

Przemysław ZAWADZKI¹

AUTOMATYZACJA PROJEKTOWANIA WYROBÓW WARIANTOWYCH Z ZASTOSOWANIEM TECHNIK OPARTYCH NA WIEDZY

Praca opisuje przykład zastosowania technik z zakresu KBE w budowie autorskiego systemu projektowego opartego na wiedzy. Przedstawiono proces budowy i składowe nowego rozwiązania systemu automatycznego projektowania wyrobów wariantowych - miedzianych złączek wytwarzanych technologią kucia matrycowego. Opisano schemat i zasadę działania systemu skonfigurowanego w strukturze sieciowej oraz przedstawiono wnioski z prac wdrożeniowych.

1. WPROWADZENIE

Potrzeba szybkiego zaspakajania wymagań swoich klientów już od lat stanowi naturalny kierunek rozwoju przedsiębiorstw produkcyjnych. Te firmy, które inwestują w nowe technologie i potrafią wykorzystywać płynący z nich potencjał, budują jednocześnie znaczącą przewagę konkurencyjną. Dotyczy to nie tylko masowej produkcji, ale również realizacji indywidualnych, często zmieniających się potrzeb klienta [1],[2],[3]. Mowa tu o kustomizacji wyrobów [4], co przekłada się najczęściej na niemalże nieograniczoną liczbę możliwych wariantów. Dla przedsiębiorstwa jest to duże wyzwanie, gdyż klient nie zawsze jest gotów zapłacić za to więcej niż zwykle. Istotne staje się zatem nie tylko zwiększenie zdolności produkcyjnych, ale przede wszystkim zachowanie, a nawet obniżanie aktualnych kosztów produkcji [5].

Jednym ze sposobów realizacji tak postawionych celów jest modyfikacja klasycznego procesu projektowania, gdzie nowy wariant wyrobu buduje się zupełnie od podstaw. W przypadku wyrobów wariantowych, czyli konfigurowalnych, proces ten można znacząco przyspieszyć, ze względu na duże podobieństwo stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych. Wsparcie prac inżynierskich powinno polegać na automatyzacji rutynowych zadań oraz pomocy przy podejmowaniu decyzji na podstawie wcześniejszych doświadczeń. Można to osiągnąć poprzez budowę nowych aplikacji, pozwalających na

¹ Katedra Zarządzania i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej,
E-mail: przemyslaw.zawadzki@put.poznan.pl

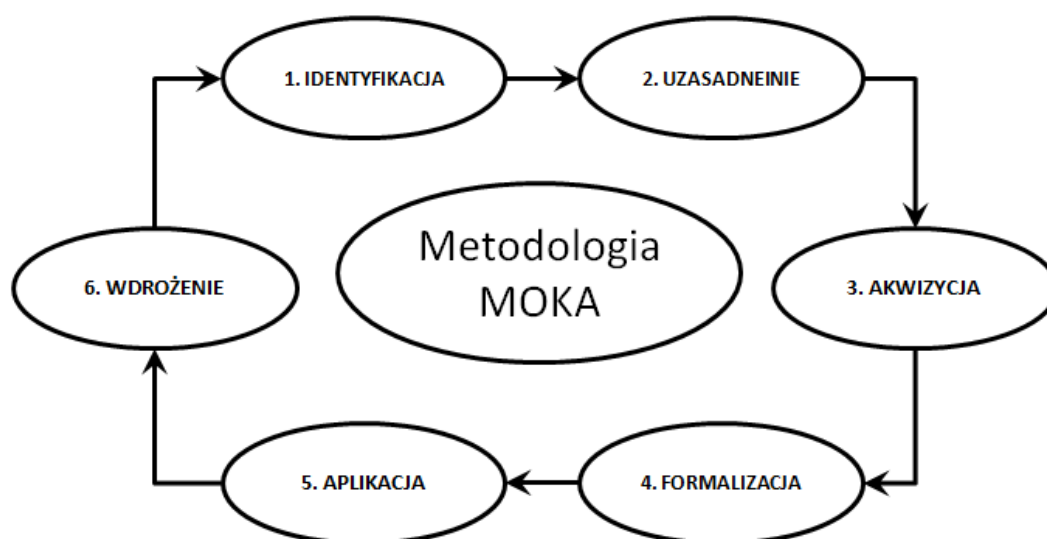
odpowiedni zapis i implementację już zgromadzonej wiedzy o projektowaniu, procesach wytwórczych, a także ich możliwościach i ograniczeniach. [6]

