolidWorks2001, tworzy się specjalistyczne nakładki przeznaczone do konkretnych zadań. W omawianym przypadku można skorzystać z programów: SplitWorks (wspomagającego podział elementu na poszczególne części formujące), MoldWorks (wspomagającego konstrukcję samej formy wtryskowej), czy też programu MoldFlow (wykorzystywanego do analizy procesy wtrysku detalu).

Obróbka na maszynach CNC

Wykonanie modelu CAD formy wtryskowej, czyli zaprojektowanie formy, choć jest bardzo istotne, stanowi tylko jeden z etapów na drodze wdrożenia produktu na rynek. Kolejnym etapem jest wykonanie formy wtryskowej w metalu. Jeśli konstruowany detal zbudowany jest ze skomplikowanych powierzchni, nieodzowne staje się wykorzystanie innej grupy systemów CAX, a mianowicie systemów wspomagających wytwarzanie CAM (Computer Aided Manufacturing). Za ich pomocą, bazując na geometrii z CAD, tworzy się programy obróbcze na maszynie sterowane numerycznie, takie jak, frezarki, tokarki, elektrodrążarki węgłne i drutowe. Dla zilustrowania przykładowej strategii obróbki matrycy etui (obróbka zgrubna i półwykańczająca) wykorzystano moduł CAM zinterowanego systemu CAD/CAM/CAE CATIA V5.7. Wyniki symulacji widoczne są na rys. 24.



*Piotr Skawiński
Piotr Kruk
Instytut Podstaw Budowy
Maszyn Politechnika
Warszawska*

Literatura

Waldemar Roźmiej, Józef Skorowodko, „SolidWorks2001 Nowe możliwości”, „CAD Magazyn” 1/2001
Józef Skorowodko „SolidWorks eDrawings”, CAD Magazyn 2/2001
Józef Skorowodko „Wielowariantowe modelowanie w SolidWorks”, CAD Magazyn 5/2001.

Techniki innowacyjne w kształtowaniu konkurencyjności przedsiębiorstwa w warunkach globalizacji

Wprowadzenie

Za najważniejsze czynniki rozwoju dzisiejszych przedsiębiorstw uważa się innowacyjne technologie. W długich horyzontach czasowych innowacyjne strategie produkcji i organizacji przynoszą więcej niż 68% efektywnej dostępności rynku (R.F. Scholl, VDI-Z 141 nr 9-10/99).

Oznacza to doskonałą koniunkturę przedsiębiorstwa i dalszy rozwój innowacyjnych technologii i produktów. Według tego samego źródła, innowacyjne technologie kreują najważniejsze wskaźniki konkurencyjnej produkcji, a mianowicie:

- redukcję kosztów – do 70%,
- poprawę jakości – do 25%,
- wzrost elastyczności produkcji – do 89,5%,

- innowacyjność produktu – do 100%,
- innowacyjność technologii – do 70,6%,
- poszerzenie produktywności i palety produktów – do 64,7%,
- poprawę wpływu zewnętrznych wskaźników gospodarczych – do 44,4%,
- przenikanie na międzynarodowym rynku – do 58,8%. Za najważniejszą fazę wdra-

zania innowacyjnych procesów należy uznać:

- właściwą ocenę pomysłu (innowacyjnej idei) – 14% powodzenia zamierzeń,
- generowanie pomysłów – ok. 28% powodzenia,
- realizację projektu innowacyjnego – 36% powodzenia oraz
- aplikację i wdrożenie rynkowe – 34 %.

Ogólnie uważa się za innowacyjne takie produkty i procesy, których wiek nie przekracza dwóch lat. Jest to zatem wymagający i ciągle proces wynalazczy, rozwojowy i wdrożeniowy. W dużych koncernach jest to ciągle rozwój własnych produktów, technologii i procesów produkcyjnych. W małych i średnich przedsiębiorstwach nie da się wprowadzać ciągle nowych technologii i kosztownych inwestycji bez odpowiednio przygotowanych ludzi, wyposażenia badawczo-rozwojowego oraz kompleksowego współdziałania z otoczeniem (z rynkiem, dużymi koncernami i konkurencyjnymi SME-s). Należy tu powołać się na tzw. zasadę dziesięciu, opracowaną w Sony Corporation. Wskazuje ona, że koszty korekty błędów popełnionych w trakcie rozwoju nowych produktów i ich procesów wytwórczych przed ich wprowadzeniem na rynek należy mnożyć przez 10 dla każdej z faz rozwojowych. Oznacza to, że jeśli koszt usunięcia błędu w fazie koncepcyjnej wynosi 1, to w fazie planowania technologicznego wynosi już 10, w fazie budowy prototypu 100, w trakcie serii zerowej 1000, a koszty usunięcia tego błędu w produkcie wprowadzonym już na rynek wynosi 10 000. Jest to zatem wystarczająco ważny argument, żeby na każdym etapie rozwoju produktu i planowania procesów produkcyjnych stosować najnowsze metody i narzędzia symulacyjne. We współczesnych warunkach gospodarczych zasadnicze znaczenie odgrywa rynek, jako miejsce sprzedaży produkcji i usług. Nadrzędnym priorytetem funkcjonowania przedsiębiorstwa jest posiadanie produktu lub palety produktów, na które jest popyt. W dalszej kolejności jest organizacja procesów wytwórczych, determinujących koszty produkcji, jakość produktów oraz elastyczność dostosowywania się do potrzeb rynku, zwłaszcza pojawienia się produktu na rynku. Są to cechy działania przedsiębiorstw na globalnym rynku. Zjawisko globalizacji gospodarki sprzyja także równowadze poziomemu popytu i podaży wytwarzanych produktów rynkowych, stwarzając tym samym coraz ostrzejsze warunki konkurencji. Można to osiągnąć przez wprowadzanie coraz krótszych cykli rozwoju produktów i procesów ich produkcji, minimalizacji stanów zapasów i sprawnej

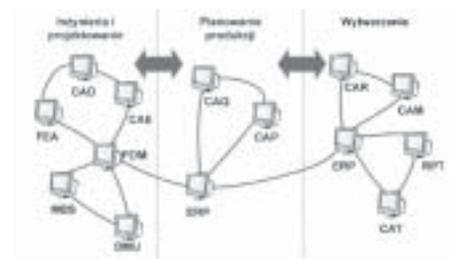
logistyki, oraz stosowanie efektywnych i innowacyjnych koncepcji realizacyjnych w produkcji w rodzaju Lean Production, Just in Time, TQM, Virtual Factory itp. Metody te pozwalają na efektywne gospodarowanie środkami produkcji (w tym finansami), przez doskonałą organizację pracy oraz kompetencję kadry i zastosowanie nowoczesnych narzędzi w pracy inżyniera i menedżera. Dzięki temu nastąpiła integracja zadań i funkcji w obu tych obszarach przedsiębiorstwa, tj. w obszarze zarządzania nim i w realizacji produkcji. Podejmowanie decyzji następuje w oparciu o strategiczne cele przedsiębiorstwa określane w różnych horyzontach czasowych. Jest to szczególnie ważne w warunkach globalizacji gospodarki, kiedy zanikają bariery technologiczne, cenowe i gospodarcze, a przeciętny cykl użyteczności i życia produktów uległ znacznemu skróceniu. Rozwijają się w ten sposób, przez dużą podaż nowoczesnych i innowacyjnych, a zarazem coraz tańszych produktów, spiralę podaży i popytu, co z kolei dalej skraca cykl życia produktu. Tu należy się wyjaśnienie, co rozumie się pod pojęciem „cykl życia produktu”. Otóż produkt może być w pełni sprawny technicznie i funkcjonalnie oraz mieć wszystkie cechy niezmiennione od chwili wyprodukowania, a można uważać, że cykl jego „życia” dobiegł końca. Wynika to ze zmiany kryteriów oceny jego przydatności według aktualnego stanu techniki lub też zmian kryteriów będących wynikiem postępu technicznego, innowacyjnych rozwiązań, mody czy specyfiki kulturowej i cywilizacyjnej. Kryteria oceny funkcjonalności produktów rynkowych zmieniają się w coraz szybszym tempie i również „nakręcają” spiralę popytu i podaży. Z drugiej strony jest to przyczyna obniżania kosztów produkcji, i w efekcie ceny, przez co wyroby stają się bardziej dostępne. Za przykład niech posłużą badania przeprowadzone przez Siemens. Z badań tych wynika, że w latach 1979 – 80 udział produktów młodszymi niż 5 lat w obrocie firmy wynosił 48%, w latach 1984 – 85 było to 55%, a w latach 1995/96 było to już 74%. Widoczny jest więc duży przyrost produktów nowej generacji, wprowadzanych dzięki innowacyjnym technologiom. Nowoczesne produkty są zazwyczaj wyposażone w układy elektroniczne, a nawet komputerowe systemy obsługi i diagnostyki, przez co stają się bardziej funkcjonalne i niezawodne.

Systemy komputerowe w rozwoju produktu

W literaturze inżynierskiej można znaleźć wiele prac poświęconych zastosowaniom technik CAx w projektowaniu i rozwoju produktu [4]. W



Rys.1. Metody i narzędzia w Digital Mock-Up.



Rys.2. Zintegrowane techniki CAx w przedsiębiorstwie.

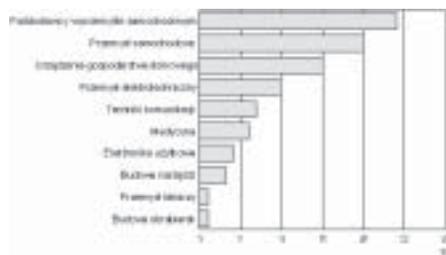
najnowszych zastosowaniach tworzy się konfiguracje wielofunkcyjne, zintegrowane modelami graficznymi i problemowo zorientowanymi, umożliwiającymi nie tylko modelowanie geometryczne 3D, ale również pełne analizy statyczne, dynamiczne, kinematyczne. Analizy te wykorzystują też metody optymalizacji i symulacji. Tak skonfigurowane systemy oraz środowisko ich użytkownika nazywa się techniką DMU lub częściej VR – Virtual Reality (wirtualną rzeczywistością). Na tę technikę zintegrowanego rozwoju produktu składają się metody i narzędzia przedstawione na rys.1. Elementy funkcjonalne i aplikacyjne DMU można podzielić na dwa obszary. Jednym są metody i narzędzia składające się na zintegrowany system modelowania i integracji funkcjonalnej zorientowanej na model produktu i model procesu wytwórczego. Drugim – zorientowane na potrzeby użytkownika narzędzia symulacyjne, umożliwiające weryfikację strukturalną i funkcjonalną projektowanych wyrobów i procesów i wytwarzania. Szczególne znaczenie mają narzędzia i techniki symulacyjne w planowaniu procesów wytwarzania. Są to najpewniejsze metody optymalizacji procesów wytwórczych z uwagi na kryterium czasu realizacji zleceń produkcyjnych, koszty i wykorzystanie posiadanego potencjału produkcyjnego. Zestawienie metod i sposoby integracji technik komputerowych w przedsiębiorstwie ilustruje rys. 2.

Technologie rapid prototyping-rapid tooling

Techniki RP, które na podstawie trójwymiarowego modelu CAD-3D umożliwiają szybkie wyko-

nanie fizycznych modeli, części wzorcowych i prototypów, znajdują coraz szersze zastosowanie w technikach rozwoju produktu i przyczyniają się do szybkiego wytwarzania prototypów i całego produktu oraz przygotowanie jego procesu wytwarzania [5, 6, 8]. Zakres zastosowań tych technik ciągle się powiększa, co jest szczególnie widoczne w przemyśle motoryzacyjnym, gdzie ich udział sięga nawet 25% czasu rozwoju produktu – rys. 3. Można stwierdzić, że w dzisiejszych realiach jest to udział stosunkowo mały. Wiadomo jednak, że z zastosowaniem tradycyjnych technik budowy prototypów (najczęściej metodami obróbki skrawaniem) czas budowy prototypu sięgał nieraz 60% czasu realizowanych prac rozwojowych i projektowych. Warunkiem pełnego wykorzystania tych możliwości jest integracja metod RP z całym procesem rozwoju produktu. Zastosowanie tych metod jest możliwe już we wczesnych fazach procesu rozwoju, np. w fazie wstępnego rozwoju produktu po to, aby odpowiednio wcześniej wytworzyć trójwymiarowy model lub pierwszy prototyp geometryczny. Za pomocą takiej części wzorcowej można już przeprowadzać pierwsze studia projektowe, ergonomiczne i opracowywać konstrukcję narzędzi niezbędnych do produkcji seryjnej. W podobny sposób w dalszych fazach takich jak faza wzorca funkcjonalnego, faza prototypu i faza serii próbnej, wykonuje się wymagane wzorce funkcjonalne i prototypy techniczne.

Wykonane szybko metodami RP prototypy służą przy tym nie tylko do weryfikacji założeń konstrukcyjnych, lecz przede wszystkim do identyfikacji braków konstrukcyjnych na długo przed wykonaniem narzędzi i realizacją produkcji seryjnej – rys. 4. Do tego celu prototypy nie muszą spełniać wszystkich wymagań dotyczących ukształtowania, funkcjonalności i jakości późniejszego, seryjnie wytwarzanego produktu, lecz muszą jedynie umożliwiać wykrycie sła-

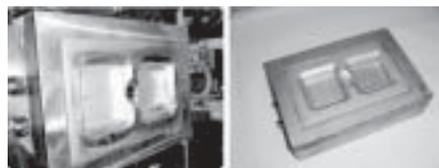


Rys.3. Obszary zastosowań technik RP.



Rys.4. Model CAD3D, model STL oraz model wytworzony techniką stereolitografii.

nych miejsc w jego rozwoju. We wstępnych fazach rozwoju produktu generowane są najistotniejsze składniki kosztów jego wytwarzania, odnoszące się do konstrukcji oraz stosowanych materiałów i technologii. Możliwość wytworzenia w fazie opracowania produktu jego technicznego prototypu pozwala na pierwszą wizualną i funkcjonalną ocenę i jest nieoceniona dla dalszych prac rozwojowych. Wykonanie prototypu tradycyjnymi metodami jest długotrwałe i kosztowne. Długotrwały i kosztowny proces wytwarzania prototypów jest spowodowany dużymi nakładami pracy ręcznej. Budowa prototypów jest wskutek tego związana z nadmiernie wysokimi nakładami robocizny i kosztów, które w niektórych branżach stanowią do 50 – 60% kosztów rozwoju produktu.



Rys 5. Forma wykonana technologią TAFE.

Technologie RP są przydatne szczególnie w tych gałęziach przemysłu i innych dziedzin, w których istnieje potrzeba tworzenia fizycznych modeli. Główny zakres zastosowań technik RP ma miejsce w:



Rys.6. Wyroby wykonane w formach silikonowych.

- budowie prototypów dla celów:
 - Weryfikacji rozwiązań konstrukcyjnych,
 - analizy i oceny rozwiązań konstrukcyjnych,
 - badania przepływów,
 - prowadzenia badań w tunelach aerodynamicznych,
 - doboru materiałów konstrukcyjnych,
- budowie fizycznych modeli dla:
 - poszukiwania koncepcji rozwiązań projektowych,
 - projektowania budowy i wzornictwa przemysłowego,
 - prezentacji marketingowych oraz zleceń od dawcy (klientowi),

- rozwiązywania problemów techniką „case study”,
- wytwarzaniu części i wyrobów dla:
 - produkcji narzędzi i oprzyrządowania,
 - produkcji pomocniczych środków produkcji,
 - rozpoznania marketingowego w postaci serii próbnej,
- projektowaniu i wytwarzaniu narzędzi do:
 - planowania procesów wytwarzania, zwłaszcza montażu,
 - projektowania i wytwarzania narzędzi prototypowych, zwłaszcza dla przetwórstwa cienkich blach,
- projektowania i wytwarzania wzorców i modeli dla:
 - technologii odlewniczych, w tym odlewania w formach piaskowych i metodą traconego wosku,
 - formowania próżniowego, hydro- i termoformowania,
 - formowania przez napyłanie wzorca warstwą metalu.

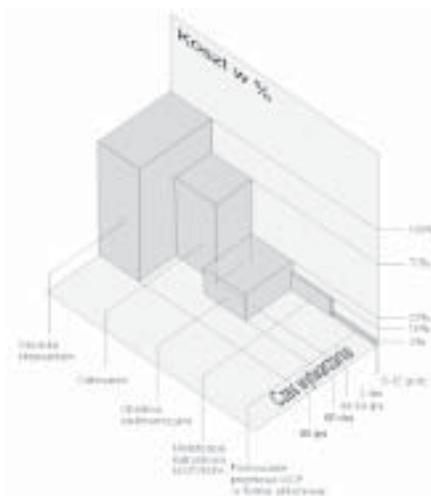
Przykłady zastosowania technik RP/RT w rozwoju produktu stosowane w Pracowni Integracji Systemów CAD/CAM i Rapid Prototyping Instytutu Technologii Maszyn i Automatyki Politechniki Wrocławskiej, podano na rys. 5 i 6.

Podsumowanie

Procesy kształtowania modeli metodami RP/RT/RE, mimo że uchodzą za powolne i dlatego nie są stosowane w produkcji masowej, są jednak efektywne w produkcji jednostkowej i małoseryjnej. Dzięki zastosowaniu tych metod można znacznie skrócić cykl rozwojowy produktu, a także zmniejszyć nakłady na jego opracowanie i wdrożenie do produkcji. Możliwość wytwarzania przedmiotów bez stosowania specjalnego oprzyrządowania, tzn. narzędzi, form lub matryc, stała się niewątpliwie decydującym czynnikiem wzrostu zaintereso-

wania tymi metodami. Kolejną przyczyną rozwoju i zastosowań tych technologii jest łatwość automatyzacji procesu wytwarzania. Technologie te zostały opracowane z uwzględnieniem bezpośredniej integracji z komputerowo wspomaganym konstruowaniem CAD.

Dotychczas większość przemysłowych procesów RP jest ukierunkowana na wytwarzanie części z polimerów. Dzięki wyeliminowaniu form wtryskowych uzyskuje się duże oszczędności czasu i kosztów w przypadku produkcji realizowanej w krótkich seriach. Jednakże zakres materiałów stosowanych w technologiach RP stale się rozszerza. Obejmują one wszelkiego rodzaju metale, polimery, materiały ceramiczne, drewno, materiały wzmocnione włóknami oraz różnego rodzaju kompozyty na osnowie metalowej lub polimerowej. Dowolność uzyskiwanych kształtów przedmiotów jest kolejnym czynnikiem przemawiającym za rozszerzeniem stosowania technologii RP/RT/RE. Nie występują bowiem prawie żadne ograniczenia kształtu wytwarzanych części. Metodami RP można wykonywać przedmioty o bardzo złożonych kształtach wewnętrznych, których wykonanie innymi sposobami byłoby niemożliwe. W procesach RP występują problemy związane z jakością uzyskiwanych przedmiotów. Oprócz schodkowego wyglądu nachylonych powierzchni, który wynika z warstwowego tworzenia przedmiotu, występują problemy związane ze skurczem materiałów podczas procesów (np. w stereolitografii), a także porowatością (SLS). Dlatego prowadzone są prace nad rozwo-



Rys.7. Efektywność stosowania technik Rapid Tooling.

jem materiałów odznaczających się niewielkim skurczem oraz nad odpowiednimi strategiami prowadzenia procesu wytwarzania. Technologie RP/RT/RE umożliwiają powstanie fizycznego modelu wyrobu wkrótce po opracowaniu go w systemie CAD 3D. Technologie te są przydatne szczególnie w tych gałęziach przemysłu i tych dziedzinach, w których istnieje potrzeba tworzenia fizycznych modeli. I tam przede wszystkim zaczynają odgrywać swoją istotną rolę współczesne metody, techniki oraz narzędzia pracy inżyniera. Powodzenie we wdrażaniu nowoczesnych technologii i nowoczesnych metod wytwarzania oraz we wprowadzaniu nowych narzędzi projektowania i rozwoju produktu (concurrent engineering, rapid engineering) w postaci znaczących

efektów uzyskuje się tylko wówczas, wdrożenie obejmuje wszystkie obszary przedsiębiorstwa i odbywa się z równoczesnym dokształcaniem kadry i wprowadzaniem odpowiednich systemów motywujących jej aktywność.

