

Otrzymano: 01 marca 2018 / Zaakceptowano: 20 kwietnia 2018 / Zamieszczono na WWW: 20 grudnia 2018

*obrabiarka ciężka, konstruowanie,
optymalizacja, MES, sztuczna inteligencja*

Jan KOSMOL^{1*}

ROLA KATEDRY BUDOWY MASZYN POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ W ROZWOJU OBRABIAREK CIĘŻKICH

W artykule przedstawiono badania prowadzone w ostatnich 25 latach w Katedrze Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej, tj. w okresie, kiedy kierownikiem Katedry był prof. J. Kosmol. Podstawą dla przedstawienia kierunków badawczych były wybrane prace doktorskie i rozprawy habilitacyjne, jakie w tym okresie zostały pomyślnie zrealizowane. Na 15 prac doktorskich, które były wzięte pod uwagę prof. J. Kosmol był promotorem 11, a pozostałych 4 prac, prof. A. Sokołowski. Uwagę skupiono na tych kierunkach badań, które dotyczą konstrukcji, eksploatacji, sterowania i automatyzacji obrabiarek, zwłaszcza ciężkich oraz zastosowania sztucznej inteligencji w wytwarzaniu. Te kierunki badań są w dalszym ciągu aktualne.

1. RYS HISTORYCZNY

Obecna Katedra Budowy Maszyn jest spadkobierczynią Katedry Obrabiarek, która powstała w 1945 r. razem z utworzeniem Politechniki Śląskiej [1]. Jest to więc najstarsza jednostka naukowo-dydaktyczna w Politechnice Śląskiej, która liczy sobie ponad 72 lata. Założycielem i pierwszym kierownikiem Katedry Obrabiarek był prof. dr inż. Michał Affanasowicz, który przybył do Gliwic ze Lwowa. Profesor kierował Katedrą do swojej śmierci, tj. do 1949 r. Pierwszym asystentem Profesora był ówczesny student Tadeusz Tyrlik.

W 1949 r. na stanowisko kierownika Katedry Obrabiarek powołany został docent kontraktowy Mieczysław Pisz, który przyszedł z przemysłu obrabiarkowego. Człowiek o bardzo dużym doświadczeniu w obszarze konstrukcji obrabiarek i o „gołębiim sercu”. Niezwykle życzliwy i uczynny dla otoczenia. Pan doc. M. Pisz kierował Katedrą a później Zespołem Obrabiarek przez 32 lata, tj. aż do swojej śmierci.

W 1981 r. na czele Zespołu Obrabiarek stanął doc. dr inż. Tadeusz Tyrlik, który w 1984 r. został profesorem tytularnym. Kierował On jednostką aż do momentu przejścia na emeryturę, tj. do 1990 r. Następnie na stanowisko kierownika Zakładu Obrabiarek powołany został dr hab. inż. Jan Kosmol.

¹ Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn, Gliwice,

* E-mail: jkosmol@polsl.pl

Katedra Obrabiarek jaka powstała w 1945 r przetrwała w swojej strukturze aż do 1970 r. Wówczas na uczelni nastąpiła generalna zmiana jej struktury, polegająca na utworzeniu dużych jednostek, tj. instytutów. Dotychczasowa Katedra Obrabiarek weszła w skład powstałego Instytutu Budowy Maszyn jako Zespół Obrabiarek. Oprócz tego Zespołu w Instytucie były zespoły Obróbki Skrawaniem, Przeróbki Plastycznej Metali i Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych. Instytut przetrwał aż do 1994 r, kiedy nastąpił jego podział na dwie katedry: Katedrę Budowy Maszy i Katedrę Technologii Maszyn i Zintegrowanych Systemów Zarządzania. W skład Katedry Budowy Maszyn weszły zespoły: Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem, Przeróbki Plastycznej Metali i Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych. Kierownikiem Katedry został dr hab. inż. Jan Kosmol, który w 1995r uzyskał tytuł profesora. Natomiast kierownikiem Katedry Technologii Maszyn i Zintegrowanych Systemów Zarządzania został dr hab. inż. Ryszard Knosala. Katedra Budowy Maszyn w takiej strukturze przetrwała aż do 2000 r, kiedy dwa zespoły, tj. Przeróbki Plastycznej Metali i Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych utworzyły nową katedrę. Od tego momentu Katedra Budowy Maszyn jest jednostką jednozespołową i realizuje procesy dydaktyczne i badania naukowe z obszaru obrabiarek i obróbki skrawaniem.