Zagadnienia związane z produkcją wyrobów wariantowych są szeroko poruszane w obszarach związanych z: elastycznymi systemami wytwarzania FMS (*Flexible Manufacturing System*), przepływem danych w procesach produkcyjnych, budową struktur i specyfikacji materiałowych BOM (*Bill Of Materials*), czy nawet w zakresie internetowych rozwiązań typu B2B (*Business to Business*) [3]. W niniejszej pracy skupiono się głównie na zagadnieniach związanych z etapem projektowania (CAD/CAM) i implementacją technik KBE (*Knowledge Based Engineering*) w budowie systemu automatyzującego proces projektowania miedzianych złączek. Pokazano autorskie podejście do tematu, opisując jednocześnie możliwości rozwoju dedykowanych rozwiązań tego typu.

2. KBE - PROJEKTOWANIE OPARTE NA WIEDZY

KBE jest to zbiór metod i narzędzi, pozwalających na pozyskiwanie i zapis wiedzy o procesach projektowo - konstrukcyjnych [7]. Celem stosowania KBE jest przede wszystkim skracanie czasu i obniżanie kosztów rozwoju nowych produktów poprzez zastosowanie wiedzy. Ta bowiem, w procesie konstrukcyjnym stanowi podstawę wszelkich działań i podejmowanych decyzji, pozwalających osiągnąć zamierzony cel.

W pracach naukowych wiele uwagi poświęca się strukturalizowanym formom reprezentacji wiedzy, które doprowadziły do powstania metodologii opracowywania systemów opartych na KBE [8]. Obecnie najszerzej stosowana to metodologia MOKA (*Methodology and Tolls Oriented to Knowledge-Based Engineering Applications*), która opisuje proces budowy systemu KBE i wskazuje jego najważniejsze fazy (rys. 1).



Rys. 1. Cykl życia systemu KBE wg metodologii MOKA [4]
Fig. 1. Lifecycle of KBE system according to MOKA methodology [4]

Metodologia MOKA, będąca wynikiem prac projektowych interdyscyplinarnych zespołów naukowych oraz przedstawicieli przemysłu lotniczego i motoryzacyjnego została przygotowana do realizacji następujących celów głównych [9]:

- redukcji ryzyka czasu i kosztów rozwoju aplikacji KBE o 20-25%,
- zapewnienia rozwoju i utrzymania aplikacji KBE,
- opracowania narzędzi wspomagających stosowanie metody,
- wprowadzenie międzynarodowego standardu w KBE.

W budowie systemu opartego o KBE wg MOKA na początku zawsze należy rozpoznać źródła wiedzy, narzędzia i techniki jej aktywizacji oraz metody reprezentacji. Etapy związane z identyfikacją oraz uzasadnieniem dotyczą organizacyjno-ekonomicznej strony budowy systemu KBE [8],[9]. Fazy akwizycji, formalizacji i aplikacji dotyczą głównie sposobów konwertowania i zapisu wiedzy na język zrozumiały dla aplikacji komputerowej [7],[8]. Ostatnią fazą budowy systemu jest wdrożenie, przekładające się na instalację aplikacji, jej użytkowanie i ocenę.

Analiza literatury wskazuje, iż najczęściej implementacja technik KBE przekłada się na stosowanie specjalnych narzędzi na poziomie pracy z programem CAD. Dzisiejsze systemy CAx zapewniają wsparcie konstruktorom, którzy w swojej pracy chcą i dążą do zapisu reguł i zależności w taki sposób, aby można było tę wiedzę później ponownie stosować [10].