Edward CHLEBUS

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej

- Chlebus E., „Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji”, WNT Warszawa 2000
- Chlebus E., Cholewa M., Dudzik R., Kozera M., „Concurrent preparing of manufacturing process”, Proc.7th International DAAAM Symposium, Vienna, 17-19th October 1996
- Chlebus E. (red.) i in., „Systemy planowania i sterowania produkcją, w: Automatykacja Produkcji”, AP'97. Wyd. PWr., Wrocław 1997
- Oczko K.E., „Rapid Prototyping – znaczenie, charakterystyka metod i możliwości”, „Mechanik” 1997, nr 10
- Oczko K.E., „Rapid Prototyping i Rapid Tooling – rozwój metod i technik szybkiego wytwarzania modeli, prototypów i małoseryjnych wyrobów”, „Mechanik” 1998, nr 4
- Steinhilper R, Stender S., „Product-Life-Cycle-Management, Seminar: Produkte mit technischer Intelligenz entwickeln, herstellen und betreiben”, Fraunhofer IPA Technologie-Forum F 42, 1.Juli '99, Stuttgart 1999.
- VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, „Rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion, Band 3: Auftragsabwicklung”, VDI-Verlag, Düsseldorf 1991
- Weiss Z., Chlebus E., Knosala R., „Projektowanie współbieżne wyrobów – Concurrent Engineering”, „Przegląd Mechaniczny” 1997/20

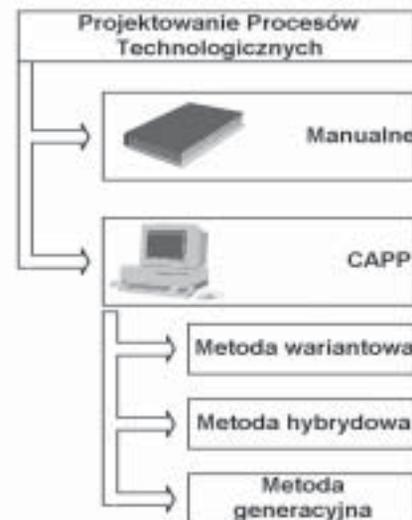
Podobieństwo części a systemy CAPP

W niniejszej pracy krótko scharakteryzowano systemy wariantowe CAPP oraz kodowanie i klasyfikację wykorzystywane podczas grupowania części. Opisano tu także rodzaje kryteriów i istotę podobieństwa konstrukcyjno - technologicznego części klasyfikowanych.

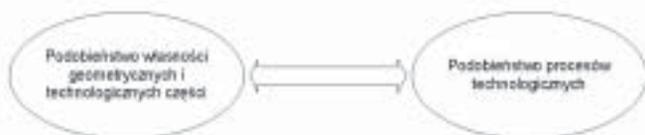
W dobie szybkiego rozwoju techniki, stałe doskonalenia konstrukcji maszyn i skrócenia „życia” produktu oraz częstej zmiany obiektów produkcji problemem niezmiernej wagi stało się wprowadzenie do produkcji jednostkowej i małoseryjnej metod, zapewniają-

cych zarówno wysoką jakość, jak i wydajność charakterystyczną dla produkcji wielkoseryjnej i masowej. Zagadnienie to może być rozwiązywane na różne sposoby. Jednym z nich wykorzystywanym do tych celów jest technologia grupowa (GT). Opiera się ona na założeniu, że części podobne pod względem konstrukcyjnym będą miały podobny proces technologiczny (rys. 1).

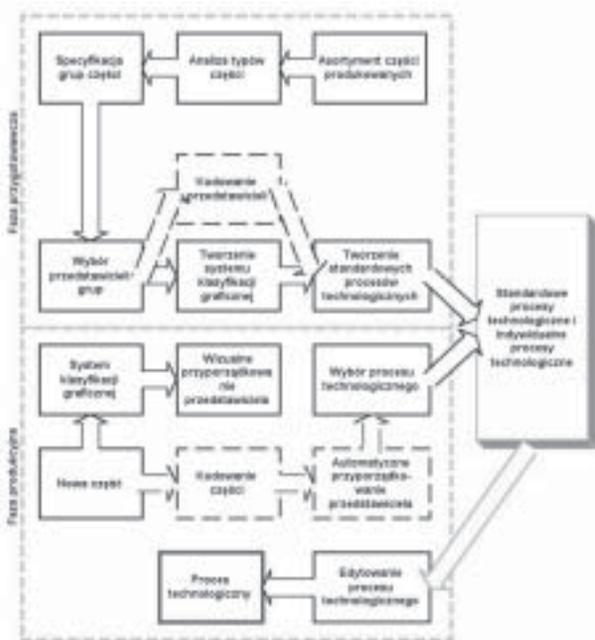
Założenie takie pozwala grupować części w rodziny, dla których opracowuje się grupowy proces technologiczny, bądź dokonując niewielkich zmian konstrukcyjnych, zwiększa się seryjność produkcji części już produkowanych. GT jest stosowan, jak już



Rys. 2. Podział metod planowania procesów technologicznych.



Rys. 1. Powiązania pomiędzy podobieństwem cech części a procesem technologicznym. [wg 3]



Rys. 3. Schemat systemu wariantowego CAPP [wg 1]

wspomniano, podczas tworzenia procesu technologicznego między innymi w systemach komputerowego wspomaganie projektowania procesów technologicznych (CAPP). Metodą wykorzystującą GT w systemach komputerowych jest metoda wariantowa (rys. 2). Wykorzystuje się w niej kodowanie i schematy klasyfikacji, według których wyszukiwany jest wcześniej opracowany proces technologiczny innej części, będący podstawą do opracowywania nowej dokumentacji technologicznej. Proces technologiczny jest manualnie dostosowywany do kształtu i wymiarów części. Schemat systemu wariantowego CAPP został przedstawiony na rysunku 3.

METODY TWORZENIA KLASYFIKACJI CZĘŚCI

Jednym z pierwszych kroków w przypadku stosowania technologii grupowej jest segregowanie części na rodziny na podstawie ich cech charakterystycznych. Zazwyczaj są to właściwości geometryczne lub technologiczne. Geometryczna klasyfikacja uwzględnia rozmiary oraz zasadniczy kształt (wałki, tuleje, itp.), natomiast klasyfikacja technologiczna jest przeprowadzana na podstawie typu, zawartości i kolejności operacji. Typ operacji jest scharakteryzowany przez sposób obróbki, metodę zamocowania, przebieg i parametry procesu obróbkowego. Identyfikacja grup części na podstawie podobieństwa umożliwia osiągnięcie znacznych korzyści, głównie w produkcji małoseryjnej i czasowo wznawianej. Dlatego niezbędne jest zaklasyfikowanie części do od-

powiednich grup w celu zastosowania technologii grupowej. W technologii tej używa się głównie metod klasyfikacji części:

klasyfikacji graficznej (wizualna), kodowania i klasyfikacji.

Pierwszy sposób to klasyfikowanie części wizualnie za pomocą systemów klasyfikacji graficznej (mapy klasyfikacji graficznej). Sposób ten jest znany i ceniony w szerokim gronie

użytkowników z powodu swojej prostoty i przejrzystości. Klasyfikacja wizualna jest oparta na wizualnym porównaniu przez technologa cech charakterystycznych i zaklasyfikowaniu podobnych części do jednej grupy. Metoda ta jest bardzo prosta, szybka, jednak czasem zawodzi, ponieważ każdy technolog może zaklasyfikować nieco odmiennie tę samą część lub różne części zgrupować w jednej rodzinie. Jest to zatem metoda bardzo subiektywna. Graficzny system klasyfikacji części jest wykorzystany np. w znanym programie SYSKLASS (Słowacja). Jest także używany w programach zaprojektowanych w Czechach np. VUSO i VUSTE.

Metoda analizy toku materiałowego (PFA - Production Flow Analysis) została stworzona w celu analizy kolejności operacji, przez które przechodzą części podczas procesu wytwórczego. Części, które wytwarza się w jednej operacji technologicznej, są klasyfikowane do jednakowych rodzin części. Podobnie możemy przyporządkowywać do odpowiednich grup obrabiarki, których używa się do wykonania wspólnych operacji. W ten sposób powstają tzw. komórki wytwórcze. Dzięki takim działaniom uzyskuje się wyraźną minimalizację transportu części na terenie wydziału, dlatego że części są transportowane w kolejności wykorzystania w procesie technologicznym.

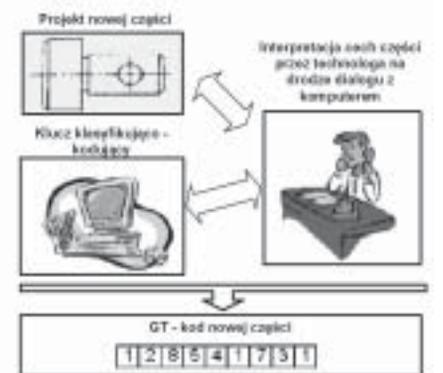
W przypadku metody kodowania i klasyfikacji wykorzystuje się porównywanie GT - kodów części. Części z jednakowym lub podobnym symbolem kodu są przyporządkowywane do jednej grupy. W ostatnim czasie powstała tendencja, by ten sposób zautomatyzować i "nauczyć" komputer rozpoznawać objekty. Za pomocą takich technologii jak: fuzzy logic, analiza Fouriera czy sieci neuronowe, komputer jest zdolny określić stopień podobieństwa części i przyporządkować je do odpowiedniej rodziny. Jak dotąd jednak, systemy te nie są tak godne zaufania, aby mogły być szerzej wykorzystywane, zwłaszcza przy klasyfikacji obiektów 3D.

KODOWANIE I KLASYFIKACJA

Klasyfikacja części jest procesem przyporządkowywania części do grup, nazywanych także rodzinami części, na podstawie opracowanych wcześniej założeń lub zasad. Celem tej działalności jest zgrupowanie części podobnych i oddzielenie odmiennych. Kodowaniem części określa się proces przyporządkowywania im symboli lub cyfr. Symbole takie powinny charakteryzować się odzwierciedleniem właściwości części, umożliwiając ich analizę. Do-



Rys. 4. Zasada klasyfikacji graficznej części [wg 2]



Rys. 5. Zasada klasyfikacji cyfrowej części [opracowanie własne]

tychczas powstało na świecie wiele systemów klasyfikacji i kodowania. Żaden jednak nie został użyty uniwersalnie, ponieważ informacje, które mają być zawarte w danym systemie są uzależnione od przedsiębiorstwa. Kod części nadany przez taki system został określony

mianem GT - kodu. System klasyfikacyjny części to system klasyfikujący i kodujący, stworzony w celu obróbki informacji w trakcie przyporządkowywania i wyszukiwania części. System generuje proste symbole charakteryzujące części, za pomocą określonego systemu kodowania, aby nastąpiło jednoznaczne opisanie elementu kodowanego. Służy on zatem do zapisu cech charakterystycznych przedmiotu w jego kodzie podczas kodowania. Zastosowanie systemów klasyfikacyjnych wiąże się z systematyką zbioru części na podstawie ich segregowania w grupy i ujednoczenia zarówno ich konstrukcji, jak i technologii. Struktura systemu klasyfikacyjno-kodującego i podejście do części klasyfikowanej są zależne od sposobu wytwarzania produktu (np. podczas wytwarzania półfabrykatów klasyfikacja i kodowanie będą inne niż w przypadku obróbki skrawaniem), od drogi produkcji, ewentualnie od specyficznych wymagań użytkownika. W systemach CAPP wykorzystuje się zarówno systemy klasyfikacyjne graficzne (rys. 4), jak i cyfrowe (rys. 5).

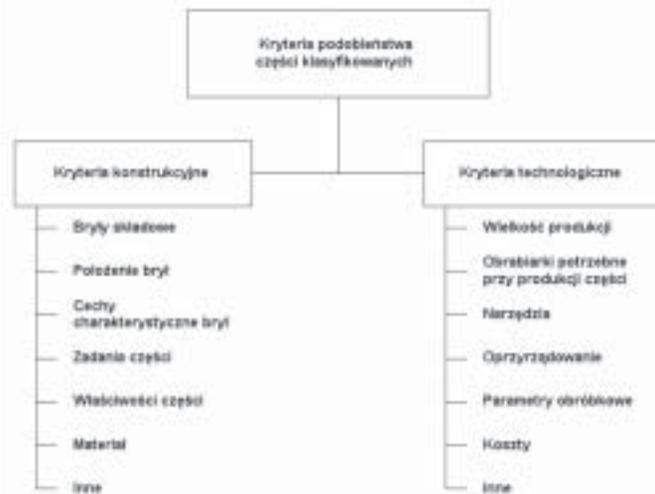
PODOBIENSTWO CZĘŚCI I KRYTERIA PODOBIENSTWA

Określenie podobieństwa części jest szeroko stosowane w technice. Jednak, jeśli mówi się o podobieństwie zarówno konstrukcyjnym, jak i technologicznym, trzeba pamiętać o kryteriach, według których decyduje się o podobieństwie części. Kryteria możemy podzielić na kilka grup (rys. 6): kryteria porządkujące, jakościowe, miarowe i liczebnościowe.

Pod terminem podobieństwa konstrukcyjnego kryje się podobne rozmieszczenie brył składowych, a przede wszystkim podobna konstrukcja pod względem płaszczyzn składowych, ich wymiarów, chropowatości powierzchni, tolerancji oraz materiału części. Przez podobieństwo technologiczne rozumiemy się podobną zawartość operacji technologicznych, będących treścią procesu wykonania części, na którą składają się takie elementy jak: rodzaj obróbki, narzędzia, maszyny, a także parametry obróbki itp. Aby mówić o podobieństwie części, trzeba najpierw określić kryteria podobieństwa. To właśnie kryteria są kluczowym czynnikiem podczas każdego grupowania części. Są one określane bezpośrednio dla przyszłego użytkownika. Rodzaj kryteriów oraz ich liczba podczas segregowania części na rodziny warunkowana jest celem samego grupowania części oraz późniejszym zastosowaniem jego wyników. W przypadku prac prowadzonych na Politechnice Poznańskiej nad systemem klasyfikacyjno-kodującym dla własnych potrzeb kryteria podzielono na dwie podstawowe grupy: konstrukcyjne i technologiczne (rys. 7).

bowiem dobór ten decyduje o poprawnym sklasyfikowaniu i grupowaniu części, co wpłynie na poprawne wykorzystanie informacji do osiągnięcia wyznaczonego celu. W systemach CAPP to właśnie kryteria będą decydowały o poprawności sklasyfikowania zbioru, o podobieństwie konstrukcyjno-technologicznym jego części, a co za tym idzie o poprawności tworzonych procesów technologicznych, ich przebiegu, kosztach i optymalizacji. W konsekwencji zły dobór kryteriów może się stać powodem niepowodzenia całego przedsięwzięcia wprowadzenia systemu wariantowego CAPP w procesie automatycznego projektowania procesów produkcyjnych.

W przypadku tworzenia jakiegokolwiek systemu klasyfikacji bardzo ważne jest określenie zasad podobieństwa i kryteriów, według których części będą dzielone na zbiory rodzin technologicznie podobnych. Dobór rodzaju oraz charakteru kryteriów podobieństwa nie powinien być przypadkowy. Nie jest to łatwe,



Rys. 7. Podział kryteriów podobieństwa dla części klasyfikowanych w CAPP



Rys. 6. Podział kryteriów klasyfikacyjnych

Literatura

1. Kuric I., Sposoby automatizovaného navrhovania technologických postupov, Praca habilitacyjna, Žylina 1996,
2. Kuric I., Matuszek J., Debnar R., Computer Aided Process Planning in Machinery Industry, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Bielsko-Biała 1999,
3. Kuric I., Theory of group technology, Materiały z III Konferencji Naukowo-Technicznej "Systemy oprzyrządowania w budowie maszyn i projektowanie procesów technologicznych SOP '2000", 28-29 września 2000, Kraków,
4. Przybysz E., Analiza porównawcza symboli kodujących z punktu widzenia możliwości wykorzystania w systemach CAPP. Materiały seminarium doktoranckiego pt. "Automatyzacja a počítačová podpora predvýrobných etáp, výrobných a technologických procesov", 28 kwietnia 2002, Zuberec,
5. Przybysz E., Classification and coding parts of mechatronics devices, 6th Proceedings of International Congress "New Ways in Manufacturing Engineering", Presov 2002, 13-14 June 2002.
6. Przybysz E., Pijanowski M., Komputerowe wspomaganie projektowania procesów technologicznych we współczesnym przedsiębiorstwie, Materiały Konferencji Projektowanie Procesów Technologicznych - TPP`01, str. 303-306, 13 czerwca 2001, Poznań,
7. Przybysz E., Pijanowski M., Legutko S., Coding and classification in variant computer aided process planning systems, The Third Proceedings of International Congress Mechanical Engineering Technologies '01, 24-26 czerwca 2001, Sofia,
8. Przybysz E., Pijanowski M., Legutko S., Rola technologii grupowej w komputerowo wspomaganym projektowaniu procesów technologicznych, Materiały Konferencyjne V Szkoły Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, 14-18 maj 2001, Szczyrk.

Komputerowa symulacja kumulacji mikrouszkodzeń ciała polikrystalicznego

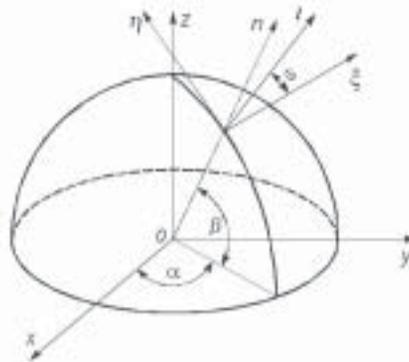
W pracy przedstawiono sposób wykorzystania techniki komputerowej do określania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcji. Do opisu kumulacji uszkodzeń wykorzystano kryterium, bazujące na koncepcji poślizgów. W oparciu o oprogramowanie MATHCAD 2000 wraz z modulem MATHCONNEX stworzono program do numerycznego obliczania kumulacji uszkodzeń w warunkach cyklicznego rozciągania ze skręcaniem próbek rurkowych.

Niezawodność pracy maszyn i urządzeń determinowana jest trwałością poszczególnych ich elementów pracujących często pod działaniem zmiennych obciążeń wieloosiowych. Z tego względu bardzo istotne jest, już na etapie projektowania cech konstrukcyjnych detali maszyn, trafne wyznaczenie ich trwałości zmęczeniowej, a co za tym idzie określenie rzeczywistego zapasu bezpieczeństwa. Pozwala to ocenić stopień pewności pracy elementów w przyszłych warunkach eksploatacyjnych. Analiza przyczyn uszkodzeń maszyn i urządzeń wykazuje, że pęknięcia na skutek zmęczenia materiału stanowią 50-80% [1, 2] wszystkich uszkodzeń mechanicznych konstrukcji, natomiast zjawiska związane z istnieniem karbów były przyczyną około 33% [3, 4] zmęczeniowych zniszczeń elementów w czasie eksploatacji. Z tego wynika, między innymi potrzeba podejmowania dalszych prac, zarówno teoretycznych jak i doświadczalnych, w celu doskonalenia szeroko pojętego projektowania maszyn i konstrukcji. Dotyczy to szczególnie konstrukcji działających w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej, przy jednoczesnych wysokich wymaganiach odnośnie ciężaru, materiałochłonności, niezawodności i kosztów. Zastosowanie obecnej techniki komputerowej umożliwia rozwiązywanie tych problemów projektowych, których rozwiązanie ściśle, ze względu na swoją złożoność matematyczną, byłyby niemożliwe. Przykładem może być zagadnienie kumulacji uszkodzeń w ciele polikrystalicznym, w przypadku działania cyklicznych obciążeń złożonych. W niniejszej pracy obok rozwiązań numerycznych pokazano przykład zastosowania grafiki komputerowej do przedstawienia koncepcji modelu inicjacji pęknięcia.

Podstawy teoretyczne

Ciała polikrystaliczne stanowią konglomerat ziaren różnorodnie zorientowanych.

Mimo, że oddzielne kryształy i ziarna wykazują cechy anizotropii, w skali makro właściwości mechaniczne tych ciał są izotropowe. Taki model odkształcalnego ciała polikrystalicznego wygodnie jest przedstawić jako półsferę o jednostkowym promieniu, na której powierzchni, za pomocą kątów (α , β i ω określa się położenie wszystkich lokalnych płaszczyzn fizycznych oraz systemów poślizgów (rys. 1).



Rys. 1. Współrzędne płaszczyzny poślizgów.

Przyjęto, że inicjacja pęknięcia nastąpi wówczas, gdy uśredniona w określonej objętości materiału wielkość mikrouszkodzeń opisaną funkcją $\psi(\alpha, \beta)$, na półsferze jednostkowej o powierzchni Ω osiągnie wartość krytyczną C , charakterystyczną dla danego materiału, mianowicie:

$$\int_{\Omega} \psi_n(\alpha, \beta) d\Omega = C \quad (1)$$

gdzie:

ψ_n - funkcja gęstości mikrouszkodzeń strukturalnych,

α, β - kąty określające położenie płaszczyzny poślizgów o normalnej n na półsferze jednostkowej.

Przyjęto funkcję oporu plastycznego S_n (w płaszczyźnie n), w postaci [5]:

$$S_n = S_0(1 + r \psi_n + I_n), \quad (2)$$

gdzie:

S_0 - początkowy opór odkształcenia niesprężystego,

r - stała materiałowa,

I_n - funkcja określająca wpływ liczby cykli, która może być wyrażona jako:

$$I_n = B(\tau_n - S_0)e^{-bN} \quad (3)$$

B i b są stałymi materiałowymi, natomiast N - liczbą cykli do zapoczątkowania pęknięcia. Naprężenie styczne τ_n we wzorze (3) określamy na podstawie wzoru transformacyjnego [5]:

$$\tau_n = \sigma_{ij} l_i n_j \quad (i, j = x, y, z), \quad (4)$$

gdzie:

σ_{ij} jest tensorem naprężenia w materiale polikrystalicznym,

l_i, n_j są cosinusami kierunkowymi osi n i l względem układu współrzędnych x, y, z .