Prof. J. Kosmol kierował Katedrą Budowy Maszyn aż do osiągnięcia wieku emerytalnego, tj. do 2017 r.

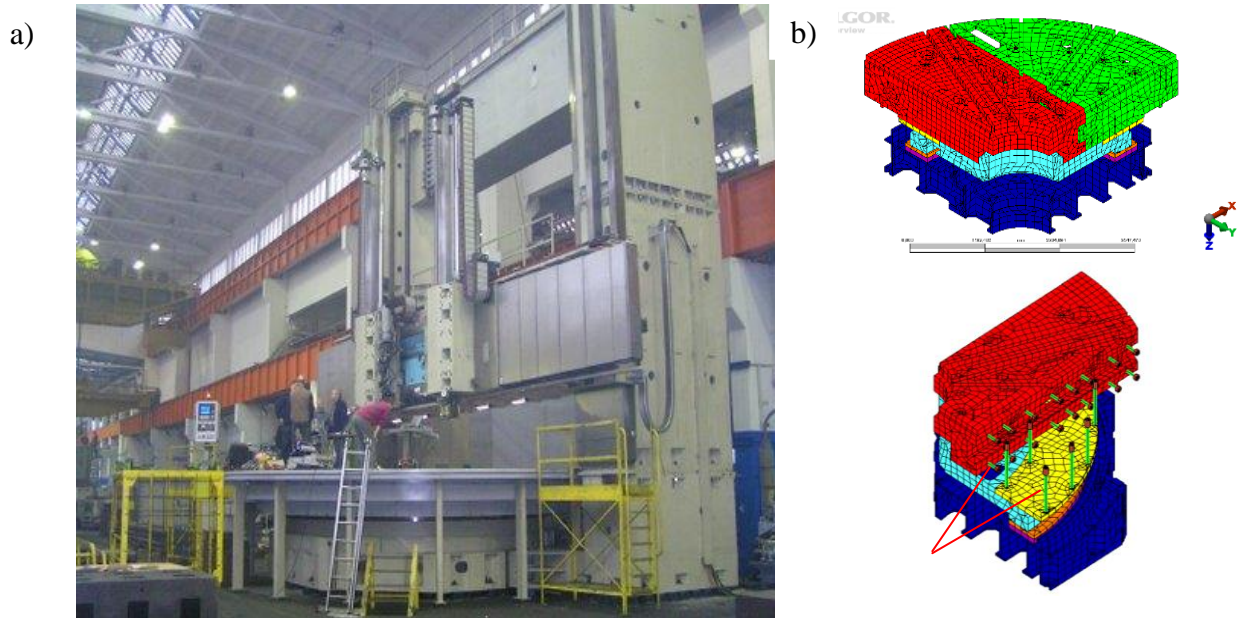
2. BADANIA NAUKOWE W KATEDRZE BUDOWY MASZYN

W dalszych częściach przedstawione zostaną najważniejsze badania naukowe realizowane w Zespole Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem Katedry Budowy Maszyn, a począwszy od 2000 r w Katedrze Budowy Maszyn, czyli w okresie ostatnich 27 lat.