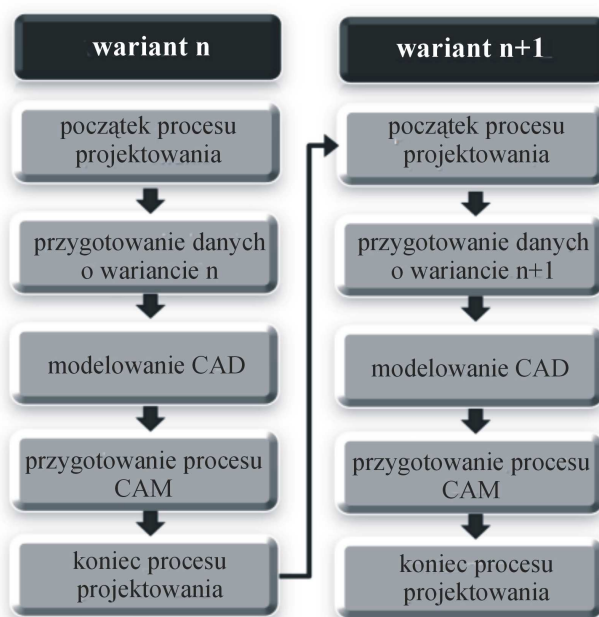
Forma modelowania CAD w oparciu o KBE przekłada się zatem na budowę specjalnego, konfigurowalnego modelu "matki" [11],[12] zwanego częściej modelem autogenerującym lub modelem zintegrowanym [5]. Takie rozwiązanie, opracowane w konkretnym programie CAx, można już uznawać za system KBE. W niniejszej pracy przedstawiono podejście bazujące na narzędziach dostępnych w systemie Catia V5, które rozszerzone o architekturę sieciową pozwoliły na budowę systemu automatycznego projektowania, nie tylko wariantu wyrobu, ale także technologii.

3. SYSTEM PROJEKTOWANIA WYROBÓW WARIANTOWYCH

Prace nad projektem systemu prowadzono wspólnie z partnerem przemysłowym - firmą IBP Instal fittings Sp. z o.o. Spośród szeregu oferowanych produktów wytypowano grupę złączy miedzianych, wytwarzaną w technologii kucia matrycowego na gorąco. Wszystkie matryce wykonywane są przez frezowanie CNC. Paleta oferowanych wariantów wyrobów, ze względu na różne elementy geometryczne oraz wymiary sięga niemal kilku tysięcy. Ponadto, często pojawiające się zapytania dotyczące możliwości oraz kosztów wykonania serii złączy o niestandardowych parametrach, np. nietypowej grubości ścianek, sprawiły, że producent armatury szukał nowych rozwiązań projektowych, pozwalających szybciej reagować na pytania swoich klientów. Najlepszym sposobem na zaspokojenie tych potrzeb okazała się inwestycja w elastyczny system projektowania oparty na wiedzy.

Celem budowy nowego systemu była automatyzacja zadań związanych z przygotowaniem modeli 3D nowego wyrobu oraz narzędzi produkcyjnych, potrzebnych do jego produkcji, a więc matryc, trzpieni, wykrojnika i stempla. System miał realizować

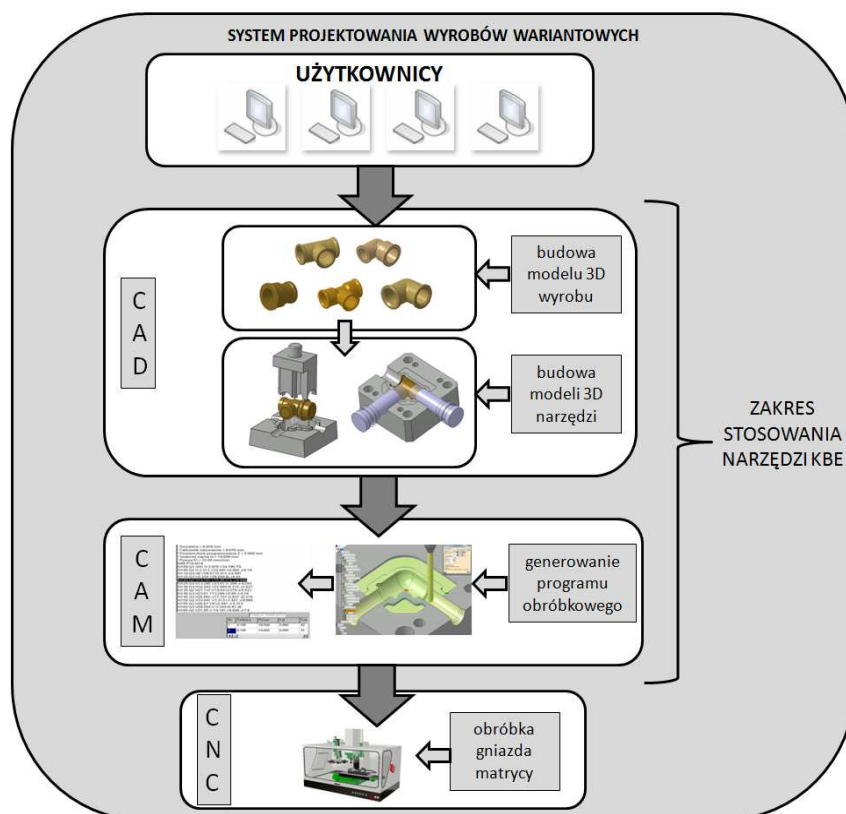
także zadania związane z przygotowaniem programu CNC do obróbki matryc. Standardowo na projektowanie CAD zestawu modeli 3D konstruktor musiał przeznaczać od kilku do nawet kilkudziesięciu godzin. Jeżeli projekt trafiał do produkcji to kolejne kilkanaście godzin należało poświęcić na pracę w programie CAM. W modelowaniu wariantów pochodnych rzadko korzystano z wcześniej przygotowanych modeli, ponieważ w praktyce wprowadzanie modyfikacji w geometrii wyrobu generowało zbyt wiele błędów. W związku z tym najczęściej projektowanie nowego wariantu zaczynało po zakończeniu prac nad poprzednim (rys. 2).