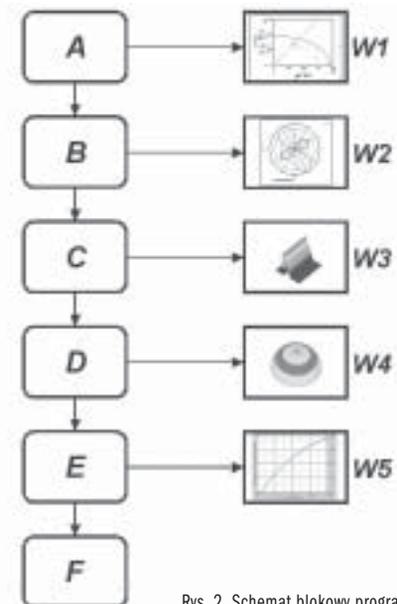
Poślizgi zachodzą w tych lokalnych płaszczyznach fizycznych, określonych na półsferze kątami α, β (rys. 1), w których spełniony jest warunek plastyczności (warunek poślizgu), mianowicie:

$$S_n = \tau_n \quad (5)$$

Szersze omówienie tego zagadnienia znajduje się w pracy [5].

Symulacja komputerowa

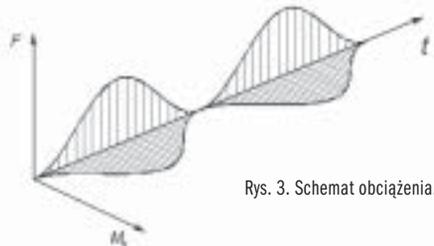
Ścisłe analityczne rozwiązanie zagadnienia kumulacji mikrodefektów strukturalnych w przypadku obciążeń złożonych należy do trudnych od strony matematycznej. Można je łatwo rozwiązać, wykorzystując metody numerycz-



Rys. 2. Schemat blokowy programu.

ne. Do komputerowego wspomaganie obliczeń zastosowano moduł MATHCONNEX zawarty w pakiecie oprogramowania MATHCAD 2000. Za jego pomocą stworzono program umożliwiający obliczanie wartości gęstości mikrodefektów strukturalnych oraz określenie i wizualizację obszarów, w których one wystąpiły. Opracowany program pozwala również na teoretyczne określenie wartości i rozkładu spiętrzonych naprężeń panujących na powierzchni bocznego otworu próbki. Program ma budowę modułową, a jego schemat blokowy przedstawiono na rys. 2.

Sposób obciążania próbki (cykliczne rozciąganie ze skręcaniem) (rys. 3), przy zachowaniu odpowiedniego stosunku naprężeń τ_{xz}/σ_z ,



Rys. 3. Schemat obciążenia.

jak również ich poziom, uwzględniany jest w bloku A programu. Przy zadanych wartościach τ_{xz}/σ_z , R_{pl} , oraz poziomie wyężenia pp określone są, w przypadku wykorzystania hipotezy wyężeniowej, wartości τ_{xz} , i σ_z . Wynik tego etapu obliczeń podawany jest jako wizualizacja W1. Zastosowany rodzaj próbek (rurkowe z bocznym otworem - rys. 4) wymaga określenia rozkładu i wartości spiętrzonych naprężeń na powierzchni otworu. Odpowiada za to blok B programu, gdzie do określenia wyężenia materiału wykorzystano między innymi metodę Kirscha. Graficzna prezentacja tego etapu, to wizualizacja W2.



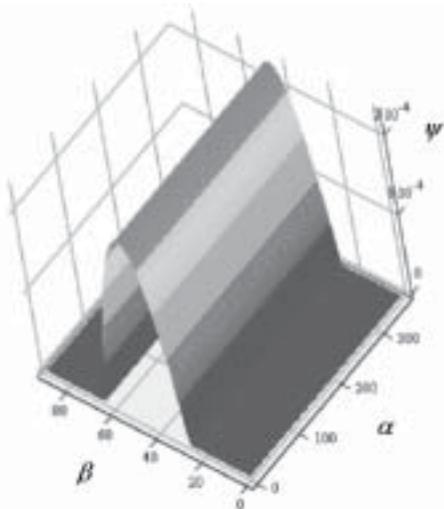
Rys. 4. Schemat próbki.

W bloku C następuje podział półsfery (rys. 1) na dużą liczbę $i = 32400$ elementarnych powierzchni oznaczanych jako:

$$\Delta\Omega_i = \cos\beta_i \Delta\beta \Delta\alpha \quad (6)$$

Na każdym elemencie półsfery $\Delta\Omega_i$ dla danej liczby cykli wyznacza się wartość funkcji gęstości defektów $\psi(\alpha, \beta)$. Graficzne przedstawienie tego etapu to wizualizacja W3 (rys. 5).

Blok D programu odpowiada za sprawdzenie



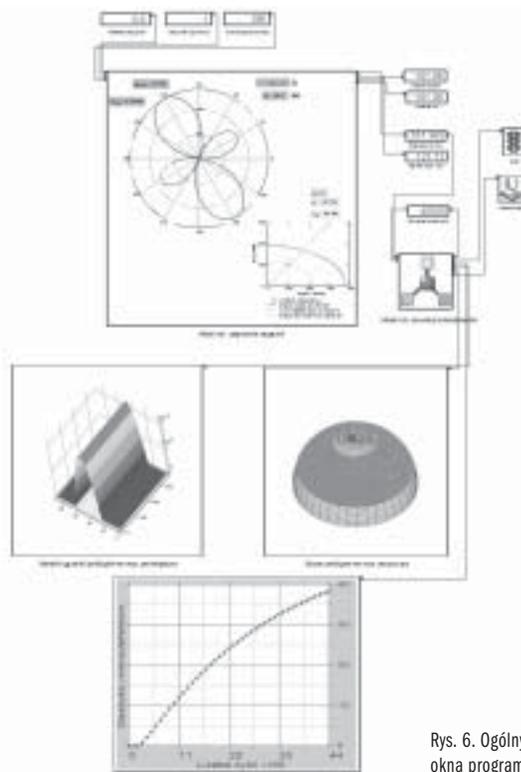
Rys. 5. Przykładowy rozkład gęstości defektów na półsfery we współrzędnych prostokątnych.

nie warunku poślizgu (5). Pozwala to na wyznaczenie obszaru całkowania (obszaru poślizgów) Ω . Podczas wizualizacji W4 dokonuje się transformacji układu współrzędnych prostokątnych do układu współrzędnych sferycznych, w celu zobrazowania „mapy” poślizgów na półsfery jednostkowej. Blok E programu odpowiada za sumowanie gęstości defektów dla wszystkich elementów półsfery przy zadanej liczbie cykli. Każdy następny przyrost liczby cykli obciążenia uwzględnia wartość gęstości defektów obliczoną poprzednio. Na podstawie wartości gęstości defektów, uwzględniając wartość stałych materiałowych, określić można przewidywaną liczbę cykli do momentu inicjacji pęknięcia, w zadanych warunkach obciążenia. Wizualizacja W5 pozwala na ukazanie zależności gęstości uszkodzeń jako funkcji liczby cykli. Moduł F dokonuje eksportu wyników obliczeń do pliku, np. typu CSV, w celu ewentualnej dalszej obróbki. Na rys. 6 przedstawiono ogólny widok okna programu.

Zastosowanie oprogramowania MATHCAD ułatwia i przyspiesza obliczenia dotyczące zmęczenia elementów w warunkach złożonych obciążeń. Przyrównując wygenerowaną przez program wartość nagromadzonych (po odpowiedniej liczbie cykli) defektów strukturalnych z wyznaczoną doświadczalnie stałą C można określić trwałość zmęczeniową elemen-

tów. Niewątpliwą zaletą opracowanego programu jest ułatwiony, bezpośredni wgląd użytkownika w poszczególne elementy projektu obliczeniowego w celu dokonania ewentualnych modyfikacji, np. rozbudowy lub zmiany przeznaczenia. Wizualizacja poszczególnych etapów obliczeń zapewnia bezpośrednią kontrolę nad pracą programu. Poszczególne elementy projektu, zapisane jako obiekty, mogą być wykorzystane do budowy innych programów lub zastosowane w dydaktyce. 4.

Walenty Osipiuk,
Krzysztof Łukaszewicz
Jarosław Szusta
Politechnika Białostocka
Wydział Mechaniczny
Katedra Podstaw
Konstrukcji Maszyn



Rys. 6. Ogólny widok okna programu.

Literatura

1. Wyrzykowski J. W., Pleszakow E., Sieniawski J.: Odkształcanie i pęknięcie metali. WNT, Warszawa 1999.
2. Gotoś K., Trwałość zmęczeniowa stali w ujęciu energetycznym. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika, Z. 123, Warszawa 1989.
3. Kocańda S., Zmęczeniowe pęknięcie metali. WNT, Warszawa 1985.
4. Kocańda S., Szala J., Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 1999.
5. Osipiuk W., Deformacja niesprężysta i pęknięcie materiałów. Wyd. Polit. Białostockiej, Białystok 1999.
6. Mathcad 2001: User's Guide & Reference Manual, MathSoft, Inc., 1999.

Zastosowanie technik rapid prototyping w projektowaniu maszyn

Budowa prototypu traktowana jest jako jeden z elementów cyklu tworzenia nowego wyrobu. Prototyp umożliwia przeprowadzenie kontroli poprawności konstrukcji oraz badań technicznych pozwalających na określenie warunków eksploatacyjnych wyrobu. Ten etap projektowania zakłada jednak możliwość dokonywania jedynie niewielkich zmian w konstrukcji. Wdrażane od kilku lat techniki szybkiego tworzenia prototypów (ang. rapid prototyping) stwarzają nowe możliwości organizacji procesu projektowania.

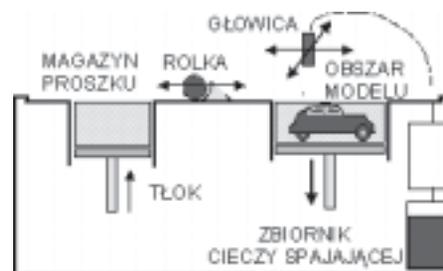
Zmiany organizacyjne w fazie przygotowania nowych wyrobów wymuszane są przez charakter gospodarki rynkowej. Elementem strategii produkcyjnej staje się ciągle ulepszanie funkcjonalności oraz wzrost różnorodności wyrobów wychodzący naprzeciw zróżnicowanym wymaganiom przyszłych użytkowników. Czas wprowadzania na rynek nowego wyrobu traktowany jest jako jeden z elementów działania konkurencyjnego. Oznacza to konieczność poszukiwania metod skracania cyklu opracowywania nowego wyrobu. Możliwość korzystania z modeli fizycznych we wszystkich fazach rozwoju produktu, począwszy od etapu tworzenia koncepcji wyrobu i jego geometrycznego modelu do etapu opracowywania technologii produkcji i montażu, stanowi znaczące wspomaganie cyklu projektowania. Stosowanych jest szereg technik rapid prototyping (RP), które pozwalają na tworzenie fizycznych obiektów (części wzorcowych, prototypów) bezpośrednio na podstawie modelu komputerowego. Źródłem danych jest model przedmiotu pochodzący z systemu CAD 3D. Techniki inżynierii odwrotnej pozwalają również na wykorzystanie, jako danych źródłowych, modeli przygotowanych przez projektanta plastyka. Wykorzystywane są w tym przypadku algorytmy tworzenia powierzchni, na podstawie tzw. chmury punktów, uzyskanych przez skanowanie przestrzenne (digitalizację) modelu. Cechą charakterystyczną technik RP jest używanie, zamiast tradycyjnych technologii mechanicznych, metod przyrostowych do budowy modeli. Model tworzony jest warstwa po warstwie. Kolejne „doklejane” warstwy otrzymywane są przez przekroje poziome przestrzennego modelu w systemie CAD. Model dostępny już w pierwszych etapach prac nad nowym wyrobem to nie tylko atrakcyjne narzę-

dzie dla konstruktora. Jest on również nieoceniony, gdy pomysł nowego wyrobu należy przedstawić jako ofertę dla odbiorcy. Ryzyko nietrafionych inwestycji można znacznie zmniejszyć uzyskując opinie potencjalnych użytkowników. Wielu z nich w codziennej praktyce nie korzysta z dokumentacji technicznej oraz systemów CAD i jedynie przedstawienie modelu fizycznego daje szansę otrzymania wiarygodnej oceny. Efektywna wymiana informacji jest również istotna w ramach biura konstrukcyjnego, gdzie dąży się do tego by szereg prac projektowych przebiegało równolegle w tym samym czasie (concurrent engineering). Mając dostęp do modelu wyrobu można jeszcze przed zakończeniem projektu rozpocząć opracowywanie oprzyrządowania technologicznego dla wytwarzania i montażu oraz zaplanować sposób pakowania. Mimo szeregu oczywistych zalet techniki RP stosowane są przez konstruktorów w dość wąskim zakresie. Tradycyjnie przemysł samochodowy i lotniczy dominują we wprowadzaniu nowych technologii. Istnieje jednak wiele obszarów, w których mimo potencjalnych możliwości techniki RP nie znalazły dotychczas szerokiego zastosowania. Niewątpliwie, jedną z podstawowych przyczyn trudności w upowszechnianiu technik RP



Rys. 1. Stanowisko RP z urządzeniem Z400 w Politechnice Poznańskiej.

jest wolne tempo wdrażania systemów CAD 3D. Obok tego wymienić można brak informacji o możliwościach zastosowań oraz koszty zarówno samego systemu, jak i materiałów eksploatacyjnych. Interesującą opcję dla konstruktorów stanowi metoda 3D Printing (3DP). Stosując ją uzyskuje się zwiększenie prędkości tworzenia modeli i obniżkę kosztów produkcji. Metoda została opracowana w Massachusetts Institute of Technology i wykorzystywana jest przez kilku producentów systemów RP, wśród których najbardziej znanym jest firma Z Corporation z USA. Przedstawione na rys. 1 urządzenie Z400 (producent Z Corporation) wykorzystujące technikę 3DP zostało w bieżącym roku uruchomione w Zakładzie Informatyzacji Systemów Produkcyj-

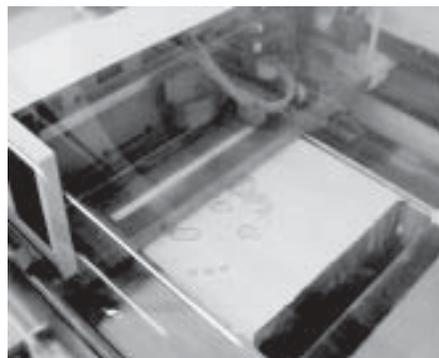


Rys. 2. Schemat blokowy urządzenia wykorzystującego metodę 3D Printing.

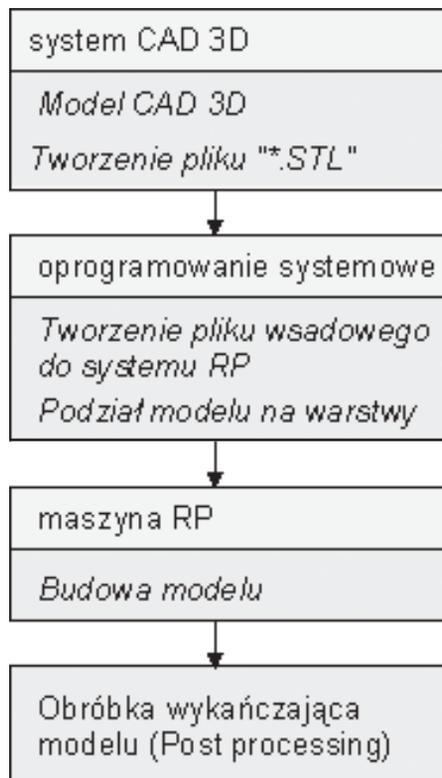
nych w Politechnice Poznańskiej.

Schemat blokowy systemu obrazujący zasadnicze elementy tej technologii przedstawiono na rys. 2. Metoda polega na selektywnym zespalaniu materiału proszkowego za pomocą strumieniowo dozowanej cieczy spajającej. Elementem dozującym ciecz jest głowica o budowie podobnej do głowicy standardowych drukarek atramentowych.

W skład urządzenia wchodzi dwie komory zamknięte w dolnej części tłokami, których położenie sterowane jest za pomocą serwomechanizmów. W pierwszej z komór, przed rozpoczęciem pracy, tłok ustawiany jest w dolnym położeniu i komora wypełniana jest proszkiem. W czasie pracy proszek z komory wejściowej za pomocą wałka przenoszony jest stopniowo do komory, w której tworzony jest model. Po przeniesieniu i wyrównaniu przez wałek kolejnej warstwy uruchamiana jest głowica drukująca, której zadaniem jest sklejenie proszku w punktach określonych przez aktualny przekrój poziomy budowanego przedmiotu.



Rys. 3. Kolejne fazy procesu 3DP; A - zasypywanie proszku do komory wejściowej, B - drukowanie kolejnych warstw, C - usuwanie za pomocą ssawki pozostałości niezadrukowanego proszku.



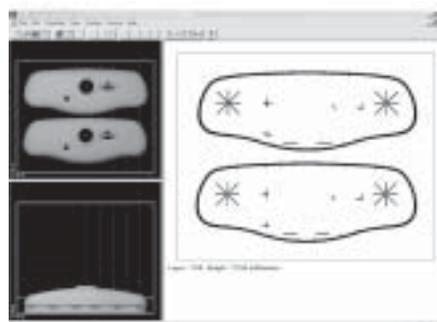
Rys. 4. Kolejność czynności przy tworzeniu modelu RP

Przed każdym cyklem ruchów wałka i głowicy unoszony jest tłok w komorze z zapasem proszku i opuszczany jest tłok w komorze, w której budowany jest model. Zapewnia to przeniesienie proszku i przechodzenie do sklejanego kolejnej warstwy, na które wstępnie podzielony został model.

Sekwencję operacji wykonywanych w procesie tworzenia przedmiotu w technice RP przedstawiono na rys. 4. Podstawą pracy wszystkich systemów RP jest model przestrzenny uzyskany za pomocą oprogramowania CAD 3D. Stosowane są różne systemy oprogramowania CAD, w których używa się odmiennych algorytmów do modelowania obiektów brylowych lub używane są odmiennie formaty zapisu danych. Aby zapewnić zgodność danych, jako

standard w urządzeniach RP określony został format danych STL. Wybór specyfikacji i nazwa standardu pochodzi ze stereolitografii, jednej z pierwszych i najbardziej znanych technik RP. W tym formacie trójwymiarowe powierzchnie reprezentowane są przez układ płaskich elementów trójkątnych. Plik zawiera współrzędne wierzchołków trójkątów i kierunek prostopadłej do zewnętrznej powierzchni trójkąta. Opis za pomocą elementów płaskich jedynie w przybliżeniu reprezentuje złożone powierzchnie. Dokładność przybliżenia zależy od liczby aproksymujących elementów trójkątnych. Transformacja opisu przedmiotu do standardowego formatu STL z reguły wykonywana jest w systemie CAD, w którym tworzono model.

Dalszy proces przygotowania danych dla urządzenia Z400 wykonywany jest przez oprogramowanie systemowe RP. Tworzony jest plik wsadowy (*.BLT) przedstawiający zadanie do wykonania. Podczas pojedynczej sesji można wykonać kilka przedmiotów, których rozłożenie w komorze urządzenia określone jest w pliku wsadowym. Standardowo orientacja części ustawiana jest automatycznie przez oprogramowanie systemowe. Kryterium rozłożenia przedmiotów jest maksymalizacja prędkości tworzenia modelu. Oznacza to, że najmniejszy wymiar ustawiony będzie w osi Z (pionowej). Oczywiście użytkownik dysponuje zestawem



Rys. 5. Formowanie pliku wsadowego, widok rozłożenia przedmiotów w płaszczyznach x4 i x2 podgląd przekroju.

narzędzi edycyjnych pozwalających na dokonanie dowolnych przestawień, powielanie kopii i skalowanie wymiarów przedmiotów w pliku wsadowym. Korekcja ustawienia przedmiotu może być niekiedy wskazana, jeżeli uwzględnia się mniejszą dokładność wymiarową i wytrzymałość modelu w kierunku osi Z. Pozostaje jeszcze deklaracja parametrów pracy takich jak grubość warstwy modelowanej, współczynnik saturacji określający intensywność nasycania proszku cieczą spajającą i można rozpocząć proces drukowania. Niewątpliwą zaletą technologii proszkowej jest to, że niezadrukowany proszek zapewnia naturalne podpory dla form tworzonych w wyższych warstwach, co pozwala na tworzenie dowolnych geometrii bez struktury suportów. Urzą-



Rys.6. Utwardzanie powierzchniowe klejem cyjanoakrylowym.

dzenie pracuje bezobsługowo. Niewielki przedmiot może być gotowy po kilkudziesięciu minutach, większe przedmioty wymagają do kilkunastu godzin pracy. Model w zależności od kształtu geometrycznego tworzony jest z prędkością ok. 2 warstw na minutę. Typowa procedura może przebiegać w ten sposób, że konstruktor po zakończeniu pracy uruchamia proces budowy modelu, a następnego dnia wyjmując z maszyny przedmiot, który po oczyszczeniu z pozostałości proszku może stanowić obiekt kolejnych dyskusji i uzgodnień. Komora Z400 pozwala na budowanie przedmiotów o wymiarach 203x254x203. Większe elementy można zrobić przez podział na części i sklejenie. Dwa podstawowe stosowane zamiennie kompozycje materiałów proszkowych przedstawiono w tabeli poniżej.