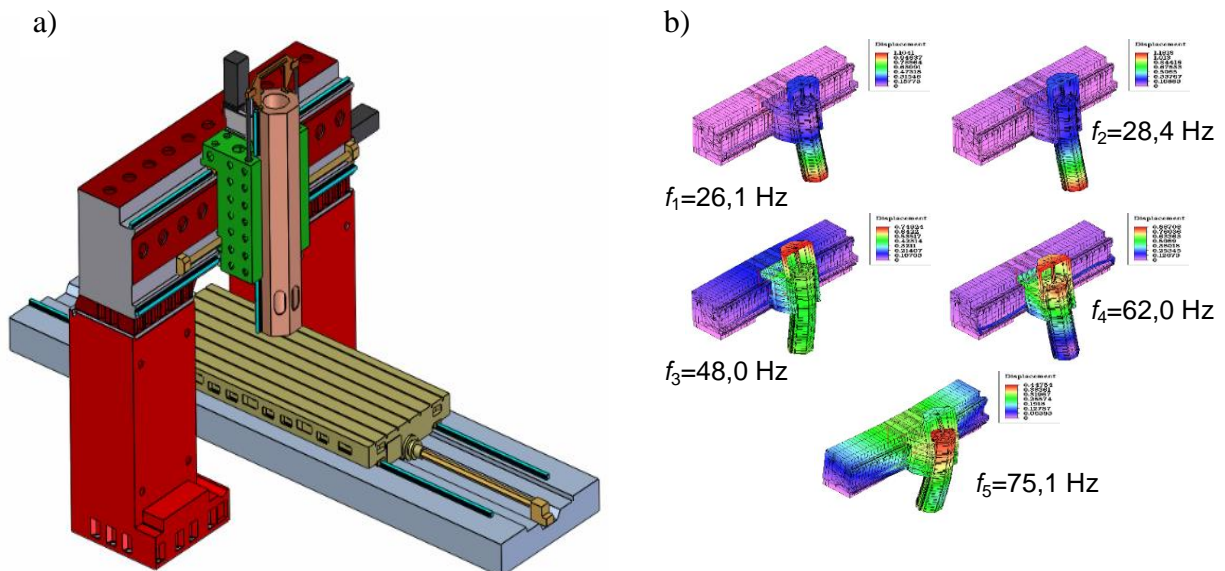
Działalność naukowa i dydaktyczna koncentrowała się od zawsze na obrabiarkach i obróbce skrawaniem, co dobrze przedstawia nazwa specjalności dydaktycznej: Obrabiarki, narzędzia i technologia budowy maszyn. Konstrukcja obrabiarek i ich zespołów oraz narzędzi skrawających, uchwytów i przyrządów były zawsze głównym obszarem naszej działalności. Najlepiej reprezentują to prace naukowo-badawcze w latach 2000–2010, kiedy w ramach tzw. Projektów Celowych KBN (Komitetu Badań Naukowych) Katedra wykonała wspólnie z producentami obrabiarek (głównie z F.O. „RAFAMET” w Kuźni Raciborskiej) 15 projektów. W ich wyniku zostało wdrożonych do produkcji 15 ciężkich obrabiarek różnych typów i odmian, począwszy od dużej tokarki karuzelowej (średnica stołu 7 m), poprzez obrabiarki dla kolejnictwa, tzw. Tokarki kołowe nadtorowe i podtorowe, po frezarkę bramową HSC (High Speed Cutting), oraz obrabiarki specjalne, np. frezarka do wałów korbowych. Na rysunku 1 przedstawiono widok tokarki karuzelowej KDC 700/800CNC oraz przykładowe wyniki analiz przy użyciu metody elementów skończonych. Natomiast na rys. 2 przedstawiono widok CAD frezarki bramowej HSC, przeznaczonej do obróbki szybkościowej oraz przykładowe wyniki analiz metodą elementów skończonych.

Współpraca z przemysłem w ramach projektów celowych okazała się dla Katedry niezwykle owocna. Zaistniała możliwość wzbogacenia Katedry o unikalną aparaturę

badawczą (rys. 3), oprogramowanie komputerowe (Algor, Catia, Solid Edge, Ansys), a przede wszystkim była źródłem inspiracji nowych obszarów badawczych.



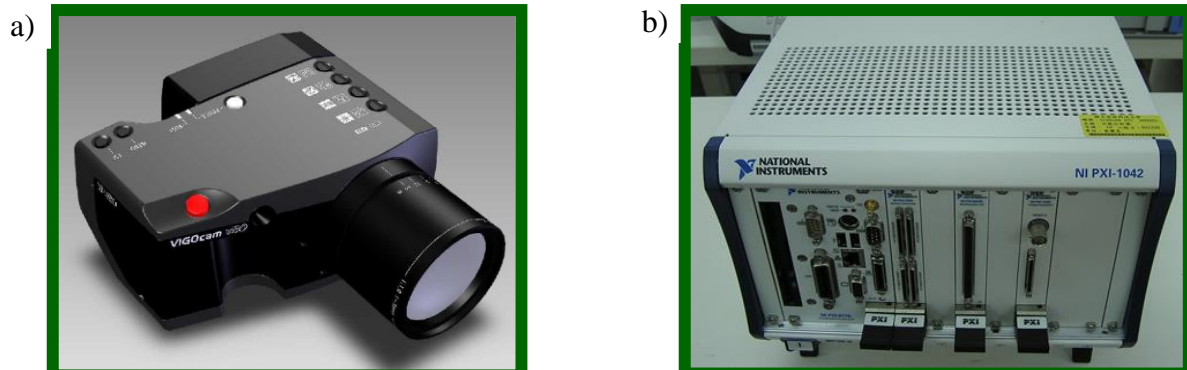
Rys. 1. Widok tokarki karuzelowej KDC 700/800CNC (a) i przykładowe wyniki analizy MES stołu tej tokarki (b)
 Fig. 1. View of KDC 700/800CNC vertical lathe (a) and examples of MES analysis results of the lathe table (b)