Rys. 2. Uproszczony schemat standardowego procesu projektowania wyrobów wariantowych
Fig. 2. Simplified scheme of a standard process of variant products design

Rozproszona charakterystyka pracy nad projektem nowego wariantu wyrobu stała się powodem do próby wprowadzenia standaryzacji tego procesu i ujednolicenia praktyk stosowanych w przedsiębiorstwie poprzez budowę systemu KBE (rys. 3). Często w prace nad jednym zleceniem zaangażowanych jest jednocześnie kilka osób: konstruktor, technolog, a nierzadko również inżynierowie jednostek składających zamówienie. Dlatego jednym z celów budowy nowego systemu stało się także przygotowanie odpowiedniego interfejsu wymiany danych pozwalających na wspólną pracę wielu osób.

Dzięki zastosowaniu konfiguracji sieciowej i zdalnemu połączeniu z bazą wiedzy programu CAx (Catia V5), nowy system można klasyfikować również w kategoriach rozwiązań B2B. Od strony zarządzania danymi o projekcie duży nacisk położono na przepływ danych, począwszy od definiowania parametrów, przez weryfikację geometryczną wariantu aż po przygotowanie programu CNC do frezowania matrycy. Sieciowa struktura systemu miała zapewnić zwiększenie wydajności dostępnego sprzętu komputerowego, poprzez możliwość planowania i uruchamiania procesu generowania ścieżki narzędzia w godzinach nocnych.



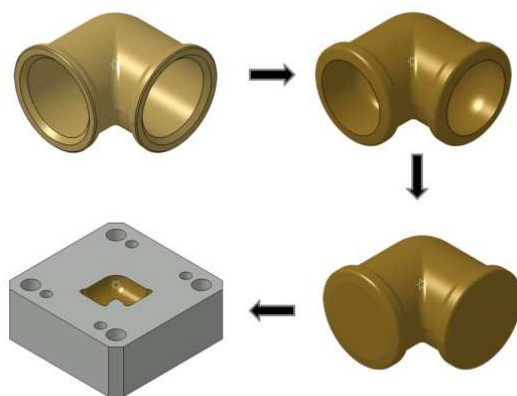
Rys. 3. Schemat nowego systemu projektowania wyrobów wariantowych
 Fig. 3. Scheme of a new system for design of variant products

3.1. FORMALIZACJA WIEDZY - BUDOWA MODELI AUTOGENERUJĄCYCH CAD

Przygotowanie danych potrzebnych do opisu procesu budowy modeli CAD wymagało przeprowadzenia analiz wszystkich metod oraz narzędzi stosowanych przez konstruktorów. Modelowanie 3D zawsze zaczyna się od przygotowania modelu wyrobu, uwzględniającego charakterystyczną dla danego wariantu geometrię, m.in. elementy "pod klucz", specjalne kołnierze czy gwinty. Na jego podstawie budowany jest następnie model odkuwki, uwzględniający takie parametry jak pochylenia technologiczne czy skurcz materiału. Dalej, model odkuwki stanowi podstawę przy kształtowaniu gniazda matrycy (rys. 4), trzpieni, krawędzi tnących wykrojnika i powierzchni roboczej stempla okrojnika. Budowa modułu CAD od podstaw wymagała ujednolicenia stosowanych narzędzi. Badania wykazały, iż różni inżynierowie osiągalili te same efekty w różny sposób. Analiza procesu pozwoliła zatem na stworzenie wytycznych do standaryzacji procesu budowy, który zaimplementowany został w programie Catia V5. W wyniku analizy określono podział elementów tworzących wyrób i cech konstrukcyjnych, a następnie przypisano je do 3 różnych kategorii:

- elementy pierwszorzędowe - znormalizowane,
- elementy drugorzędowe,
- elementy trzeciorzędowe.