Materiał ceramiczny jest bardziej odpowiedni do wykonywania modeli cienkościennych i precyzyjnych, a materiał celulozowo-skrobiowy do form przestrzennych. Dokładność wykonania przy stosowaniu proszku ceramicznego wynosi 0,125 mm w kierunku XY i 0,250 mm w kierunku osi Z. Otrzymane przedmioty mogą być wykańczane przez infiltrację, czyli nasączenie różnymi materiałami. Przedmiot wyko-



Rys. 7. Przykład przedmiotu wykonanego techniką 3DP.

nany z zespolonego proszku charakteryzuje się znaczną porowatością i bardzo łatwo chłonie materiał infiltrujący. Poprawę chropowatości powierzchni modelu można uzyskać przez zanurzenie w płynnym wosku. Nasączenie żywicą epoksydową lub klejem cyjanoakrylowym pozwala na zwiększenie wytrzymałości i trwałości przedmiotów. Wymagane jest to zwłaszcza po wykonaniu elementów cienkościennych. Ciekawe właściwości można uzyskać przez nasączenie modeli wykonanych z proszku celulozowego elastomerem uretanowym. Elementy uzyskują w ten sposób elastyczność podobną do przedmiotów wykonanych z gumy. Gotowe przedmioty mogą być obrabiane

Materiały stosowane w systemie Z400

	Proszek ceramiczny (na bazie gipsu)	Proszek na bazie celulozy i skrobi
grubość warstwy drukowanej	0,08±0,1mm	0,1±0,25mm
wytrzymałość modeli	10Mpa	4MPa

mechanicznie, szlifowane, malowane. Mogą one również być wykorzystane jako modele odlewnicze. Kolor modeli budowanych w urządzeniu Z400 może być zmieniany przez dodanie odpowiedniego pigmentu do cieczy spajającej proszek. Firma Z Corporation opracowała również system druku barwnego stosując w urządzeniu Z406 niezależne głowice dla 3 podstawowych kolorów cieczy klejącej.

Metoda 3DP w porównaniu technologiami RP zaliczonymi do typu high end charakteryzuje się nieco gorszą dokładnością i chropowatością powierzchni. Słabszą wytrzymałość modeli można kompensować przez infiltrację. Koszt zarówno urządzeń jak i materiałów eksploatacyjnych jest jednak tym czynnikiem, który czyni metodę 3DP konkurencyjną w stosunku do innych technologii. Stosowanie głowicy zawierającej 128 dysz sprawia, 3DP jest uważana za najszybszą technikę RP. Prostota obsługi systemu, możliwość pracy w pomieszczeniach biurowych, mniejszy koszt materiałów skłania do budowy większej liczby prototypów

i bieżącego weryfikowania proponowanych form przestrzennych, sprawdzania dopasowania części i funkcjonalności ergonomicznej pozwalając na stopniowe (iteracyjne) dochodzenie do optymalnych konstrukcji. Dalsze informacje dotyczące prac wykonywanych w Zakładzie Informatyzacji Systemów Produkcyjnych można przeczytać na stronie internetowej Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej (<http://www.mt.put.poznan.pl/zisp/rapidpro.htm>)

Roman Konieczny
Politechnika Poznańska
Zakład Informatyzacji
Systemów Produkcyjnych

Literatura:

1. Grochowski A.: Rapid Prototyping - Rapid Tooling, "Cadcam Forum" nr 5, 6 i 7/2000
2. Oczó K. E.: Postęp w szybkim kształtowaniu przyrostowym - Rapid Prototyping, Mechanik 4/99.
3. Oczó K. E.: Postęp w szybkim wykonywaniu oprzyrządowania - Rapid Prototyping, Mechanik 7/99.
4. <http://www.mt.put.poznan.pl/zisp>
5. <http://www.zcorp.com/>

Symulacja obróbki kół stożkowych w systemie CAD

Otrzymywanie trójwymiarowych modeli technologicznych przekładni stożkowej

Obecne komputerowe systemy wspomagające projektowanie części mechanicznych posiadają bardzo duże możliwości. Posiadając trójwymiarowy model możemy go dokładnie pomierzyć, przetestować wytrzymałościowo np. metodą elementów wytrzymałościowych, sprawdzić współpracę w całym zespole, wygenerować ścieżki narzędzi na obrabiarkę sterowaną numerycznie, wygenerować rysunki techniczne, wykonać renderingi i animacje części i złożeń do pokazów oraz dają jeszcze wiele innych możliwości w zależności wiedzy i użytego oprogramowania. Jest to możliwe jeśli posiada się trójwymiarowe modele badanej części o wystarczającej dokładności.

Cel badania przekładni stożkowych

Przekładnie stożkowe są szeroko stosowane w samochodach osobowych, ciężarowych i specjalnych, w pojazdach szynowych, w lotnictwie oraz w maszynach wykorzystywanych w



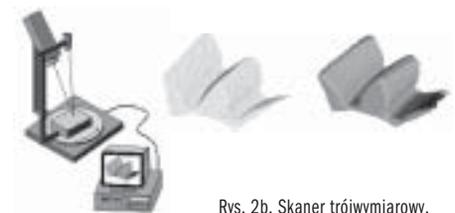
Rys. 2a. Maszyna współrzędnościowa.

przemysle. Przekładnie stożkowe o krzywoliniowej linii zęba są w mechanice jednymi z trudniejszych do zaprojektowania i wykonania. Zęby tych przekładni nie są modelowane w systemach CAD dlatego, że zbudowane są w przestrzeni ze skomplikowanych powierzchni.

Metody otrzymywania trójwymiarowych modeli przekładni stożkowej

W przypadku przekładni stożkowych trójwymiarowe modele bryłowe lub powierzchniowe koła lub zębniaka można uzyskać trzema metodami:

- a) generować na podstawie obliczeń konstrukcyjnych,
- b) generować na drodze symulacji obróbki,
- c) zeskanować rzeczywisty model metodami stykowymi lub bezstykowymi na maszynie współrzędnościowej lub skanerze laserowym (rys 2a i 2b).



Rys. 2b. Skaner trójwymiarowy.

ad a) Model wykonany wyłącznie na drodze obliczeń konstrukcyjnych można uznać za idealny z punktu widzenia teorii konstrukcji przekładni stożkowych. Jest on jednak zbudowany w oderwaniu od technologii nacinania uzębienia na obrabiarce, więc może być wzorem, ku któremu powinna dążyć technologia. Otrzymanie tą metodą modelu jest skomplikowane. Obecne obliczenia konstrukcyjne były wykorzystywane do obliczenia charakteru geometrii i nie służyły do budowy trójwymiarowych modeli. Z tego powodu trzeba bardzo rozbudować obliczenia konstrukcyjne. Tworzeniem tych modeli zajmuje się równoległe drugi zespół.

ad b) Generowanie modelu na drodze symulacji obróbki oznacza odwzorowanie całej technologii nacinania uzębienia na obrabiarce. Modele w ten sposób otrzymywane mają geometrię zbliżoną do rzeczywistych kół nacinanych na maszynach. Są one pozbawione błędów narzędzia, oprzyrządowania technologicznego, sztywności układu, błędów wykonania otoczek, błędów kinematyki czy też wpływu procesu skrawania na dokładność wymiarowo-kształtową. Mają one przewagę nad modelami bryłowymi generowanymi na podstawie obliczeń konstrukcyjnych przekładni, gdyż uwzględniają wszelkie wnoszone poprawki (I, II i III rzędu), których wielu nie można uwzględnić w fazie konstruowania. Budując takie modele możemy szybko i tanio badać wpływ parametrów konstrukcyjnych i technologicznych na geometrię przekładni.

ad c) Ostatnia metoda wymaga nacięcia kół w metalu. Polega ona na wczytaniu geometrii wykonanego uzębienia do systemu CAD jako trójwymiarowego modelu powierzchniowego. Wykonuje się to przez skanowanie światłem strukturalnym [8] (rys. 2b) albo na maszynach współrzędnościowych metodą stykową (rys. 2a) lub bezstykową. Te metody są obecnie stosowane i rozwijane.

Proces projektowania przekładni stożkowej o krzywoliniowej linii zęba

Proces projektowania przekładni stożkowych o krzywoliniowej linii zęba jest zawsze integralnie związany z obliczeniami technologicznymi. Na ich podstawie wykonuje się operacje frezowania uzębienia koła i zębniaka, by przez kolejno wprowadzane poprawki, uzyskać prawidłowe położenie śladu współpracy. Proces lokalizacji śladu współpracy to wielokrotnie powtarzane operacje frezowania uzębienia zębniaka przy ciągle korygowanych usta-

Tabela 1. Fragment obliczeń.

LICZBA ZĘBOW	Z	18	32
KIERUNEK POCHYLENIA LINII ZĘBA	LZZ	PRAWY	LEWY
KAT STOZKA PODZIAŁOWEGO	DEL	29.21'28"	60.38'32"
KAT STOZKA GŁOW	DELA	32.52'29"	62.43'31"
KAT STOZKA STOP	DELFL	27.16'29"	57.7'31"
KAT GŁOWY ZĘBA	TETA	3.31' 1"	2. 4'59"
KAT STOPY ZĘBA	TETFL	2. 4'59"	3.31' 1"
ODL.WIERZCH.STOZKA	LWA	.064	-.257
ODL.WIERZCH.STOZKA PODZ.	LW	.000	.000
ODL.WIERZCH.STOZKA STOP	LWFL	-.844	-.775

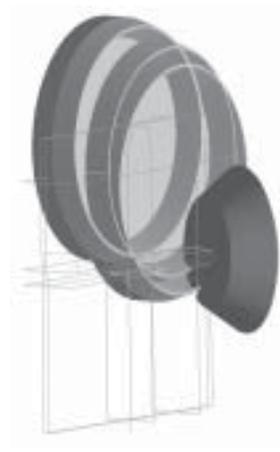
wieniach maszyny, by w rezultacie osiągnąć żadaną płamę styku zębów (rys. 8). Korygowanie ustawień maszyny polega na wprowadzaniu poprawek I, II, i III rzędu, czyli od poprawki, o których może decydować sam operator, po poprawki wprowadzane w trakcie kolejnych obliczeń technologicznych. Rozpoczynając proces lokalizacji śladu współpracy w pierwszej kolejności wykorzystuje się poprawki I rzędu (operatorskie). Jeśli te nie pozwalają doprowadzić do prawidłowej lokalizacji śladu, wprowadza się poprawki II rzędu tj. korekty ustawienia maszyny wyznaczane w trakcie obliczeń technologicznych. Jeśli zaś i te poprawki nie prowadzą do uzyskania żadanego śladu współpracy, wprowadza się poprawki III rzędu, wymagające jednak powtórnych obliczeń technologicznych. Przystępując do procesu lokalizacji śladu

współpracy nie można przewidzieć czy wystarczy zastosowanie tylko poprawek I rzędu, czy też trzeba sięgnąć po dalsze silniejsze zmiany w postaci poprawek wyższego rzędu. W praktyce inżynierskiej można spotkać przekładnie, których proces lokalizacji śladu sprowadza się czasami do wykonania "drobnej" poprawki operatorskiej. Występują też przekładnie, w których trzeba stosować wiele poprawek wyższego rzędu, albo wymagające generalnie zmian w danych wejściowych choćby takich jak np. liczby zębów zębniaka i koła, zachowując jednocześnie w miarę zadane przełożenie. Na etapie obliczeń konstrukcyjno-technologicznych nie można przewidzieć trudności w procesie lokalizacji śladu, czyli jakiego rodzaju i w jakim zakresie konieczne będzie wprowadzanie poprawek. Doświadczenie wskazuje, że poprawna konstrukcja przekładni wraz z odpowiednio dobraną metodą technologiczną naci-

niania uzębienia, wyborem maszyny nacinającej (frezarki), odpowiednio przygotowaną głowicą (ustawioną i prawidłowo naostrzoną), poprawnie skonstruowanym oraz dokładnie wykonanym i ustawionym oprzyrządowaniem technologicznym pozwala na znaczne skrócenie procesu lokalizacji śladu. Krótkiego wyjaśnienia wymaga sformułowanie "poprawna konstrukcja przekładni". Oznacza ono taką



Rys. 3a. Układ technologiczny.



Rys. 3b. Kolejne położenia głowicy.

konstrukcję, która w powiązaniu z metodą technologiczną zapewnia uzyskanie przy niewielkiej liczbie prób prawidłowego śladu współpracy. Czasochłonny i pracochłonny proces lokalizacji śladu współpracy przyczynił się do powstania specjalistycznego oprogramowania pozwalającego na etapie obliczeń konstrukcyjno-technologicznych przewidywać ślad współpracy. Nie oznacza to jednak wyeliminowania procesu lokalizacji śladu, lecz znaczne skrócenie dzięki zmniejszeniu liczby prób. Oprogramowaniem takim dysponują czołowe światowe ośrodki (Gleason, Oerlikon/Klingelberg), lecz z racji ceny jest mało rozpowszechnione. Dzisiejsze oprogramowanie powiązane jest z współrzędnościowymi maszynami pomiarowymi, dysponującymi zapisem teoretycznej topografii uzębienia, pomocnej w ocenie śladu współpracy uzębienia przekładni.



Rys. 9. Poprawka przełożenia odtaczania.

stych testach śladu współpracy dla takiej samej przekładni, co jest potwierdzeniem poprawności metody.

W celu skrócenia czasu symulacji wczytujemy zbudowane koła i zębniaki z ograniczoną liczbą zębów. Dzięki zmniejsza się objętości wczytywanego pliku. Drugim sposobem skrócenia czasu samej symulacji, jest obróbka od momentu wejścia w przypór do wyjścia z przyporu pary zębów. W ten sposób uzyskujemy poprawny ślad współpracy tylko na jednym zębie (rys. 7).

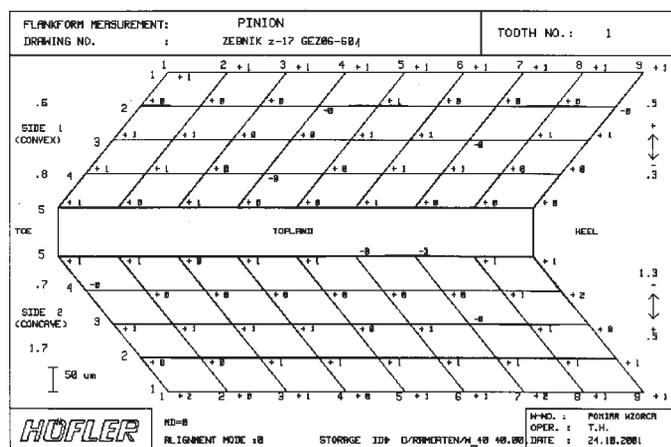
Interpretacja śladu współpracy

Kształt, wielkość i położenie zalecanego śladu współpracy obserwowanego na kole pokazano na rys. 8. Długość i szerokość śladu współpracy zilustrowano w funkcji szerokości wieńca zębatego i wysokości czynnej zęba. Przyjęte wielkości wynikają z zaleceń firmowych i wieloletnich doświadczeń w prowadzeniu procesów lokalizacji śladu podczas wykonywania wielu prototypów przekładni. Badanie

ślądu współpracy prowadzi się na maszynach kontrolnych (kontrolerkach) montując badaną przekładnię za pomocą specjalnego oprzyrządowania w jej konstrukcyjnych odległościach montażowych poddając w czasie obrotów niewielkiemu obciążeniu. Naniesienie cienkiej warstwy znacznika (tuszu) ułatwia obserwację śladu współpracy. Uważać trzeba na nieobciążanie przekładni miękkiej zbyt dużym momentem hamującym, gdyż wprowadzone deformacje mogą w rezultacie znacznie zmienić plamę współpracy, prowadząc do błędnych wniosków. Tak samo z uwagą należy szacować czas próby (obroty), by nie doprowadzić (zwłaszcza w przekładni twardej) do zatarcia uzębienia.

Ocena i korekty śladu współpracy

W celu uzyskania właściwego śladu dolegania wprowadza się w procesie nacinania zębniaka poprawki I, II i III rzędu. Rola tych poprawek została omówiona wcześniej. Dla strony wklęsłej (czynnej) zębniaka przekładni zaprezentowano poprawkę I rzędu (tzw. operator-ską) polegającą na zmianie przełożenia odtaczania, czyli korygującą zarys zęba. Mogącą w efekcie zmienić położenie śladu wzdłuż zarysu (profilu) zęba. Wprowadzona poprawka odtaczania rzędu + 0,015547 (+1%) spowoduje (rys. 9) zebranie materiału przy głowie zęba zębniaka i pozostawienie przy stopie, co w efekcie ma spowodować przesunięcie śladu współpracy ku głowie koła, czyli stopie zębniaka. Na rysunku pokazano też zmianę przełożenia odtaczania in minus, tutaj niewykorzystaną, lecz obrazującą wpływ tej poprawki w przypadku wstępnej lokalizacji śladu przy głowie koła - stopie zębniaka. W środowisku systemu wykorzystując funkcje pomiarowe, mamy możliwość oceny wielkości usuwanego naddatku



Rys. 10. Topografia zęba zębniaka.

przy wykorzystaniu tej poprawki. Wielkości te, odniesione w przekroju normalnym w punkcie obliczeniowym (środek wieńca) pokazuje rys. 9.

Wykorzystując trójwspółrzędnościową maszynę pomiarową (ZENA Wyszków) można dokonać pomiaru topografii boku zęba (rys. 10) i odnieść ją do modelu wykonanego w symu-

lacji. Wszystkie różnice pomiędzy tymi geometriami są spowodowane błędami obróbki (np. zbyt małą sztywnością obrabiarki, zużyciem narzędzia itp.). Możemy to ocenić i wprowadzić zmiany w obróbce następnych kół.

Wnioski

Zintegrowane środowisko systemów inżynierskich CAD/CAM/CAE dzięki wykorzystaniu wewnętrznych języków programowania pozwala tworzyć własne aplikacje symulujące nie tylko obróbkę uzębienia, ale również symulujące pracę przekładni będącą podstawą do generowania śladu współpracy. Możliwe jest sterowanie śladem współpracy przy wykorzystaniu poprawek I, II i III rzędu. Mamy możliwość porównywania modeli uzyskanych z symulacji z modelami skanowanymi. Przedstawiona metoda symulacji wymaga dalszych prac w celu przyspieszenia obliczeń i rozszerzenia możliwości.

Piotr Skawiński
Przemysław Siemiński
Politechnika Warszawska
Instytut Podstaw
Budowy Maszyn

Literatura

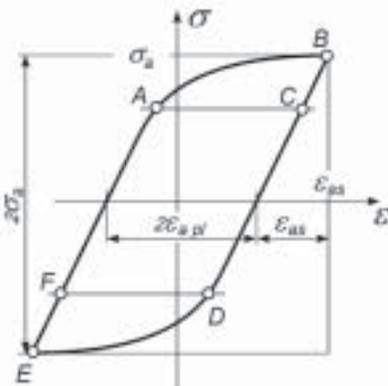
1. Wójcik Z., Przekładnie stożkowe WNT, 1984
2. Skawiński P., Połaski T., Zygier P., The conception of computer model tooth profile generation by Renishaw probe on 4-axis milling machine, VII Sino-Polish Conference CAD IN MACHINERY, Warsaw, October 1998
3. Sitnik R., Pawłowski M., Kujawińska M., Optyczne metody pomiarowe wspomagające proces projektowania odwrotnego. Mat. IV Szkoły Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Wyd. Helion, Warszawa, str. 79-97, 2000
4. Skawiński P., Siemiński P. Parametryczny trójwymiarowy model przekładni stożkowej o krzywoliniowej linii zęba jako wynik symulacji obróbki, Program Priorytetowy NOWE TECHNOLOGIE, Prace naukowe, zeszyt 4, str. 181-190, Warszawa 2001.
5. Skawiński P., Siemiński P., 3D modeling of spiral bevel gears as a result of cutting simulation, Internationale Conference on Computer Integrated Manufacturing, CIM 2001, Zakopane, marzec, 2001.
6. Skawiński P., Połaski T., Zygier P., Reverse engineering application to quality estimation of manufacturing of spiral bevel gears, Internationale Conference on Computer Integrated Manufacturing, CIM 2001, Zakopane, marzec, 2001.
7. Skawiński P., Siemiński P., Trójwymiarowy model bryłowy przekładni stożkowej, XIII Konferencja "Metody i środki projektowania wspomagane komputerowo", Zbiór referatów, str. 343-351, Warszawa, listopad, 2001.
8. Skawiński P., Siemiński P., Generowanie w środowisku systemów CAD/CAM/CAE śladu współpracy uzębienia przekładni stożkowej o krzywoliniowej linii zęba, Program Priorytetowy NOWE TECHNOLOGIE, Prace naukowe, zeszyt 5, str. 97-106, Warszawa 2002.

Propozycja zastosowania rekurencyjnego modelu obiektu do określania trwałości zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych

Zmęczenie materiału jest zjawiskiem, któremu na przestrzeni ostatnich lat poświęcono wiele prac badawczych i rozpraw naukowych [1, 2, 3]. Mnogość czynników wpływających na zachowanie się materiału poddanego cyklicznie zmiennym obciążeniom, interakcja między nimi stwarza nadal wielokrotnie problemy w stosowaniu wypracowanych metod obliczeniowych w procesie projektowania części maszyn. Trwałość i niezawodność elementów można przewidywać z dobrym skutkiem w oparciu o metody probabilistyczne. Wymagają one jednak znacznego ilościowo zbioru informacji o rodzaju obciążenia, warunkach pracy i ich wpływie na właściwości materiału. Ilościowe ograniczenie procesu badawczego pociąga za sobą spadek dokładności wnioskowania. W takich przypadkach lepsze rezultaty uzyskuje się, stosując różnorakie metody deterministyczne, pozwalające na określenie trwałości przy założeniu jednak dużego marginesu bezpieczeństwa. Wszelkie sposoby predykcji zjawiska zmęczenia podlegają ciągłemu doskonaleniu, są modyfikowane bądź na nowo formułowane. Dotyczy to zwłaszcza sytuacji, gdy niezbędny jest precyzyjny opis zmian zachodzących w materiale w zakresie zmęczenia niskocyklowego, gdzie dominującą rolę odgrywają odkształcenia plastyczne.

Pętla histerezy

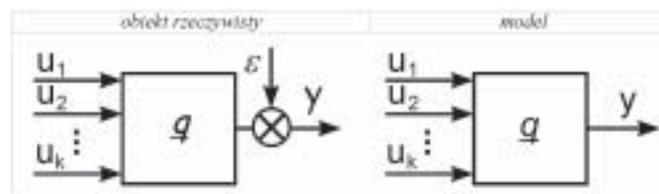
Miarą energii rozproszonej w materiale w wyniku procesów zachodzących podczas działania obciążeń zmiennych, w zakresie wytrzy-



Rys. 1. Pętla histerezy w ujęciu schematycznym.

małości niskocyklowej, jest pole powierzchni objęte pętlą histerezy. Krzywą zilustrowaną na rys. 1. można otrzymać na dwa sposoby, przy zachowaniu stałej wartości amplitudy odkształcenia ϵ_a lub stałej wartości amplitudy naprężenia σ_a . W przypadku stałej amplitudy odkształcenia zmianom mogą ulegać rzeczywiste wartości naprężeń. Jeżeli odnotowany zostanie ich spadek, można wnioskować o osłabieniu materiału. W warunkach badań przy stałej amplitudzie naprężenia materiał ulega osłabieniu, gdy rosną amplitudy odkształceń (wzrastają szerokości kolejnych pętli histerezy). Poza zmianami wielkości pola pętli możliwe są także zmiany kształtu krzywej. Deformacji ulegają np. odcinki AB i DE obrazujące odkształcenie plastyczne (rys. 1.), rozwija się energia umocnienia opisana polem ABC i DEF. Krzywe odkształcenia niektórych materiałów mogą także wykazywać tendencję do zmiany kąta nachylenia względem osi odkształceń [4].

Tak znaczna zmienność kształtu pętli histerezy podczas działania zmiennego obciążenia powoduje wiele trudności w opisywaniu tego zjawiska. Zagadnienie komplikuje się jeszcze bardziej, gdy pojawia się dodatkowy czynnik w



Rys. 2. Identyfikacja modelu rzeczywistego obiektu [5]

postaci temperatury. Jednak owa zmienność może zostać wykorzystana do analizy stanu elementu pracującego w określonych warunkach, dzięki metodom numerycznym pozwalającym na dokonywanie obliczeń na bieżąco w czasie działania obciążenia.

Model matematyczny

Istota poszukiwania matematycznego związku między kształtem pętli histerezy przy stałej amplitudzie odkształceń a stanem mechanicznym elementu ilustruje rys. 2.

Wartość wielkości wyjściowej y_n w zależności od wielkości wejściowych $u_{1n}, u_{2n}, \dots, u_{kn}$ określa zależność:

$$y_n = b_0 + b_1 u_{1n} + b_2 u_{2n} + \dots + b_{kn} u_{kn} + \epsilon_n \quad (1)$$

Model matematyczny bazujący na założeniu, że zakłócenia są "białym szumem" przedstawiać można za pomocą równania:

$$Q_n = X_n q \quad (2)$$

gdzie:

X_n - macierz wielkości wejściowych opisujących rejestrowaną pętlę histerezy o wyrazach:

$$X_n = [1 u_{1n} u_{2n} \dots u_{kn}] \quad (3)$$

q - wektor poszukiwanych współczynników równania:

$$q = [b_0 b_1 \dots b_{kn}]^T \quad (4)$$

Zastosowanie rekurencyjnej metody identyfikacji pozwala na prowadzenie analizy stanu próbki w czasie rzeczywistym. Metoda ta, opisana w pracy [5], może być stosowana np.

w diagnostyce maszyn. Dzięki identyfikacji prowadzonej metodą aproksymacji stochastycznej możliwe stało się iteracyjne wyznaczenie wektora q (przy założeniu, że zakłócenia ϵ są losowymi zmiennymi niezależnymi) dla wielkości wyjściowej i wielkości wejściowych wyznaczonych w oparciu o wyniki pomiarów na obiekcie rzeczywistym. Wektor q_k w zależności od wyników z $k-1$ cyklu oraz aktualnych danych wejściowych przedstawia się następująco:

$$q_k = q_{k-1} + B_k X_k^T (y_k - X_k q_{k-1}) \quad (5)$$

gdzie:

$$B_k = \frac{B_{k-1} - (B_{k-1} X_k^T X_k B_{k-1})}{(1 + X_k B_{k-1} X_k^T)} \quad (6)$$



Rys. 3. Schemat określania stanu mechanicznego próbki.

Na rys. 3. przedstawiono schemat umożliwiający realizację określonego programu badań i akwizycję danych pozwalających na wykreślenie pętli histerezy w trakcie testu. Zebrane informacje stanowią źródło do analizy parametrów opisujących krzywe (zmienne wejściowe), a w dalszym

etapie umożliwiają wyznaczenie poszukiwanych parametrów modelu. Na ich podstawie możliwe stanie się wnioskowanie o stanie próbki poddanej obciążeniu zmiennym.

Podsumowanie

1. Na podstawie zmian kształtu pętli histerezy można wnioskować o stanie mechanicznym badanej próbki.

2. Prezentowana metoda pozwala na analizę złożonych warunków pracy np. zmiennego obciążenia i podwyższonej temperatury.
3. Analiza prowadzona w czasie rzeczywistym, możliwa dzięki zastosowaniu metod numerycznych, zapewnia bieżącą diagnostykę elementu.

*Bogusław HOŚCIEŁO
Walenty OSIPIUK
Politechnika Białostocka
Wydział Mechaniczny
Katedra Podstaw
Konstrukcji Maszyn*

Literatura

[1] Kocańda S., Kocańda A., Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali, PWN, Warszawa 1989.
 [2] Żuchowski R., Krajczyk A., Pszonka A., Bzyta A., Wojciechowski B., Behaviour of austenitic heat-proof steel under thermal cycling and thermal fatigue time-life prediction, Proc. of the 7th Congress on Material Testing, Budapest 1978 pp. 399-403
 [3] Manson S. S., Thermal Stress and Low-cycle Fatigue, New York, McGraw-Hill 1971.]
 [4] Dudziak M., Mielniczuk J., Design methods of machine elements of non-classical materials (in examples), Maszyny robocze i transport: Non-classical material models in engineering design, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2002 s.83.
 [5] Manerowski J., Identyfikacja modeli dynamiki ruchu sterowanych obiektów latających, Wydawnictwo Naukowe ASKON, Warszawa 1999.

Komputerowe prognozowanie trwałości zmęczeniowej elementów poddanych działaniu złożonych obciążeń cyklicznych

Przedstawiono wykorzystanie techniki komputerowej do prognozowania trwałości zmęczeniowej w warunkach złożonych obciążeń cyklicznych nie będących w fazie. Model matematyczny (kryterium) zniszczenia sformułowano w oparciu o teorię poślizgów Batdorf-Budiansky'ego, zmodyfikowaną pod kątem uwzględnienia czynnika czasu.

Opis zagadnienia

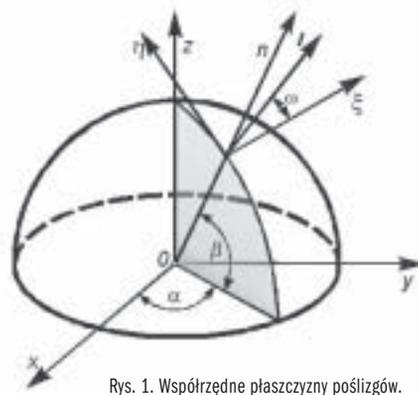
Ciało polikrystaliczne stanowi konglomerat różnorodnie zorientowanych kryształów. Chociaż pojedyncze kryształy mają właściwości anizotropowe, to w całości rzeczywisty materiał metaliczny ma cechy ciała izotropowego. Przyjmuje się, że w materiałach poślizgi zachodzą w tych obszarach, w których występują maksymalne naprężenia styczne, przekraczające wartości krytyczne.

Układ poślizgów można opisać, wykorzystując półsferę jednostkową, na której za po-

mocą kątów α, β, ω określamy położenia płaszczyzn i kierunków poślizgów (rys. 1). W teorii Batdorf-Budiansky'ego deformację całkowitą definiuje się jako sumę poślizgów, zachodzących we wszystkich możliwych płaszczyznach i kierunkach półsfery, w których zostały spełnione warunki ich wystąpienia. Do obliczenia całek konieczne jest ustalenie gra-

nic obszarów poślizgów. Granice te są funkcjami kątów α, β, ω . Obliczenia te można z łatwością przeprowadzić wykorzystując metody numeryczne. Dokładniejsze informacje znaleźć można w pracach [3, 8].

W niniejszej pracy przedstawiono obliczenia trwałości zmęczeniowej na podstawie kryterium:

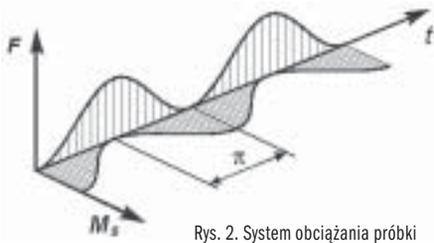


Rys. 1. Współrzędne płaszczyzny poślizgów.

$$\int_{\Omega} \psi_n(\alpha, \beta) d\Omega = \text{const} \tag{1}$$

Przedstawiono przypadek cyklicznego rozciągania i skręcania nie będącego w fazie. Naprężenia styczne w omawianym przypadku określa zależność:

$$\tau = 1(s_m + s_a \sin(\Theta t)) \sin\beta \sin\omega + (\tau_m + \tau_a \sin(\Theta t + \phi)) (\cos\alpha \cos 2\beta \sin\omega - \sin\alpha \sin\beta \cos\omega) \tag{2}$$



Rys. 2. System obciążania próbki

Numeryczny opis zagadnienia

Ścisłe analityczne rozwiązanie zagadnienia deformacji przy nieproporcjonalnym obciążeniu jest trudne od strony matematycznej. Zaradzić temu można, przez wykorzystanie numerycznych metod obliczeniowych.



Rys. 3. Ogólny algorytm prognozowania trwałości zmęczeniowej

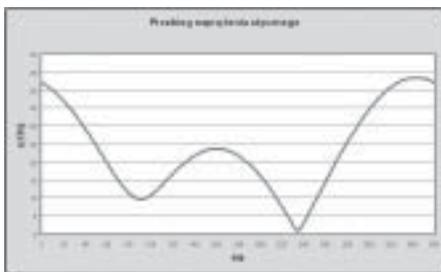
Półsfery o jednostkowym promieniu dzielimy na dużą liczbę elementarnych powierzchni, oznaczanych $\Delta\Omega_i$,

$$\Delta\Omega_i = \cos\beta_i \Delta\beta \Delta\alpha \quad (3)$$

przy czym położenie wszystkich systemów poślizgów określa się przy spełnieniu warunku:

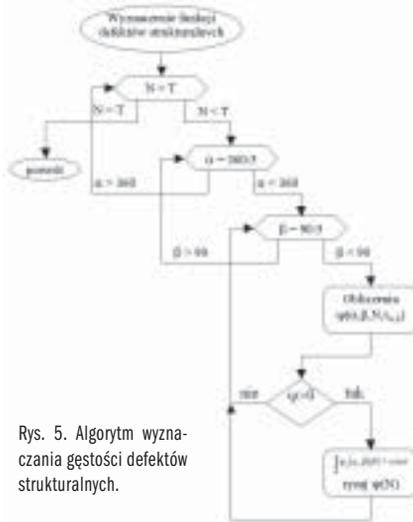
$$0 \leq \alpha \leq 2\pi, \quad 0 \leq \beta \leq \pi/2, \quad 0 \leq \omega \leq 2\pi, \quad (4)$$

W teorii Batdorfa-Budiansky'ego o poślizgach decyduje składowa naprężenia stycznego, dlatego też wyznacza się jej rozkład na półsfery. Wyrażenie (2) traktuje się jako funkcję celu dla zlokalizowania ekstremum. Przy określeniu maksimum wykorzystuje się metodę systematycznego przeszukiwania. Jako zmienne decyzyjne przyjmowane są wartości parametrów: $\alpha, \beta, \omega, \theta$.



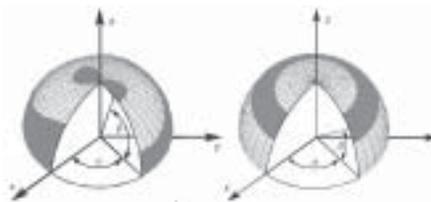
Rys. 4. Przebieg wypadkowego obciążenia przy nieproporcjonalnym działaniu, $\sigma_m=100, \tau_m=100$ i $\phi=\pi/3$.

W metodzie systematycznego przeszukiwania wyznacza się wartości funkcji celu dla wszystkich możliwych kombinacji czterech zmiennych decyzyjnych, przy czym zmienne te zawierają się w pewnych przedziałach (4) oraz $0 \leq \theta \leq 2\pi$. Obliczenia numeryczne przeprowadza się dla kroku $\Delta\alpha, \Delta\beta = 5^\circ, \Delta\omega, \Delta\theta = 1^\circ$. Liczba wykonanych iteracji dla jednego tylko systemu obciążenia to: 167 961 600. Wyznaczenie ekstremum, bez komputerowego wspomaganie, przy tylu zmiennych i tak szeroki przedziałach zajęłoby wiele czasu. Stworzono



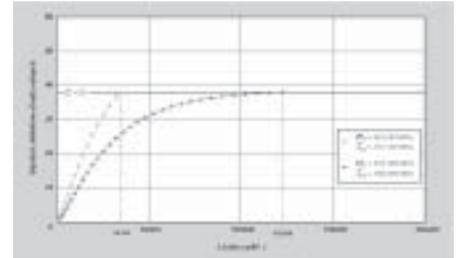
Rys. 5. Algorytm wyznaczania gęstości defektów strukturalnych.

więc w języku Fortran 77, w oparciu o algorytm systematycznego przeszukiwania, procedurę pozwalającą znacznie przyspieszyć analizę. Wynik działania algorytmu dla przykładowego programu obciążenia prezentuje rys. 4.



Rys. 6. Rozkład stref poślizgów na powierzchni półsfery w różnych systemach obciążenia.

Znając stan naprężeń na półsfery, oblicza się dla każdej elementarnej powierzchni, po k-tym odcinku czasowym (liczbie cykli obciążenia), wartość funkcji gęstości poślizgów, po czym sprawdza się czy spełniony został warunek ich wystąpienia. W przypadku zaistnienia na danej powierzchni poślizgów, oblicza się dla niej wartość funkcji gęstości defektów. Każdy następny krok uwzględnia wartości gęstości defektów obliczoną dla kroku poprzedniego. Obliczenia przeprowadza się dla wszystkich tworzących powierzchnie półsfery, a wyniki sumuje się. W ten sposób otrzymuje się wartość uszkodzeń w poszczególnych okresach obciążania.



Rys. 7. Teoretyczne zależności gęstości defektów strukturalnych w funkcji liczby cykli N dla różnych poziomów obciążenia

Na podstawie podanych zależności, uwzględniając wartości stałe, oblicza się przewidywaną liczbę cykli do momentu inicjacji pęknięcia w warunkach obciążenia siłą rozciągającą i momentem skręcającym. Na podstawie wprowadzonych danych: wartości medialnej naprężenia normalnego, wartości medialnej naprężenia stycznego i kąta przesunięcia fazowego między działającymi cyklami naprężeń - komputer generuje na powierzchni półsfery obszar poślizgów (rys. 6).

Przyrównując wygenerowaną przez program wartość nagromadzonych defektów strukturalnych do wyznaczonej doświadczalnie stałej C, uzyskujemy teoretyczne zależności gęstości defektów strukturalnych w funkcji liczby cykli (rys. 7).

Wyniki obliczeń teoretycznych dają zadowalające oszacowanie trwałości w odniesieniu do wyników eksperymentalnych. Przedstawiona propozycja może być użyteczna przy prognozowaniu trwałości zmęczeniowej w innych niż opisane, złożonych warunkach obciążenia. Stworzona symulacja komputerowa, poparta licznymi próbami laboratoryjnymi, stanowi nieocenioną pomoc podczas projektowania części maszyn pracujących w warunkach złożonych obciążenia cyklicznych. Dzięki niej już na etapie obliczeń możemy przewidzieć okres bezawaryjnej pracy elementów bez przeprowadzania skomplikowanych prób zmęczeniowych.

Jarosław Szusta
Walenty Osipiuk
Krzysztof Łukaszewicz
Politechnika Białostocka
Wydział Mechaniczny
Katedra Podstaw
Konstrukcji Maszyn

Literatura

1. Kocańda S., Zmęczeniowe pęknięcie metali, WNT, Warszawa, 1985.
2. Batdorf S.B., Budiansky B., A mathematical theory of plasticity based on the concept of slip. NACA, T.N. 1871, 1949.
3. Osipiuk W., Deformacja niesprężysta i pęknięcie materiałów. Rozprawy Naukowe PB, No 59, 1999.
4. Frost H.J., Ashby M.F., Deformation - Mechanism Maps. The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics, Perg. Press, Oxford, 1982.
5. Hull D.: Introduction to dislocations, Perg. Press, 1982. (po polsku).
6. Adamczyk J., Metaloznawstwo teoretyczne, Cz. 3, Odkształcenia plastyczne, umocnienie i pęknięcie. Wyd. Pol. Śl. Gliwice, 1993.
7. Wesolowski K., Metaloznawstwo t. II, WNT, Warszawa, 1969.
8. Osipiuk W., Łukaszewicz K., Szusta J., Ocena trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążenia przesuniętych w fazie.

Koła zębate walcowe – budowa modelu bryłowego i symulacja obróbki

Koła zębate należą najczęściej spotykanych elementów mechanizmów. Tradycyjnie projektowanie rozpoczyna się od przeprowadzenia procesu obliczeniowego według określonych algorytmów, w wyniku którego otrzymuje się parametry geometrii uzębienia. Wyniki obliczeń geometrycznych służą za podstawę sporządzania dokumentacji technicznej. Celem nowoczesnego projektowania mechanizmów jest zintegrowanie w jednym środowisku oprogramowania CAD/CAM/CAE procesu kształtowania modelu przestrzennego i zachowania parametrycznego zapisu konstrukcji z obliczeniami konstrukcyjnymi, wytrzymałościowymi i eksploatacyjnymi dla zmieniającego się zbioru parametrów wejściowych oraz jednoczesną przestrzenną wizualizacją obiektu. Ponieważ proces obliczeniowy oraz modelowanie przestrzenne kół zębatach jest dość złożone, narzędzie tego typu jest dużym ułatwieniem dla projektanta. Prezentowany niżej referat dotyczy modelowania w środowiskach systemów CAD/CAM/CAE kół zębatach walcowych o śrubowej linii zęba jako ogólnego modelu walcowego koła zębatego.

Model konstrukcyjny, technologiczny i rzeczywisty

W celu usystematyzowania pojęć postanowiono wprowadzić pojęcia modelu konstrukcyjnego, technologicznego oraz modelu rzeczywistego. Model konstrukcyjny to parametryczny model teoretyczny, wykorzystujący związki konstrukcyjne oraz uwzględniający metodę na-

cinania uzębienia. W procesie tworzenia modelu uwzględnione zostały zagadnienia konstrukcyjne, zawarte w teorii kół zębatach. Geometria tworzonego koła zębatego opiera się na wzorach matematycznych opisujących krzywe charakterystyczne dla danego rodzaju koła oraz ich położenie w przestrzeni. Model technologiczny, podobnie jak konstrukcyjny, jest również parametrycznym modelem teoretycznym. Ze względu na trudności związane z opisem matematycznym niektórych zjawisk, nie uwzględnia on wszystkich rzeczywistych uwarunkowań procesu obróbki koła zębatego, takich jak sztywność układu obrabiarka - uchwyt - przedmiot - narzędzie, zużycie narzędzia, rodzaj obrabianego materiału, bicia itp. Jest on wynikiem odwzorowania teoretycznych związków kinematycznych, jakie występują w układzie narzędzie - przedmiot obrabiany podczas nacinania zębów koła. Można więc mówić o zamodelowanej przekładni technologicznej. Uwzględnienie części uwarunkowań konstrukcyjnych jest proste tylko w jednym rodzaju modelu teoretycznego. Związane jest to z trudnościami opisu matematycznego zjawisk występujących podczas procesu wytwarzania kół zębatach bądź też z zamodelowaniem zagadnień teoretycznych podczas generowania teoretycznego procesu technologicznego i równocześnie zachowanie pełnej parametryczności całego procesu modelowania teoretycznego modelu konstrukcyjnego oraz teoretycznego modelu technologicznego. Pod pojęciem modelu rzeczywistego rozumieć należy nie tyle fizyczną bryłę koła zębatego, co jej komputerowy model uzyskany dzięki zastosowaniu inżynierii odwrotnej, na przykład reprezentację punktową pewnego fragmentu bryły uzyskaną w wyniku procesu pomiarowego na maszynach współrzędnościowych lub za pomocą technik optycznych. Nie zawsze wymagane jest skanowanie bryły całego detalu, Często wystarczy zeskanować tę część, która jest istotna dla poprawności działa-

nia mechanizmu bądź urządzenia lub poprawności kształtu dowolnej powierzchni. Może on służyć do określenia i ewentualnego skorygowania błędów modelu technologicznego wynikających z nieuwzględnionych w nim czynników, o których wspomniano wcześniej. Nie można jednak zapomnieć, że wykorzystując inżynierię odwrotną w celu uzyskania odwzorowania modelu rzeczywistego wprowadzamy błędy wynikające z metody przeprowadzanych pomiarów, a także ze sposobu interpretowania i opracowania otrzymanych wyników. Ważny jest więc tutaj również wybór odpowiedniej techniki inżynierii odwrotnej.