W złączkach sanitarnych występuje wiele elementów znormalizowanych, służących do łączenia z innym wyrobem (połączenia gwintowe, wciskane czy lutowane). W większości przypadków w takich połączeniach normalizacji podlegają średnice montażowe, a w niektórych również długości elementów wchodzących w skład połączenia. Unifikacji poddano tutaj też drugorzędowe cechy konstrukcyjne (nieznormalizowane długości i średnice), nie biorące bezpośrednio udziału w połączeniu z drugim elementem. Do trzeciorzędowych cech zaliczono elementy typu zaokrąglenia i fazowania krawędzi oraz niektóre stożkowe przejścia pomiędzy średnicami. We wszystkich przypadkach definicja tych cech odbyła się na podstawie wcześniej realizowanych projektów. Każdy z nich został poddany analizie, aby wskazać kiedy modyfikacja parametrów zależna jest od wytycznych projektu, a kiedy zmiany podyktowane są wymogami procesu wytwarzania. Pozwoliło to opisać wytyczne do budowy modeli autogenerujących.



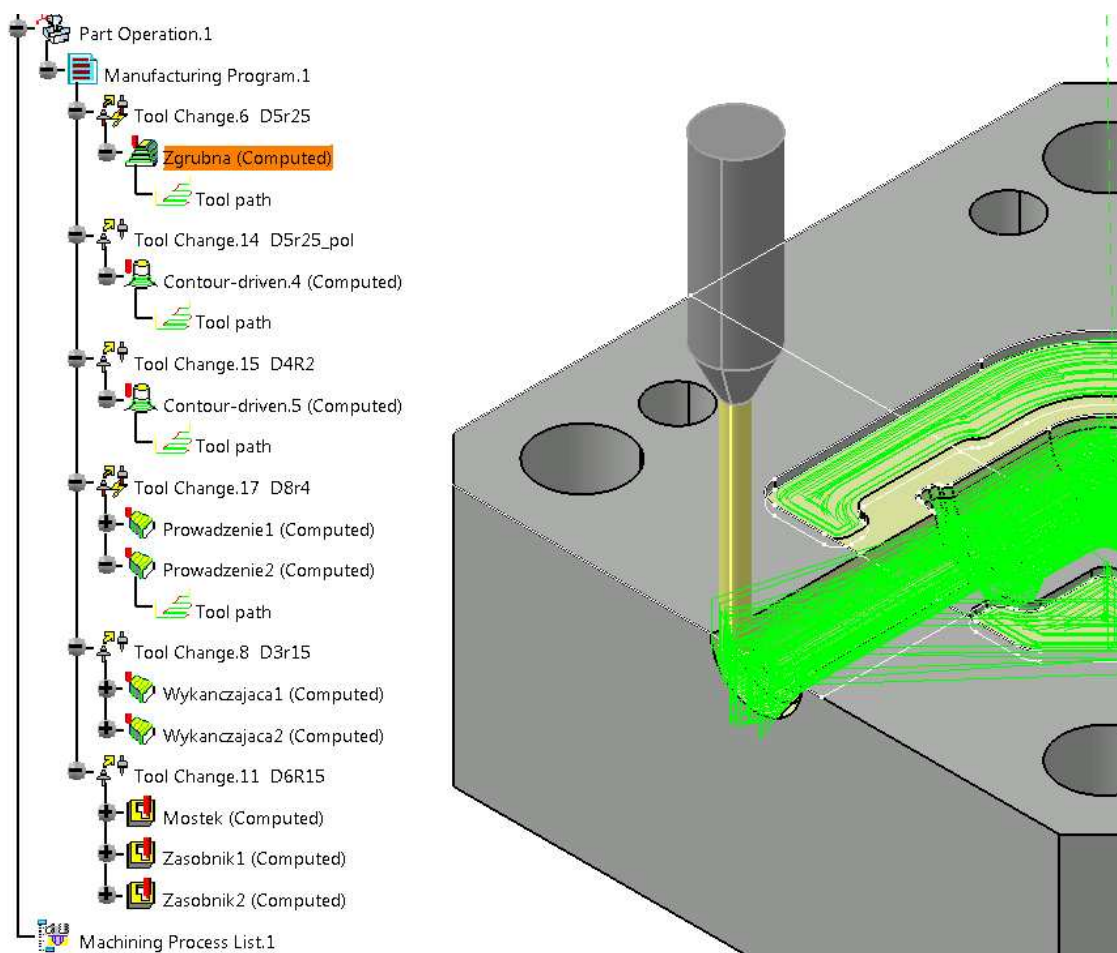
Rys. 4. Schemat budowy modelu odkuwki i gniazda matrycy
Fig. 4. Scheme of construction of model of the forging and the die cavity