Wybrane elementy teorii kół zębatach

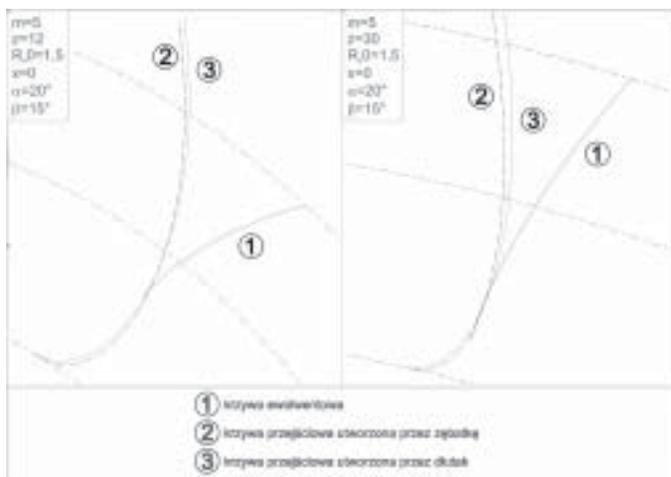
Walcowe koła zębata o zębach śrubowych (skośnych) wykonywane są metodami obwiedniowymi. Bok zęba oraz powierzchnia przejściowa u podstawy zęba, czyli powierzchnia pomiędzy powierzchnią walcową dna wrębu a powierzchnią roboczą boku zęba wykonywane są w jednym cyklu obróbkowym tym samym narzędziem. Przekięcie współpracującej części boku zęba powierzchnią normalną tworzy ewolwentę, natomiast krzywa przejściowa uzyskana w wyniku tego samego przekięcia to ekwidystanta epitrochoidy wydłużonej. Wzory (1) i (2) stanowią matematyczny opis ekwidystanty epitrochoidy wydłużonej, uzyskiwanej podczas procesu nacinania uzębienia dółkami Fellowsa:

$$x_R = -a \sin \phi_p + r_{R0} \sin(1+i_0) \phi_p + [r_{R0} \sin(1+i_0) \phi_p - r_{w0} \sin \phi_p] R_{a0} / \sqrt{[r_{w0}^2 + r_{R0}^2 - 2r_{w0}r_{R0} \cos(i_0 \phi_p)]} \quad (1)$$

$$y_R = a \cos \phi_p - r_{R0} \cos(1+i_0) \phi_p + [r_{w0} \cos \phi_p - r_{R0} \cos(1+i_0) \phi_p] R_{a0} / \sqrt{[r_{w0}^2 + r_{R0}^2 - 2r_{w0}r_{R0} \cos(i_0 \phi_p)]} \quad (2)$$

gdzie:

- x_R - współrzędna ekwidystanty epitrochoidy wydłużonej,
- y_R - współrzędna ekwidystanty epitrochoidy wydłużonej,
- a - odległość osi kół,
- r_{R0} - promień zawieszenia promienia naroża narzędzia,
- i_0 - przełożenie,
- r_{w0} - promień toczenia narzędzia,



Rys. 1.



Rys. 2.

ϕ_p - bieżący kąt odtaczania (uzależniony od parametru t).

Wzory opisujące ekwidystantę ewolwenty wydłużonej, która powstaje podczas obróbki obwodniowej koła zębatego o zębach skośnych frezem ślimakowym, można uzyskać przez przyjęcie $r_{wo} = r$, a także podczas wyznaczania wartości ze wzorów (1) i (2) zastosować należy regułę de l'Hospitala. Równania (3), (4), (5) są opisem sparametryzowanym ewolwenty zycznej wykorzystanej w budowie zarysu zęba:

$$\begin{aligned} \phi &= \tan(\alpha_t) * 180 / \pi - \alpha_t \\ \theta_d &= 90 / z_1 - 360 * x_1 * m * \tan(\alpha_t) / (d * \pi) \\ \theta_b &= \theta_d - \phi \\ r &= d_b / 2 + t * (d_a - d_b) / 2 \\ a &= \arccos(d_b / (2 * r)) \\ f &= \tan(a) * 180 / \pi - a \\ \theta &= f + \theta_b \\ x &= -r * \cos(\theta + 90) \quad (3) \\ y &= -b / 2 \quad (4) \\ z &= r * \sin(\theta + 90) \quad (5) \end{aligned}$$

gdzie:

- ϕ - involuta kąta (t wyrażona w stopniach,
- α_t - kąt przyporu,
- θ_d - kąt punktu ewolwenty na kole podziałowym,
- θ_b - kąt początku odwijania ewolwenty na kole zasadniczym,
- z_1 - liczba zębów w kole,
- x_1 - współczynnik korekcji koła,
- m - moduł normalny,
- d - średnica podziałowa koła,
- r - bieżący punkt ewolwenty począwszy od średnicy zasadniczej do średnicy głów (uzależniony od parametru t),
- d_b - średnica zasadnicza,
- d_a - średnica głów,
- a - bieżący kąt przyporu dla promienia r ,
- f - involuta dla bieżącego punktu na ewolwencie,

θ - bieżący kąt promienia wodzącego punktu ewolwenty,
 x, y, z - współrzędne punktu ewolwenty,

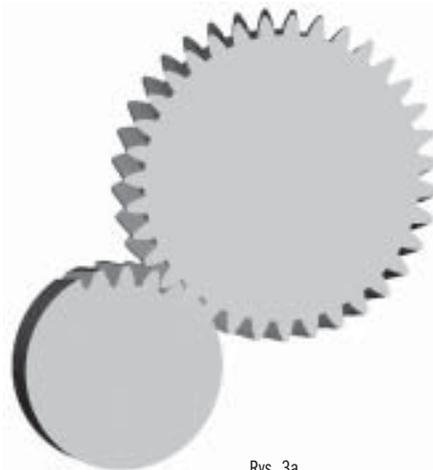
Uzyskana sparametryzowana krzywa przejściowa oraz ewolwenta zostają w procesie tworzenia modelu przestrzennego przeciągnięte po linii śrubowej opisanej równaniami (6), (7) i (8)

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 360 * B * \tan(\beta) / \pi / d \\ \delta &= \alpha_s * t \\ x &= -d / 2 * \sin(\delta) \quad (6) \\ y &= t * b - b / 2 \quad (7) \\ z &= d / 2 * \cos(\delta) \quad (8) \end{aligned}$$

gdzie:

- α_s - kąt zataczany przez linię śrubową,
- B - szerokość koła zębatego,
- β - kąt pochylenia linii zęba,
- d - średnica podziałowa,
- δ - bieżący kąt punktu na linii śrubowej (uzależniony od parametru t),
- x, y, z - współrzędne linii śrubowej.

Związki te wraz z innymi odnoszącymi się do geometrii i proporcji uzębienia zostały wy-



Rys. 3a.

korzystane w procesie tworzenia teoretycznego modelu konstrukcyjnego walcowego koła zębatego.

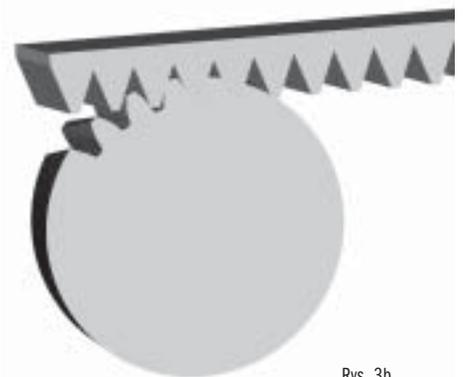
Proces tworzenia modelu 3D w systemach CAD/CAM/CAE

Systemy CAD zawierają narzędzia do modelowania powierzchniowego, powierzchniowo-bryłowego oraz bryłowego. Nie wszystkie systemy i nie wszystkie funkcje, dostępne w tych systemach, służące do modelowania umożliwiają parametryczny zapis konstrukcji. Utrudnia to, a nawet czasami uniemożliwia,

zamodelowanie projektowanych elementów maszyn w taki sposób, aby były całkowicie parametryczne. Do podstawowych funkcji wykorzystywanych w procesie modelowania, w które wyposażone są programy CAD, należą:

- „extrud” - wyciągnięcie dowolnego profilu wzdłuż prostej,
- „sweep” - przeciągnięcie dowolnego profilu wzdłuż dowolnej trajektorii,
- „swept” - przeciągnięcie dowolnego profilu wzdłuż kilku dowolnych trajektorii oraz wiele innych. Ten sposób umożliwia „ręczne” tworzenie sparametryzowanego modelu przestrzennego. Innym sposobem tworzenia geometrii parametrycznej jest stosowanie w programach CAD krzywych opisanych równaniami parametrycznymi, co pozwala na wpisywanie wzorów symbolicznych i związków matematycznych i opracowanie na ich podstawie modelu przestrzennego. W przypadku zmian w równaniach i wielkościach niektórych parametrów istnieje możliwość ciągłej ingerencji w już stworzoną geometrię bez konieczności powtórzenia budowania modelu. Pierwszym etapem tworzenia modelu konstrukcyjnego walcowego koła zębatego o zębach skośnych jest:

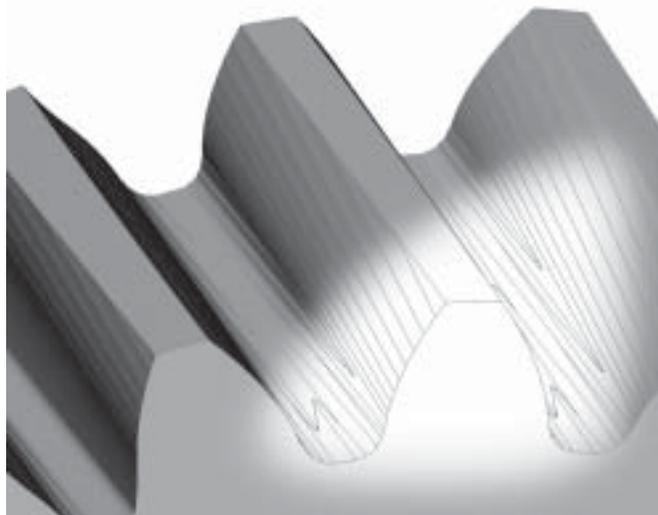
- zamodelowanie otoczki,
- stworzenie krzywych ewolwentowych, linii zęba (np. linii śrubowej) oraz krzywych przejściowych,
- utworzenie powierzchni boku zęba poprzez przeciągnięcie odpowiednich zarysów po linii śrubowej,



Rys. 3b.

- połączenie powierzchni przejściowych powierzchnią walcową dna wrębów,
- wycięcie wrębu w otoczce stworzonymi powierzchniami.

Krzywa ewolwentowa oraz krzywa przejściowa (rys. 1) są geometrią w pełni parametryczną. Dokonując zmian parametrów wpływających na kształt tych krzywych, dokonuje się szybkiej aktualizacji modelu przestrzenne-



Rys. 4.

go. Na rysunku 1 przedstawiono krzywe dla różnej liczby zębów. Można zaobserwować wyraźne większy kąt przecięcia między ewolwentą a krzywą przejściową dla przypadku „a” niż dla przypadku „b”. Widać także inne proporcje i kształt krzywych.

Tak jak parametr „z”, modyfikować można każdą wielkość użytą do konstruowania teoretycznego modelu koła zębatego obserwując, i dokonując porównań między poszczególnymi zmianami zachodzącymi podczas tego procesu. Dzięki funkcjom i poleceniom programów CAD tworzony jest model bryłowy lub powierzchniowy, jako teoretyczny model konstrukcyjny koła zębatego. Dokładność odwzorowania, to dokładność obliczeń i trójwymiarowej wizualizacji tworzonego modelu. Zamodelowane koło zębate jest idealnym teoretycznym modelem, do wytworzenia którego dąży się w procesie produkcyjnym (rys. 2).

Model technologiczny utworzony jest przez:

- zamodelowanie otoczki koła,
- stworzenie modelu 3D narzędzia,
- odjęcie bryły otoczki kopią bryły narzędzia,
- przemieszczenie narzędzia do kolejnego położenia obwiedniowego, zgodnie ze związkami kinematycznymi występującymi podczas rzeczywistego procesu wytwarzania koła zębatego,
- powtarzanie operacji wycinania i przemieszczania narzędzia, aż do całkowitego nacięcia uzębienia.

Rysunek 3a przedstawia układ koła obrabiane - dłutak w czasie nacinania uzębienia. Rys. 3b przedstawia układ koła obrabiane - zębata.

Teoretyczny model technologiczny walcowego koła zębatego (rys. 4) jako idealne odwzorowanie metody technologicznej obróbki uzębienia,

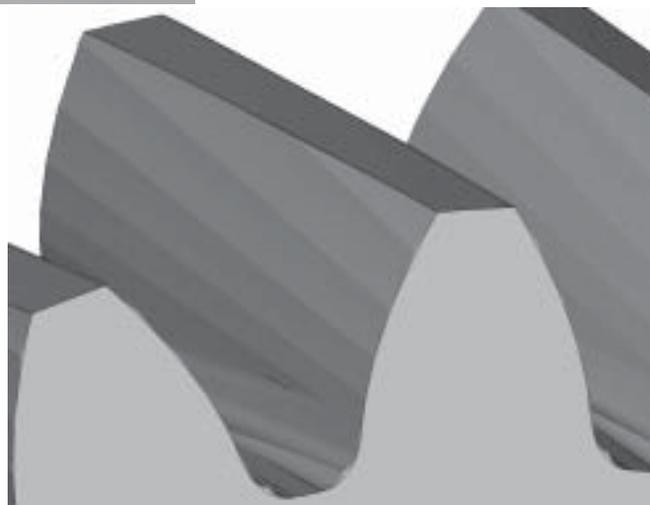
na którym widać poszczególne przejścia narzędzia, może posłużyć do określenia i zidentyfikowania różnic między teoretycznym modelem konstrukcyjnym a teoretycznym modelem technologicznym. Na rys. 4 przedstawiono bryłowy model technologiczny koła walcowego z rys. 1a. Posłużyć on może do określenia ewentualnych błędów w modelu

stans”, zatem możliwe jest nawet określenie dokładności „wykonania” uzębienia na modelu technologicznym lub też określenie błędu modelu konstrukcyjnego.

Przedstawione w referacie modelowanie bryłowe walcowych kół zębatach, wykonywanych metodami obwiedniowymi, jest częścią opracowywanego programu wykorzystującego środowisko systemów CAD/CAM/CAE do modelowania kół od walcowych o prostej linii zęba począwszy, po koła stożkowe o zębach krzywoliniowych. Symulacyjne modele przekładni stożkowej (zębnika i koła) zostały zaprezentowane w pracach [4] i [5]. Aktualnie prowadzone są prace nad uogólnionym teoretycznym konstrukcyjnym modelem przekładni stożkowej.

Tworzone modele bryłowe kół zębatach mogą być poddawane dalszym badaniom z zastosowaniem metody elementów skończonych, ocena błędów wykonania, wpływu czynników technologicznych na dokładność wykonania czy wykorzystanie do dalszych prac projektowych mechanizmów maszyn z włączeniem w proces projektowania inżynierii współbieżnej.

**Piotr Skawiński,
Tomasz Połaski
Paweł Zygiel**
*Politechnika Warszawska
Instytut Podstaw
Budowy Maszyn*



Rys. 5.

konstrukcyjnym, a także w wypadku zastosowania inżynierii odwrotnej do weryfikacji (kontroli) rzeczywistego koła zębatego. Można też, wprowadzając niektóre błędy procesu nacinania uzębienia, np. błąd odtaczania, błąd wykonania narzędzia np. kąty zarysu, generować model technologiczny obrazujący wpływ tychże błędów na przyszłym rzeczywistym kole zębatym. Symulacja obróbki uzębienia może ilustrować wpływ np. posuwu na dokładność wykonania zarysu. Wiodące na rys. 4 „mikropowierzchnie” to odpowiednik śladów położenia obwiedniowych narzędzia odpowiadających przyjętemu posuwowi.

Nakładając na bryłowym modelu technologicznym krzywe płaskie ewolwenty i krzywej przejściowej, można dokonać analizy zgodności modelu konstrukcyjnego i technologicznego. Biorąc pod uwagę przy teoretycznych założeniach symulacyjną obróbkę, występujące rozbieżności należy interpretować jako błędy modelu konstrukcyjnego. Uwidocznione na rys.5 dla koła z rys. 1a krzywe nałożone w przekroju normalnym uzębienia, potwierdzają poprawność modelu konstrukcyjnego. Systemy CAD najczęściej posiadają funkcję „dy-

Literatura

1. Rybak J., Spójny system obliczeń narzędzi obwiedniowych do ewolwentowych uzębienia walcowych, Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika, zeszyt 1,1983
2. Jaśkiewicz Z., Wąsiewski A., Przekładnie walcowe, WKiŁ, Warszawa 1992
3. Romanow W.F., Narzędzia skrawające do uzębienia, WNT, Warszawa 1972
4. Skawiński P., Siemiński P., 3D modeling of spiral bevel gears as a result of cutting simulation, Internationale Conference Computer Integrated Manufacturing, Zakopane 2001
5. Skawiński P., Siemiński P., Parametryczny trójwymiarowy model przekładni stożkowej o krzywoliniowej linii zęba jako wynik symulacji obróbki uzębienia. Program priorytetowy Nowe Technologie, Zeszyty naukowe, Warszawa 2001
6. Skawiński P., Połaski T., Zygiel P., Trójwymiarowe modelowanie kół walcowych zębatach w systemach CAD/CAM/CAE, XIII Konferencja „Metody i środki projektowania wspomagane komputerowo”, Warszawa 2001

Techniki pomiarowe wspomagające systemy CAD/CAM/CAE

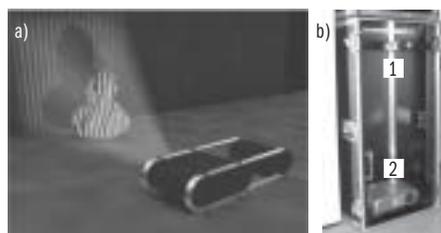
Nowoczesny system produkcyjny bazuje na komputerowo wspomaganym: projektowaniu geometrii obiektu (CAD), analizie projektowania konstrukcji (CAE) i określenia drogi narzędzia wykonującego produkt (CAM). Wobec ogólnej tendencji skracania czasu projektowania i wytwarzania produktu z jednej strony i podwyższania jego jakości z drugiej, pojawiła się w ostatnich latach konieczność silnego wspomaganie procesu produkcji technikami pomiarowymi. Optyczne techniki pomiaru kształtu [1] są doskonałym narzędziem pozwalającym na uzyskanie dokładnych pomiarów geometrii trójwymiarowej przedmiotu. Dostępność danych pomiarowych opisujących kształt wykonanego obiektu pozwala na kontrolę procesu produkcyjnego na jego kolejnych etapach, uruchomienie procesu szybkiego prototypowania pomierzonego obiektu lub wykonanie jego kopii. Dane pomiarowe są niezbędne w tzw. projektowaniu odwrotnym, które umożliwia wykonanie kopii, którego model CAD nie jest dostępny.

Nowoczesny system pomiaru kształtu będący elementem procesu projektowania odwrotnego lub kontroli przemysłowej powinien zapewnić:

- bezdotkowy pomiar,
 - krótki czas pomiaru,
 - pomiar z wielu kierunków, w celu pozyskania pełnej informacji o obiekcie,
 - możliwość łączenia pomiarów z N kierunków,
 - zapis wyników w postaci kompatybilnej w systemami CAD/CAM.
 - Aktualnie dostępne na rynku optyczne systemy pomiaru kształtu bazują na dwóch podstawowych metodach [1]:
 - triangulacji laserowej – pomiar punktowy (np. system firmy Cyberware, USA), system jest skomplikowany i drogi, ze względu na konieczność bardzo dokładnego pozycjonowania,
 - projekcji światła strukturalnego – pomiar dokonywany w całym polu widzenia (np. systemy firm: Steinbichler, IOF (Jena), Smarttech), systemy umożliwiające automatyczne, szybkie i dokładne określenie kształtu różnych klas obiektów pomiarowych.
- W pracy przedstawiono konkurencyjny do handlowych ofert z drugiej grupy system pomiaru kształtu dużych obiektów trójwymiarowych w zakresie 360° pola widzenia.