Prace nad automatyzacją projektowania łączników polegały na zbudowaniu bazowego, "inteligentnego" modelu 3D, który pozwala elastycznie dostosowywać się do wprowadzanych przez konstruktora zmian. Geometryczna struktura modelu 3D musi w takim przypadku zawierać wszystkie potrzebne rodzaje operacji CAD, a zapis relacji występujących pomiędzy cechami konstrukcyjnymi musi umożliwiać logiczny przebieg budowy nowego wariantu. Zależności te opisano przy użyciu języka VB. W budowie jednego zestawu modeli autogenerujących zapisano kilkaset relacji i zależności. Parametry i ich wartości opisujące wyrób zostały umieszczone w specjalnych tabelach projektowych.

3.2. FORMALIZACJA WIEDZY - SZABLONY OBRÓBKOWE CAM

Technologię wytwarzania matryc, podobnie jak konstrukcję wyrobu, poddano analizie w celu określenia możliwości unifikacji i automatyzacji tego procesu. Uwzględniono szereg przypadków geometryczno-wymiarowych matryc, na podstawie których wytypowano charakterystyczne parametry. Przeanalizowano także większość procesów

technologicznych. Prace wykazały, iż równocześnie funkcjonowało kilka wariantów obróbki matryc o podobnych kształtach. W celu standaryzacji opracowano wytyczne do budowy schematów obróbkowych, czyli zbioru wszystkich możliwych zabiegów potrzebnych do obróbki matryc. System rozpoznaje jakie elementy geometryczne matrycy występują w danym wariantcie i dobiera do nich odpowiednią obróbkę, pomijając pozostałe.



Rys. 5. Panel "Manufacturing Program" i podgląd symulacji zabiegu
Fig. 5. "Manufacturing Program" panel and simulation preview

Zapis relacji pomiędzy parametrami technologicznymi a konstrukcyjnymi został wykonany analogicznie do wcześniejszego etapu prac. Skatalogowane zostały również parametry samego procesu, do których dostęp nie został zablokowany i które z poziomu tabel projektowych mogą być łatwo modyfikowane.

Za automatyczne przypisywanie odpowiednich funkcji do konkretnych powierzchni, na poziomie narzędzi CAM, odpowiedzialne są specjalne makropolecenia. Automatyzują one budowę konkretnego procesu technologicznego, odwołując się do poszczególnych zabiegów poprzez ich unikalne nazwy. Opracowano także wytyczne grupowania poszczególnych zabiegów w tzw. „Manufacturing Program”(rys. 5.). Takie pogrupowanie pozwoliło w automatyczny sposób generować kody NC na obrabiarki numeryczne.

3.3. STRUKTURA NOWEGO SYSTEMU I INTERFEJS UŻYTKOWNIKA

Sieciowa struktura systemu do projektowania wymagała przygotowania specjalnego interfejsu (rys. 6.). Został on napisany w języku PHP, umożliwiając obsługę wielu użytkowników w tym samym czasie. To podejście obrazuje podstawowe zalety rozwiązań typu B2B, gdzie klient i producent korzystają z jednej platformy wymiany danych. Projektowanie nowego wariantu złączki polega na wstępnym wyborze charakterystycznego kształtu, który następnie opisuje się poprzez definicję wartości poszczególnych parametrów (wymiarowe, geometryczne). Po zatwierdzeniu danych o nowym wyrobie przesyłane są one zdalnie do aplikacji CAD/CAM, gdzie zestaw makropoleceń automatycznie uruchamia proces budowy modeli 3D. Modelowanie wykonywane jest zgodnie z zapisaną w modelu autogenerującą wiedzą inżynierską. Po jego zakończeniu użytkownicy mają możliwość weryfikacji prac poprzez dostęp do interaktywnego podglądu modeli 3D. Jeżeli projekt wymaga poprawek, można wrócić do etapu definicji parametrów i ponownie uruchomić proces modelowania. Następnie, użytkownicy posiadający odpowiednie uprawnienia mogą uruchomić zlecenie przygotowania programu obróbkowego dla matrycy nowego wariantu.

W ramach prac nad systemem przygotowano również aplikację działającą po stronie serwera, która odpowiedzialna jest za przepływ danych i zdalną obsługę programu CAD/CAM. Tutaj zawarto też logikę obsługującą obliczenia procesów obróbkowych wraz z ich kolejkowaniem.



Rys. 6. Widok interfejsu użytkownika systemu automatycznego projektowania
Fig. 6. User interface of the automatic design system

W przypadku kilku zleconych procesów program w pierwszej kolejności wykonuje obliczenia o wyższym priorytecie. O hierarchii projektów i uprawnieniach użytkowników decyduje administrator systemu. Wygenerowany program obróbkowy jest zapisywany pod unikalną nazwą w katalogu danego projektu i po weryfikacji może być przekazany na maszynę CNC.

4. WNIOSKI

Automatyzacja procesu projektowania niesie za sobą wiele korzyści. Oprócz oczywistego skrócenia czasu przygotowania nowego wariantu wyrobu, które najłatwiej przełożyć jest na oszczędności, istotny z punktu widzenia przedsiębiorstwa jest nakład pracy zainwestowany we wnikliwą analizę i zapis wiedzy o projektowaniu. Standaryzacja oraz uporządkowanie wiedzy i najlepszych praktyk stosowanych przez lata w produkcji złączek stanowią dziś silny fundament pod przyszłe prace inżynierskie. Wiele informacji na temat procesów modelowania 3D oraz wytwarzania, zapisanych przy budowie tego rozwiązania, osiągnęło w przedsiębiorstwie uniwersalny status, stanowiąc punkt odniesienia do podobnych procesów projektowych.

Porównując standardowy cykl projektowy z nowym, opartym o KBE, czas pracy inżynierów konstruktorów i technologów w systemach CAD/CAM został w znaczący sposób ograniczony. Implementacja systemu KBE przekłada się na korzyści finansowe głównie za sprawą zmniejszenia czasochłonności projektowania i przygotowania technologii oraz zoptymalizowania procesów obróbkowych na maszynach CNC. Czas potrzebny do przygotowania dokumentacji konstrukcyjnej i technologicznej został skrócony o prawie 80%. Takie oszczędności czasowe są wynikiem automatyzacji, a ta z kolei bazuje właśnie na zapisie wiedzy, bez której system byłby bezwartościowy.

Relacje z klientami i szybkość reakcji na ich zapytania stały się w trakcie prac niezwykle istotne. Struktura sieciowa i dostęp dla wielu użytkowników, mogących przygotować dane potrzebne do wyceny kosztów produkcji, pozwoliły w znacznym stopniu skrócić czas potrzebny na przygotowanie oferty dla klienta. Ponadto, dzięki opracowaniu nowego interfejsu, wprowadzanie danych o wyrobach firma może powierzyć pracownikom o niższych kwalifikacjach, a tych z większym doświadczeniem przesunąć do bardziej odpowiedzialnych prac rozwojowych.

Budowa systemu zajęła niespełna rok. Sam proces gromadzenia wiedzy o projektowaniu i wytwarzaniu złączek oraz jej analiza trwały w tym przypadku kilka miesięcy. W prace zaangażowany był zespół specjalistów z Politechniki Poznańskiej oraz doświadczeni inżynierowie, odpowiedzialni w przedsiębiorstwie za wdrażanie nowych projektów elementów kutych. Opisany w niniejszej pracy system charakteryzuje się otwartą architekturą, dzięki czemu wiedza, która przecież nie stanowi zamkniętego zbioru informacji, może być nie tylko modyfikowana, ale także uzupełniana. Niemniej, rozmiar prac, jakie musi wykonać przedsiębiorstwo, potrzebnych do budowy tak rozbudowanego systemu KBE sprawia, że niezbędna staje się analiza efektywności ekonomicznej wdrożenia takiego rozwiązania. Chcąc opisać w ten sposób wszystkie występujące w przedsiębiorstwie procesy produkcyjne należałoby przeznaczyć na ten cel znaczne środki finansowe. Dlatego do budowy opisanego systemu wybrano podstawowy dla przedsiębiorstwa proces produkcyjny, który zajmował pracownikom najwięcej czasu.