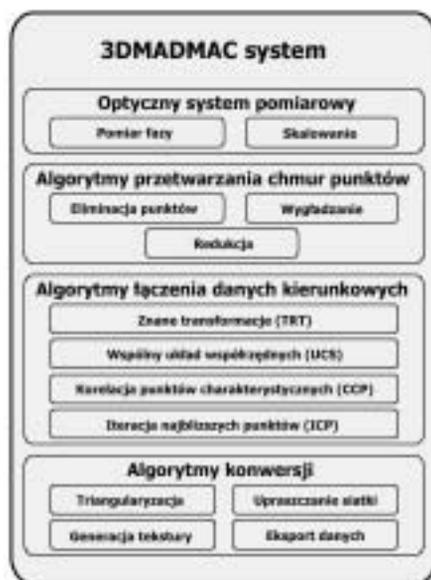
System pomiarowy

Przykładem systemu pomiaru kształtu w dużych objętościach pomiarowych jest system zbudowany w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki PW (rys. 1a) bazujący na projekcji prążków (technologia DLP – digital light projection) oraz na akwizycji obrazu przez kamerę CCD. W systemie tym absolutne współrzędne obiektu (x,y,z) wyznacza się przez przeskalowanie map fazowych obliczonych przez analizę zdeformowanych obrazów prążkowych. Skalowanie realizowane jest na podstawie wyników eksperymentalnej kalibracji objętości pomiarowej. System składa się z dwóch gałęzi pomiarowych – A, B (rys. 1a) oraz modułu zarządzająco-pomiarowego – ZO.



Rys. 1. System optycznych pomiarów kształtu obiektów trójwymiarowych: a) wersja komercyjna (Smarttech), b) zdjęcie gałęzi pomiarowej; 1) kamera CCD, 2) projektor DLP.

Gałąz pomiarowa (rys. 1b) jest układem składającym się z kamery CCD, cyfrowego projektor światła DLP oraz przenośnej szafy typu RACK. Komputer zarządzająco-pomiarowy



Rys. 2. Bloki funkcjonalne systemu pomiaru kształtu i analizy.

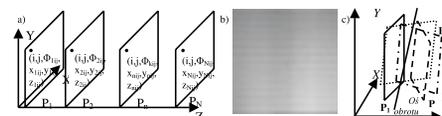
montowany jest także w szafie typu RACK. System wyposażono w stolik obrotowy o kącie obrotu 360° oraz liniowy o zakresie pracy 2m wraz z wzorcem kalibracyjnym o wymiarze 1,5x1,5m2. Podstawowe bloki funkcjonalne systemu przedstawiono na rys. 2. Realizowane przez nie zadania umożliwiają:

- pracę z jedną gałęzią pomiarową,
 - pomiar z 2M (M – liczba kamer CCD w jednej gałęzi) kierunków przy wykorzystaniu stolika obrotowego sterowanego przez komputer,
 - akwizycję i przetwarzanie danych przez komputer zarządzająco-pomiarowy.
- Prezentowany system charakteryzuje się następującymi parametrami technicznymi:
- objętość pomiarowa: 1,5x1,5x1m3,
 - niedokładność wyznaczenia współrzędnych (x,y,z): 1mm,
 - minimalny czas pomiaru z jednego kierunku: 14 s,
 - wynikiem pomiaru jest chmura współrzędnych pomiarowych (x,y,z,R,G,B) lub siatka trójkątów z teksturą (DXF, VRML, IGES).

Tryb kalibracji

Na proces kalibracji składają się dwa etapy [2]:

- kalibracja objętości pomiarowej (stworzenie macierzy kalibracji), służąca do wyznaczenia współrzędnych (x,y,z) reprezentujących powierzchnię mierzonego obiektu,
- wyznaczenie równania osi stolika obrotowego w układzie współrzędnych macierzy kalibracji, wykorzystywana do automatycznego łączenia chmur punktów uzyskanych z wielu kierunków.



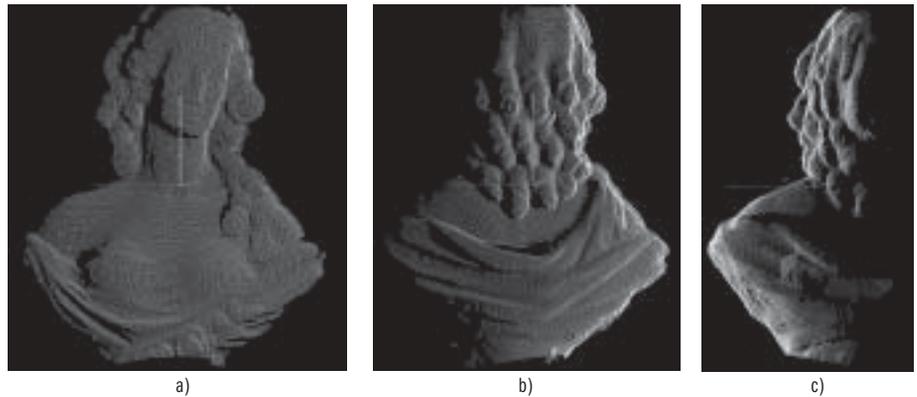
Rys. 3. Wyznaczanie macierzy kalibracji: a) rozmieszczenie wirtualnych płaszczyzn, b) wzorek kalibracyjny, c) wyznaczenie osi obrotu stolika obrotowego.

Macierz kalibracji jest zapisem wirtualnych płaszczyzn, które zostały pomierzone w procesie kalibracji. Każda płaszczyzna jest zbiorem punktów o współrzędnych (i,j,Φ,x,y,z), co jest przedstawione na rys. 3. Wartości (i,j) są indeksami pikseli w obrazie kamery, Φ wartością fazy obliczoną [2] dla tego punktu, a (x,y,z) współrzędnymi punktu w przestrzeni macierzy kalibracji (rys. 3).

W pierwszym etapie kalibracji należy ustawić odpowiednio płaszczyznę zerową ponieważ w przestrzeni macierzy kalibracji reprezentuje ona płaszczyznę XY w przestrzeni układu kartezjańskiego (czyli wszystkie punkty tej płaszczyzny mają współrzędną Z równą zero). Następnie wyliczona zostaje faza Φ [2] w każdym pikselu (i,j). Kolejnym etapem jest wyliczenie współrzędnych (x,y) dla każdego piksela. Zastosowany został do tego specjalny wzorec (rys. 3b), który jest reprezentowany przez koła naniesione na kartę papieru w formacie odpowiadającym poprzecznym wymiarom objętości pomiarowej ($2x2m^2$). Na podstawie obrazu tego wzorca oraz wiedzy o rozmieszczeniu znaczników możemy stworzyć mapę współrzędnych XY dla obrazu. Następnie wyznaczamy te same wielkości dla kolejnego położenia wzorca kalibracyjnego aż do wypełnienia całej objętości pomiarowej. Kolejnym krokiem jest obliczenie równania osi obrotu stolika obrotowego (rys. 3c), jeśli wybrana jest ta metoda łączenia. Przedtem należy dokonać pomiaru płaszczyzny w czterech różnych położeniach stolika obrotowego. Następnie wyznaczamy z równań czterech płaszczyzn równanie osi obrotu stolika. Równanie to jest niezbędne do złożenia chmur punktów mierzonych z różnych kierunków. Jeśli pomiar będzie dokonywany tylko z jednego kierunku, ten etap kalibracji można pominąć.

Tryb pomiaru z jednego kierunku

Podczas pomiaru pobieranych jest 14 obrazów (5 obrazów prążkowych przesuniętych w fazie $\pi/2$, oraz 9 kodów Graya (rys. 4), z których oblicza się fazę Φ dla każdego piksela (i,j) [3]. Z obrazów prążkowych wyznacza się fazę $\Phi(i,j) \bmod(2\pi)$, korzystając z metody czasowej dyskretnej zmiany fazy, natomiast kody Graya wykorzystuje się w hierarchicznej metodzie usuwania skoków fazy $N(i,j) \cdot 2\pi$. Ostatecznie, dodając te dwie wartości, otrzymuje się ciągłą funkcję fazy. Następnie korzystając z wartości wyliczonej fazy Φ dla każdego piksela (i,j) oraz z wcześniej obliczonej macierzy kalibracji oblicza się współ-



Rys. 5. Przykładowe chmury punktów pobrane z różnych kierunków: a) 0°, b) 120°, c) 240°.

rzędne (x,y,z) dla każdego piksela (i,j) zgodnie z równaniem , gdzie:

$$(i, j, \Phi) \rightarrow (x, y, z) \begin{cases} z = Z(\Phi, i, j) \\ x = X(z, i, j) \\ y = Y(z, i, j) \end{cases}$$

$Z(\Phi, i, j)$ - wielomian piątego rzędu $z=f(\Phi)$ obliczony na podstawie macierzy kalibracji dla piksela (i,j) przy zastosowaniu kryterium minimalnego błędu średniokwadratowego, $X(z, i, j)$ - wielomian pierwszego rzędu $x=f(z)$ obliczony na podstawie macierzy kalibracji dla piksela (i,j) przy zastosowaniu kryterium minimalnego błędu średniokwadratowego, $Y(z, i, j)$ - wielomian pierwszego rzędu $y=f(z)$ obliczony na podstawie macierzy kalibracji dla piksela (i,j) przy zastosowaniu kryterium minimalnego błędu średniokwadratowego.

Łączenie danych uzyskanych z wielu kierunków

Proces łączenia chmur punktów [4] pobranych z wielu kierunków może się odbywać przy zastosowaniu dwóch metod:

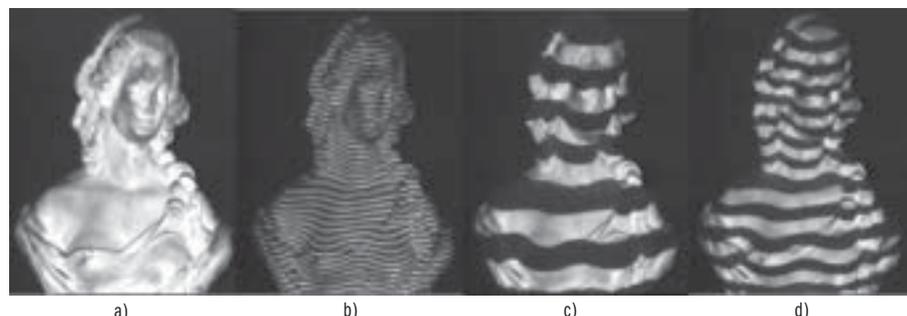
- eksperymentalnej (z wykorzystaniem stolika obrotowego),
- numerycznej (wyznaczanie i korelacja punktów charakterystycznych w łączonych chmurach).

Metoda eksperymentalna bazuje na znajomości równania osi obrotu stolika oraz znajomości

kąta obrotu wokół tej osi między poszczególnymi chmurami punktów. Mając te dane, wystarczy dokonać prostych transformacji geometrycznych, aby uzyskać jedną chmurę reprezentującą cały obiekt. Metoda numerycznego dopasowania chmur punktów pobranych z wielu kierunków realizowana jest przez wyznaczanie punktów charakterystycznych dla każdej chmury i próbę dopasowania tych punktów na podstawie ich wzajemnego położenia. Punkty są wyznaczane na podstawie lokalnej wartości drugiej pochodnej (rys. 6) ponieważ wielkość ta jest niezależna od przesunięcia i obrotu obiektu. Pochodna obliczana jest dla każdego punktu chmury w dwóch etapach:

- obliczenie wektora normalnego do powierzchni obiektu na bazie sąsiadujących punktów, znajdujących się w odległości S od punktu liczonego,
- obliczenie średniego kąta między wektorami normalnymi punktów znajdującymi się w odległości S od liczonego punktu, a wektorem normalnym tego punktu.

Wartość odległości S wyznaczana jest przez obliczenie średniej odległości punktów w chmurze pomiarowe, a następnie określenie jej wielokrotności. Wartość wielokrotności decyduje o stopniu uśrednienia wartości drugiej pochodnej i domyślnie przyjmuje się wartość cztery co daje średnią z około czterdziestu punktów. Kolejnym etapem jest wyznaczenie punktów charakterystycznych. Odbywa się to przez wyszukiwanie lokalnych ekstremów wartości drugiej pochodnej określonej dla każdego punktu chmury (rys. 6a i b). Następnie wyszukuje się po jednym podzbiore punktu charakterystycznych z każdej chmury, takich że różnice odległości między odpowiednimi punktami w tych podzbiore są minimalne. Oczywiście, liczba punktów w podzbiore musi być większa niż dwa. Ostatnim etapem jest transformacja geometryczna jednej chmury, powodująca pokrycie się punktów charakterystycznych w znalezionych podzbiorech (rys. 6c). Następnie ta sekwencja operacji powtarzana jest dla kolejnej łączonej pary



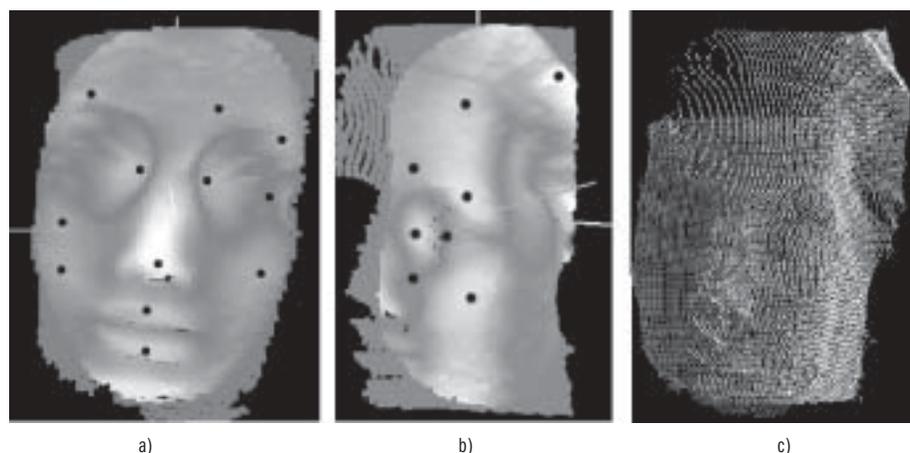
Rys. 4. Przykładowe obrazy obiektu mierzonego: a) obiekt mierzony, b) prążki sinusoidalne, c), d) kody Graya.

chmur punktów. Zastosowanie tego algorytmu ogranicza klasę obiektów pomiarowych, do których można go zastosować. Niezbędna jest zmienność lokalnej drugiej pochodnej powierzchni obiektu oraz wymagana jest duża powierzchnia wspólna dla łączonych chmur, ponieważ muszą się na niej znaleźć przynajmniej trzy punkty charakterystyczne. Spełnienie jednak tych warunków pozwala złożyć wiele chmur punktów bez stosowania drogiego stolika obrotowego.

Triangularyzacja

Chmury punktów pomiarowych zawierają bardzo dużo informacji – punktów (dla jednego kierunku około 100 000 pkt. – każdy punkt reprezen-

tów handlowych do pomiaru kształtu. Druga koncepcja [6] zaproponowana przez autorów jest bardziej uniwersalna. Brak natomiast wzorców oprogramowania. Uniwersalność tej koncepcji ma źródło w tym, że na wejściu dostarczana jest dowolna chmura punktów i nie jest potrzebna znajomość zależności geometrycznych między poszczególnymi chmurami. Proponowana zasada redukcji chmury punktów pozyskanych z pomiarów z wielu kierunków bazuje na sukcesywnym uśrednianiu punktów w zadanej przez operatora sferycznej objętości pomiarowej (tworzenie węzłów – rys. 7) i budowie siatki trójkątnej bazującej na w/w węzłach. Budowa siatki trójkątów realizowana jest przy spełnieniu zadanych warunków na kąt zamknięcia i zszycia siatki.



Rys. 6. Wizualizacja drugiej pochodnej z dwóch chmur punktów przedstawiających twarz wraz z punktami charakterystycznymi a) i b) oraz połączoną chmurę wynikową c).

towany jest przez współrzędne). Punkty te nie są w żaden sposób uporządkowane i powiązane z sobą. Zadaniem algorytmu triangularyzacji jest redukcja informacji, a także konwersja chmury punktów do siatki trójkątów. Przy pomiarze z N kierunków istnieją dwie koncepcje triangularyzacji:

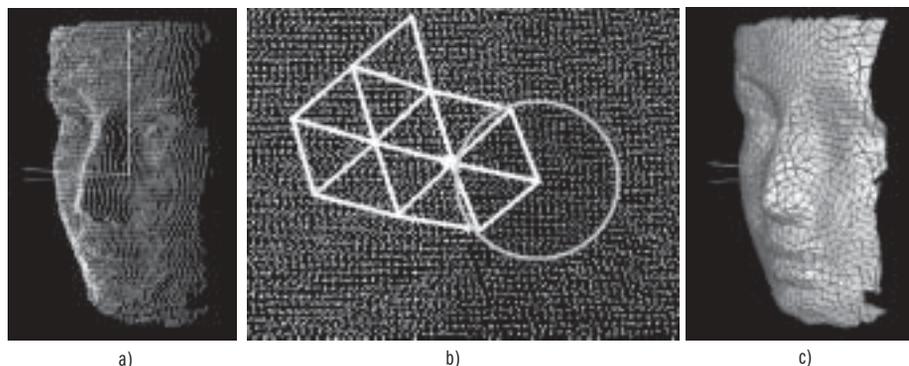
- należy tworzyć z każdego kierunku siatkę trójkątów i następnie łączyć te siatki,
- należy łączyć chmury z N kierunków, a następnie tworzyć siatkę z jednej dużej chmury.

Zgodnie z pierwszą koncepcją [5] triangularyzacja jest bardzo prosta. Najpierw należy zaleźć płaszczyznę, najlepiej dopasowaną do chmury mierzonej z jednego kierunku. Następnie przyjąć, że jest to płaszczyzna XY w lokalnym układzie współrzędnych chmury. Przypisać do niej dwuwymiarową siatkę $M \times N$ i znaleźć wysokości oczek siatki (w lokalnym układzie współrzędnych) na podstawie wartości w chmurze. Wadą tej koncepcji jest konieczność znajomości dokładnych zależności geometrycznych między poszczególnymi chmurami. Zaletą natomiast jest szybki czas obliczeń niezbędnych przy konwersji. Tę koncepcję triangularyzacji wykorzystuje większość syste-

Przykład aplikacji w systemie inżynierskim

Pomiar kształtu obiektu (rys. 4a) w wyniku triangularyzacji daje siatkę trójkątów równoważną z chmurą punktów tworzonych przez wierzchołki trójkątów. Systemy inżynierskie CAD/CAM/CAE czy też tylko programy komputerowo wspomaganego projektowania CAD wczytują pliki zawierające ten format danych.

Umożliwia to wizualizację (możliwość obrotu i przemieszczenia na ekranie) trójwymiarowego obiektu nawet w postaci zacięniowanej. Jednakże z racji że jest to tylko siatka trójkątów a nie powierzchnia, wykorzystanie obiektu do celów projektowania wytwarzania a ściślej do generowania trajektorii narzędzia jest niemożliwe. Co prawda systemy CAD posiadają możliwości tworzenia powierzchni z chmury punktów ale z reguły są to opcjonalne aplikacje z zakresu inżynierii odwrotnej. Pozostaje więc ręczny i przez to pracochłonny sposób wskazywania punktów i tworzenia w ten sposób ciągłej powierzchni, która w środowisku systemu otrzymuje reprezentację wielomianową m -tego stopnia. Inny sposób to import do środowiska systemu CAD pliku, zawierającego trójkątne powierzchnie płaskie jako reprezentacje powierzchni obiektu. W procesie generowania, dla złożonych kształtów mierzonych obiektów, plików wymiany np. IGES, zwłaszcza przy założeniu określonej dokładności odwzorowania, tworzone jest tysiące płatów powierzchni, które nie wszędzie mogą być z sobą połączone. Powoduje to nieciągłość powierzchni uniemożliwiając wykorzystanie jej do generowania trajektorii narzędzia. Systemy CAD posiadają możliwość „zszycia” powierzchni przy pomocy powierzchni wypełniającej, jednakże operacja z powodów o których wspomniano wyżej jak i niedoskonałości algorytmu systemu nie zawsze daje oczekiwany rezultat. Jednym ze sposobów zmniejszenia liczby niepołączonych z sobą płatów a przez to umożliwienie systemowi zszycie powierzchni, jest import danych ze zmniejszoną dokładnością operacji łączenia płatów bądź też zmniejszenie liczby węzłów siatki w trakcie analizy chmury punktów. Do wykonania prototypu [7] obiektu z rys. 4a wykorzystano system Pro/ENGINEER, w szczególności jego środowisko CAM. Przygotowany przez system pomiaru kształtu siatka trójkątów została zaimportowana do środowiska systemu CAD (rys. 8). Z uwagi na przygotowanie materiału do operacji frezowania



Rys. 7. Triangulacja: a) chmura punktów, b) powstawanie siatki, c) siatka trójkątów.



Rys. 8. Obraz twarzy z siatki trójkątów.



Rys. 9. Bryła twarzy.

twarzy, jak i czas wykonania, ograniczono obszar obróbki do wymiarów 60 x 70 mm (rys. 9).