Firmy mogą mieć trudności z oceną opłacalności wdrożenia takich rozwiązań przed rozpoczęciem prac, nie tylko ze względu na ograniczenia techniczne, ale również dlatego, że trudno jest przewidywać oczekiwania klientów. Sprawia to, że oprócz oczywistych korzyści wynikających z uporządkowania wiedzy, firmy i tak nie decydują się na takie

inwestycje. Chętnie za to stosują pojedyncze elementy KBE na poziomie CAD, np. w przygotowaniu dokumentacji 2D, czy budowie złożów 3D.

LITERATURA

- [1] MACCARTHY B., BRABAZON P. G., BRAMHAM J., 2003, *Fundamental modes of operation for mass customization*, Int. J. Production Economics, 85, 289-304.
- [2] DA SILVEIRA G., BORENSTEIN D., FOGLIATTO F. S., 2001, *Mass customization: Literature review and research directions*, Int. J. Production Economics, 72, 1-13.
- [3] MLECZKO J., 2011, *Przepływ danych w zarządzaniu operacyjnym wyrobów wariantowych*, Zarządzanie Przedsiębiorstwem, 1, 17-26.
- [4] VERHAGEN W. J.C., BERMELL-GARCIA P., REINIER VAN DIJK E.C., CURRAN R., 2012, *A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges*, Advanced Engineering Informatics 26, 5-15.
- [5] SKARKA W., 2009, *Podstawy budowy modeli autogenerujących*, Wydawnictwo Helion.
- [6] OLDHAM K., KNEEBONE S., CALLOT M., MURTON A., BRIMBLE R., MOKA - A methodology and tools oriented to knowledge-based engineering applications, <http://web1.eng.coventry.ac.uk/moka/Documents/Papers/IiM98.pdf> (04.11.2013).
- [7] ZAWADZKI P., GÓRSKI F., KOWALSKI M., PASZKIEWICZ R., HAMROL A., 2011, *Automatic system for 3d models and technology process design*, FAMENA, 35/2.
- [8] DOSTATNI E., KARWASZ A., DIAKUN J., 2013, *Metoda szacowania kosztów recyklingu wyrobów AGD na etapie projektowania*, Materiały konferencyjne: XVI Konferencja Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Zakopane.
- [9] PLINTA D., WIĘCEK D., 2011, *Szacowanie kosztów wytwarzania elementów maszyn z wykorzystaniem narzędzi wspomagających projektowanie procesów produkcyjnych*, Pomiar Automatyka Robotyka, 2/2011, 156-165.
- [10] ZAWADZKI P., KOWALSKI M., WICHNIAREK R., KLIŃSKI G., 2013, *Automatyzacja procesu projektowania rur giętych w oparciu o parametryczny system CAD*, Materiały konferencyjne CAxInnovation, ITM Poznań, 4-7 czerwca 2013.
- [11] MATUSZEK J., KURCZYK D., 2013, *Tendencje rozwoju w projektowaniu i zarządzaniu procesami produkcji*, Materiały konferencyjne: XVI Konferencja Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Zakopane.
- [12] CALKINS D. E., EGGING N., SCHOLZ C., 2000, *Knowledge-Based Engineering (KBE) design methodology at the undergraduate and graduate levels*, Int. J. Engng Ed., 16/1, 21-38.

AUTOMATIC DESIGN OF VARIANT PRODUCTS WITH APPLICATION OF KNOWLEDGE-BASED TECHNIQUES

The paper presents an example of application of KBE techniques in a knowledge-based design system created by the author. Process of building the system and components of a new solution is presented. The solution is a system for automatic design of variant products - copper tube couplings manufactured by die forging. A scheme and principles of operation of the system configured in a network structure was presented, along with conclusions from work on its practical implementation.