Obróbka frezowaniem

Operację obróbki frezowaniem twarzy, przyjmując za najbardziej korzystną strategię ruchu narzędzia tzw. zig-zag, wykonano w dwóch zabiegach:

- obróbki zgrubnej frezem palcowym o średnicy 6 mm (50% pokrycie kolejnych ścieżek) przyjmując posuw roboczy 500 mm/min przy prędkości obrotowej narzędzia 3000 obr/min
- obróbki wykańczającej frezem kulistym o średnicy kuli 6 mm (80% pokrycie kolejnych ścieżek) z posuwem 600 mm/min i prędkością obrotową 3000 obr/min.

Obróbkę prowadzono na frezarce narzędziowej CNC produkcji FOP Avia z 3-osiowym układem sterowania PRONUM 640 FC.

Wygenerowane ścieżki narzędzia (plik CLData) dla zabiegu obróbki zgrubnej przedstawiono na rys. 10, zaś dla obróbki wykańczającej na rys. 11. Po translacji odpowiednim postprocesorem adresowanym dla danego sterownika utworzony został program źródłowy. Program ten zawiera kody G (głównie interpolację liniową), określa współrzędne punktu dla każdej osi (XYZ) układu odniesienia przedmiotu obrabianego. Programy operacji technologicznych (obróbka wykańczająca – 711 kB) wymagały podziału na 6 samodzielnych programów z racji ograniczonej pojemności pamięci operacyjnej układu sterowania (196 kB). Czas obróbki zgrubnej ok. 1 godziny i ok. 2 godzin obróbki wykańczającej.

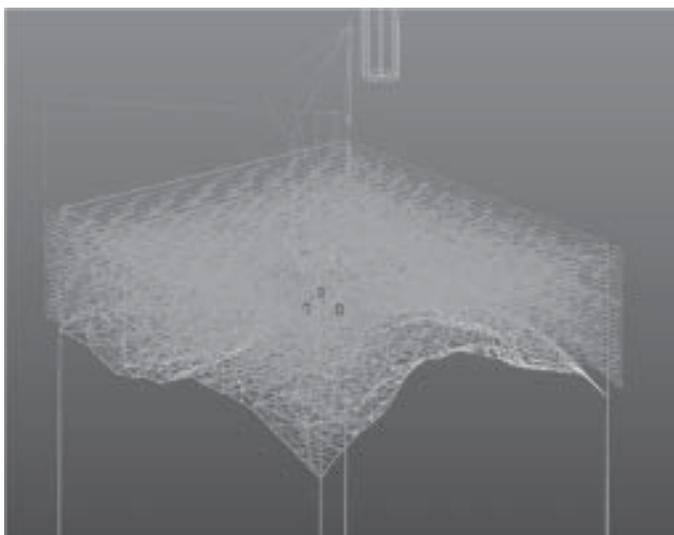
Współczesne projektowanie coraz częściej wykorzystuje inżynierię odwrotną łącząc, jak przedstawiono w artykule, budowę zwektoryzowanego obiektu w środowisku komputerowym na podstawie pomiaru kształtu z wykorzystaniem

oświetlenia strukturalnego po szybkie prototypowanie czy obróbki ubytkowe. Tworzy się zatem spójne wraz z systemami inżynierskimi narzędzie ułatwiające proces projektowania. Na podstawie tej metodyki opracowano system handlowy 3Dshape i przekazano do wdrożenia firmie Smarttech [8]. W celu poprawienia jakości procesu, dalszych prac wymagają aplikacje tworzące struktury plików wymiany np. IGES, jako łączniki między systemem pomiaru kształtu światłem strukturalnym a systemami inżynierskimi.

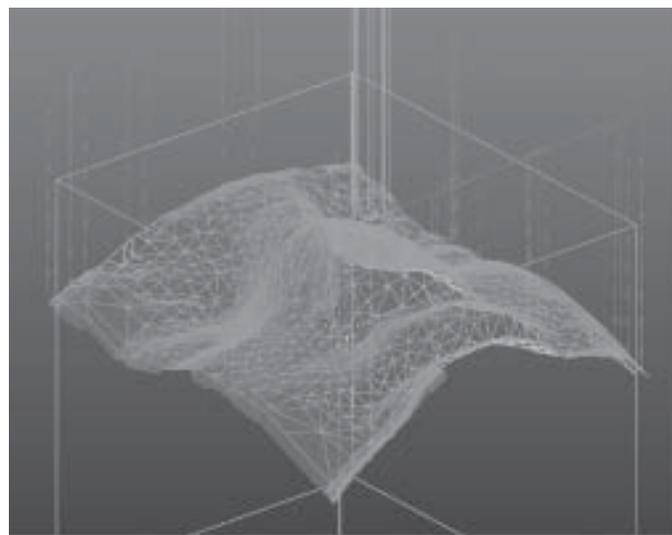
**Małgorzata Kujawińska,
Rober Sitnik**
*Instytut Mikromechaniki
i Fotoniki Politechniki
Warszawskiej*
Piotr Skawiński
*Instytut Podstaw Budowy
Maszyn Politechniki
Warszawskiej*

Literatura

1. F. Chen, G.M. Brown, M. Song „Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods”, *Opt. Eng.* 39, 10-22, 2000.
2. R. Sintik, M. Kujawińska, J. Woźnicki, „Digital fringe projection system for large-volume 360deg shape measurement”, *Opt. Eng.* 41(2), 443-449, 2002.
3. K. Creath, „Phase measurement interferometry techniques”, *Progress in optics*, red. E. Wolf, v. XXVI, North-Holland 1988.
4. R. Sitnik, „Analiza procesu łączenia chmur punktów pozyskanych z optycznego systemu pomiaru kształtu obiektów trójwymiarowych”, *Krajowy Kongres Metrologii*, 2001.
5. http://www.physik.uni-erlangen.de/optik/main_e.html.
6. R. Sitnik, M. Kujawińska „From cloud of point co-ordinates to 3D virtual environment: the data conversion system”, *Opt. Eng.* 41(2), 416-427, 2002.
7. P. Skawiński, „Kształtowanie rysunku ostrzy na frezarkach CNC monolitycznych głowic frezowych do obróbki uzebień przekładni stożkowych i kołowo-tukowej linii zęba”, *Program Priorytetowy Nowe Technologie, Prace naukowe, zeszyt 3, Warszawa, 2000.*
8. <http://www.smarttech.pl>.



Rys. 10. Obróbka zgrubna.



Rys. 11. Obróbka wykańczająca.

Integracja oprogramowania inżynierskiego

Biura projektowe posiadają swoje własne modele procesów projektowych oraz swoje własne modele produktów [9]. Najczęściej są one tworzone przez wiele lat stanowiąc realny dorobek danego biura. Modele procesu i produktu funkcjonujące w biurach projektowych niekoniecznie muszą posiadać wyartykułowaną formalnie postać. Często są one wiedzą na temat sposobu realizacji określonych zadań, podziału zadania na kroki, używanych narzędzi, systemu oceny itp. Często są one częściowo sformalizowane. Biuro projektowe, na ogół, stanowi zespół współpracujących ze sobą osób. Realizowane procesy projektowe przybierają postać działań wykonywanych przez wielu projektujących, włączając w to interakcje pomiędzy członkami zespołu. Członkowie zespołu mają określoną wiedzę jaka jest im potrzebna do wykonywania ich zadań. Ta wiedza to efekt pracy i własnego rozwoju. Stanowi ona integralną całość, która mówi w jaki sposób prowadzić procesy projektowe, w jaki sposób opisywać efekty tych procesów w różnych fazach ich powstawania. Projektujący wykonując swoje zadania budują niezbędne modele, analizują ich funkcjonowanie. Bardzo często stosują modele mentalne, analizują je mentalnie. Jednakże na pewnym etapie przechodzą do modeli formalnych. Wynika to z faktu, że pragną dokładniej przetestować własne koncepcje, chcą lepiej je przedstawić innym projektującym, a także próbują wykonać po trosze pewną część pracy jaką jest stworzenie końcowej dokumentacji projektowej. Mogą to być zarówno szkice, modele wykonane materialnie, czy też bardzo dzisiaj powszechne, modele komputerowe. Modele poddawane są analizie. Modele komputerowe najczęściej analizuje się za pomocą narzędzi do analizy komputerowej. Naturalną konsekwencją tego faktu jest to, że dochodzi do integracji aplikacji komputerowych. Stosunkowo niedawno wykonano kolejny krok na drodze ku integracji. Zaczęto integrować nie tylko zasoby pojedynczych biur projektowych ale także różne, często odległe, biura projektowe. W projektowaniu używa się dzisiaj wielu narzędzi komputerowych. Ich producenci najczęściej oferują narzędzia prowadzące do ich integracji. Stosowanych jest wiele technologii i standardów. Technologie i standardy są ustawicznie rozwijane. Towarzyszy temu proces ich przemysłowej weryfikacji

[1, 4]. Odbywają się liczne, bardzo zaawansowane i bardzo szczegółowe dyskusje. Konkluzje wynikające z tego procesu prowadzą do wniosku, że zagadnienia te należy rozpatrywać w kontekście branżowym, geograficznym, itp. Projektowanie maszyn w chwili obecnej realizowane jest przy dużym zaangażowaniu środków komputerowych i najczęściej wiąże się z przetwarzaniem dużych ilości informacji. Oprogramowanie dostarczone przez producenta oprogramowania rzadko stanowi produkt statyczny, niezmienny. Najczęściej podlega on ciągłym modyfikacjom, procesom przystosowawczym, dokonywanym zarówno przez producenta jak i użytkowników. Naturalne stało się dążenie do integracji komputerowych zasobów biur projektowych.

Metody integracji

Model procesu projektowego stanowi informację o tym jak realizowano określony proces projektowy [9]. Do przechowywania informacji na temat procesu najczęściej używa się zapisu poszczególnych stanów produktu. Służą do tego systemy towarzyszące większości systemów wspomagających obliczenia inżynierskie, mające za zadanie przechowywać, archiwizować modele konstrukcji opisane na poziomie projektowania szczegółowego. Większość używanego, w trakcie prac projektowych, oprogramowania posiada swoje własne formy zapisu stanu produktu. Zatem generalnie problem integracji prowadzi do integracji wielu różnych form zapisu modelu produktu. Ponieważ modele produktu zapisuje się w bazach danych dlatego bazy danych stały się ważnym ogniwem w integracji. Pierwotnie bazy danych były przeznaczone przede wszystkim do składowania i uzyskiwania informacji. Informacja zapisana w bazie mogła podlegać modyfikacjom. Integralnie z bazami danych związane były systemy ich zarządzania. Obecnie cel stosowania baz danych poza przechowywaniem informacji uległ poszerzeniu o zapewnienie możliwości komunikowania się różnych rodzajów oprogramowania na drodze korzystania ze wspólnej bazy. W literaturze i w realnych zastosowaniach pojawiło się bardzo dużo szczegółowych koncepcji mających na celu uwzględnienie całej złożoności tego procesu. Na ogół za pierwotny, decydujący przy

tworzeniu architektury systemu, przyjmowano realny bądź oczekiwany obieg informacji. Można zaobserwować stosunkowo duży wysiłek zmierzający do wyartykułowania charakterystyk baz, które mają być przeznaczone do zadań projektowych. Wymienia się tutaj: zapewnienie możliwości zapisu inżynierskich typów danych, operowanie wersjami danych, sprawdzanie zasad dostępu przy wprowadzaniu i pobieraniu informacji, języki zapytań typowe dla zastosowań inżynierskich. W wielu opracowaniach [1, 3, 4, 9] można znaleźć postulaty określające jakie cechy powinny mieć narzędzia służące do modelowania procesów projektowych. Wymieniane są następujące cechy:

- opisywanie procesu na różnych poziomach abstrakcji,
- zapewnienie możliwości dekomponowania opisu,
- zapewnienie możliwości zapisu historii zmian, zależności między wersjami,
- precyzyjne określenie zasobów komputerowych niezbędnych do przechowywania informacji,
- zapewnienie możliwości opisu przepływu informacji,
- zapewnienie możliwości opisu produktu,
- zapewnienie możliwości opisu relacji między danymi,
- zapewnienie możliwości pracy z wieloma modelami produktu jednocześnie,
- zapewnienie możliwości pracy przy wielu różnych reprezentacjach tego samego produktu.

Już od początku lat 70. podejmowane były próby opracowania standardów w zakresie opisu modelu produktu [1, 3, 4, 9]. Zasadniczym celem stosowania standardów w zakresie opisu modelu produktu jest zapewnienie możliwości wymiany informacji pomiędzy różnymi systemami. Uzyskane rozwiązania ciągle pozostają na poziomie opisu z etapu projektowania szczegółowego.

Obecnie wyraźnie dostrzegany jest problem zapisu informacji, która jest wiedzą na określone tematy projektowe [1, 7, 9, 11]. Wiedza ta może dotyczyć tego co już zaprojektowano. Jest to pewnego rodzaju uzasadnienie dla podjętych decyzji. Może to być również wiedza, która stanowi wytyczne na przyszłość. W związku z powyższym narzędzia komputerowe wspomagające procesy projektowania rozwijają się w kierunku wykorzystywania elementów opartych na przetwarzaniu wiedzy. Konsekwencją tego jest potrzeba integrowania oprogramowania algorytmicznego z oprogramowa-

niem opartym na metodach sztucznej inteligencji. Praktycznie oznacza to, że oprogramowanie inżynierskie używane w projektowaniu nie powinno być integrowane "na sztywno". Powinno być zapewniona możliwość szybkiego kreowania nowych połączeń tak jak to wynika z rozwoju (bardzo szybkiego) wiedzy projektowej. W związku z powyższym w oprogramowaniu do integracji można zaobserwować dwie jego grupy oparte na różnych przesłankach. W pierwszym przypadku cała procedura stanowi próbę imitacji aktualnego, sformalizowanego obiegu informacji [1, 3]. Jest to podejście oparte na bazach danych. Wprowadza się bardzo sformalizowany system obiegu informacji, zasad dostępu, zatwierdzania, przechowywania. Tej koncepcji przyświeca dążenie do wprowadzenia porządku, do wdrożenia pewnych formalnych procedur. W drugim przypadku struktura jest bardziej otwarta, mająca zapewnić możliwość kreatywności, często stosuje się tutaj architekturę tablicową [7, 9, 11] lub architekturę będącą efektem ewolucji architektury tablicowej. Już wiele lat temu w szeregu pracach mających charakter naukowy architektura tablicowa była używana jako narzędzie do integracji oprogramowania [11]. Zasadniczą koncepcją architektury tablicowej najczęściej wyjaśnia się za pomocą bardzo przejrzystej metafory [9, 11]. Zakładamy, że w klasie zasiada grupa ludzi-ekspertów, których zadaniem jest rozwiązanie określonego problemu. W klasie znajduje się tablica. Ekspersi są specjalistami z różnych dziedzin. Problem w swej początkowej postaci zostaje zapisany na tablicy. Ekspersi obserwują tablicę, widzą widoczne na niej informacje. Każdy z ekspertów jeżeli uzna, że może wnieść swój udział w rozwiązanie problemu może zapisać swoje propozycje na tablicy. To co nowego pojawia się na tablicy staje się dostępne dla innych ekspertów. Cała procedura zostaje zakończona w momencie rozwiązania problemu. Może się zdarzyć, że wielu ekspertów, jednocześnie, pragnie zapisać swoje koncepcje. Potrzebny staje się wówczas nowy uczestnik, moderator całego procesu, mający decydujący głos przy przyznawaniu ekspertom prawa do prezentacji swoich koncepcji. Podstawowym elementem wchodzącym w skład architektury tablicowej jest globalna baza danych. W powyższym przykładzie jej rolę pełni tablica. Kolejne elementy całości to źródła wiedzy i mechanizm sterujący. Pojedynczy eksperci w przykładzie to źródła wiedzy, moderator to mechanizm sterujący. Globalna baza danych może zawierać pewne podstruktury, których zadaniem jest ułatwienie prowadzenia przeszukiwań. Glo-

balna baza danych jest widoczna i dostępna dla wszystkich źródeł wiedzy. Składowane są w niej dane i hipotezy. Koncepcja zbioru źródeł wiedzy oddaje całą uwzględnianą wiedzę dotyczącą rozwiązywanego problemu. Źródła wiedzy mogą korzystać z informacji dostępnej w bazie, mogą również tworzyć i modyfikować jej zawartość. Na ogół źródła wiedzy mogą być aktywowane po spełnieniu określonych warunków. Mechanizm sterujący może decydować o wyborze strategii rozwiązania problemu. Źródłami wiedzy mogą być systemy oparte na wiedzy. Mogą to być również moduły oparte na różnych koncepcjach mieszanych: algorytmicznych i deklaratywnych. Tablica, w zasadzie, pełni funkcje przestrzeni roboczej dla modułów rozwiązujących problem. Źródła wiedzy mogą być aktywowane przez obiekty na tablicy, czy też związane z nimi zdarzenia. Aktywacja źródeł wiedzy nie następuje natychmiast, na ogół źródła wiedzy zgłaszające gotowość akcji przesyłają stosowną informację, która z kolei jest zapisana w agendzie. Odpowiedni mechanizm sterujący decyduje o kolejności uruchamiania określonych źródeł wiedzy. Źródła wiedzy mogą być dołączane i odłączane. Źródła wiedzy mogą być uruchamiane w kolejności wynikającej z procesu przetwarzania. Całością powinien sterować projektant czy projektanci. Jeżeli pojawi się nowy pomysł integracji problemów - aplikacji - źródeł wiedzy powinna być zapewniona możliwość szybkiej realizacji tego zadania - praktycznie szybkiego wykonania eksperymentu. Mogą to być np. zadania połączenia modeli geometrycznych z natychmiastowym kosztorysowaniem, z natychmiastową analizą za pomocą metody elementów skończonych, z kilkoma programami symulacyjnymi. Oczywiście głównym architektem tej integracji musi być projektant odpowiedzialny za projekt. Powinien on odpowiednio modelować tę integrację. Klasyczne oprogramowanie architektury tablicowej było dosyć złożone, wymagało udziału specjalistów, którzy wspomagali szybkie tworzenie takich modeli. Producenci oprogramowania zwrócili uwagę na konieczność stosowania ogólnie zrozumiałych metafor. Proces integracji oprogramowania inżynierskiego z tablicą musi być jasny i zrozumiały. Można obecnie zaobserwować, że w szeregu przypadkach realnych komercyjnych [2, 5, 6, 8] aplikacji rolę tablicy przejął arkusz kalkulacyjny, a łączenie następuje poprzez przeciąganie odpowiednich komórek. Tworzone są natychmiastowe połączenia i istnieje możliwość uruchamiania zintegrowanych w danym momencie aplikacji. Niektóre z podejść proponują równoczesne stoso-

wanie technologii internetowych [10]. W pracy przedstawiono zasadnicze koncepcje stosowane w integracji systemów komputerowych wspomagających proces projektowania. Wskazano na dwutorowość stosowanych podejść: 1) podejście oparte na dążeniu do sprawnego zarządzania, 2) podejście oparte na umożliwieniu szybkiej, potrzebnej w danej chwili, integracji będącej warunkiem kreatywności. Żadne z tych podejść nie jest dominujące. Pierwsze przypomina spojrzenie sprawnego sekretarza zaprowadzającego porządek w dokumentowaniu procesu projektowego, drugie to jakby działania sprawnego asystenta, który może nas sprawnie wspomagać w testowaniu nowych pomysłów. Oba te aspekty występują równocześnie w każdej działalności projektowej.

Jerzy Pokojski
*Instytut Podstaw Budowy
Maszyn Politechnika
Warszawska*

Literatura

1. Advances in Concurrent Engineering CE2002, Balkema 2002.
2. Braun R.D.: NASA's Intelligent Synthesis Environment Program. Integrated Enterprise. Vol.2, No.1 Winter, strony 2-6, 2001.
3. Chadha B., Jazbutis G., Wang Ch., Fulton R.: An Appraisal of Modeling Tools and Methodologies for Integrated Manufacturing Information Systems. Engineering Database: An Engineering Resource ASME 1991, pp. 55-63.
4. Lindemann U., Birkhofer H., Meerkamm H., Vajna S.(eds.): Proceedings of the 12th International Conference on Engineering Design. Tu Munchen, 1999.
5. Macias M., de Souza M.: Integrated Analysis Architecture. Integrated Enterprise. Vol.2, No.1 Winter, strony 11-18, 2001.
6. Malone B.: Building Automated Processes Using ModelCenter. Integrated Enterprise. Vol.2, No.1 Winter, strony 25-27, 2001.
7. Pokojski J.: Blackboard Integration of Design Tools.. Computer Integrated Manufacturing, Proceedings of Int. Conf. CIM 99, Zakopane 9-12.03.1999, WNT, Warsaw, pp. 112-120, 1999.
8. Oculus. Materiały firmowe: www.oculustech.com.
9. Pokojski J. (praca zbiorowa): Inteligentne Wspomaganie Procesu Integracji Środowiska do Komputerowo Wspomaganej Projektowania Maszyn; WNT; Warszawa; 2000.
10. Sobolewski M.: Federated P2p services in CE environments. Advances in Concurrent Engineering CE2002, Balkema 2002, pp.13-22.
11. Sriram D., Logcher R., Groleau N., Chereff J.: DICE: An Object -Oriented Programming Environment for Cooperative Engineering Design. Artificial Intelligence in Engineering Design. Vol. 3. Academic Press, pp. 303-366, 1992.