Rys. 2. Widok CAD frezarki HSC 180CNC (a) i przykładowe wyniki analiz MES belki suportowej (b)
 Fig. 2. CAD drawing of HSC 180CNC milling machine (a) and examples of MES analysis results of the support beam (b)

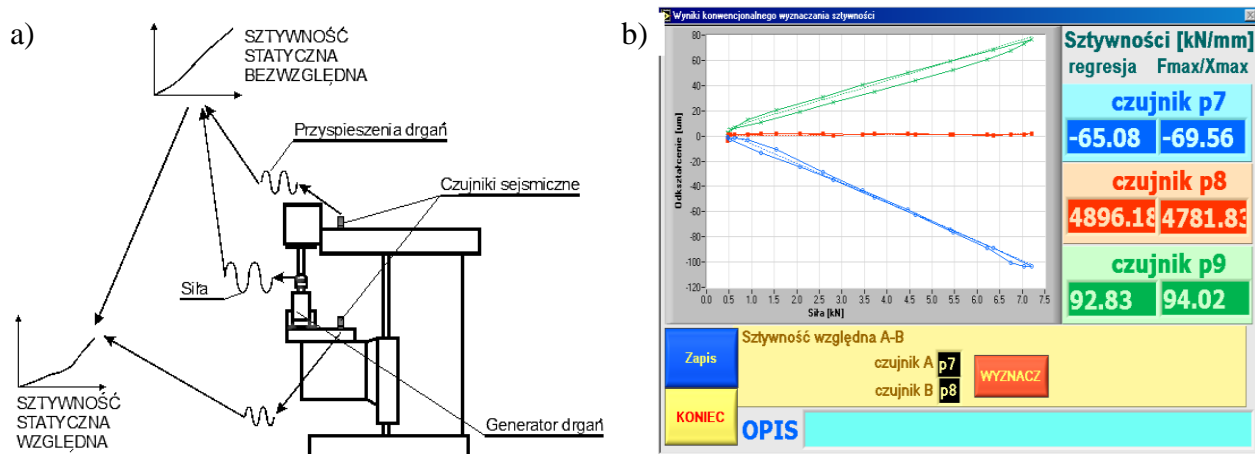
Współpraca z przemysłem w ramach projektów celowych okazała się dla Katedry niezwykle owocna. Zaistniała możliwość wzbogacenia Katedry o unikalną aparaturę

badawczą (rys. 3), oprogramowanie komputerowe (Algor, Catia, Solid Edge, Ansys), a przede wszystkim była źródłem inspiracji nowych obszarów badawczych.



Rys. 3. Aparatura badawcza (kamera termograficzna) (a) i system do badań przemysłowych (b)
Fig. 3. The research equipment (thermographic camera) (a) and system for industrial research (b)

Najlepszym tego przykładem jest metoda badania sztywności statycznej obrabiarek w warunkach przemysłowych o akronimie DWSS (Dynamiczne Wyznaczanie Sztywności Statycznej), rozwijana przez dr. hab. inż. Janusza Śliwkę. Jego praca doktorska [2] a następnie rozprawa habilitacyjna [3] dały podstawy stosowania tej metody. Na rysunku 4 przedstawiono w sposób schematyczny koncepcję metody i przykładowe wyniki jej stosowania.



Rys. 4. Koncepcja metody pomiaru sztywności statycznej DWSS (a) i przykładowe wyniki pomiarów (b)
Fig. 4. The concept of static stiffness measurement method DWSS (a) and examples of measurement results (b)

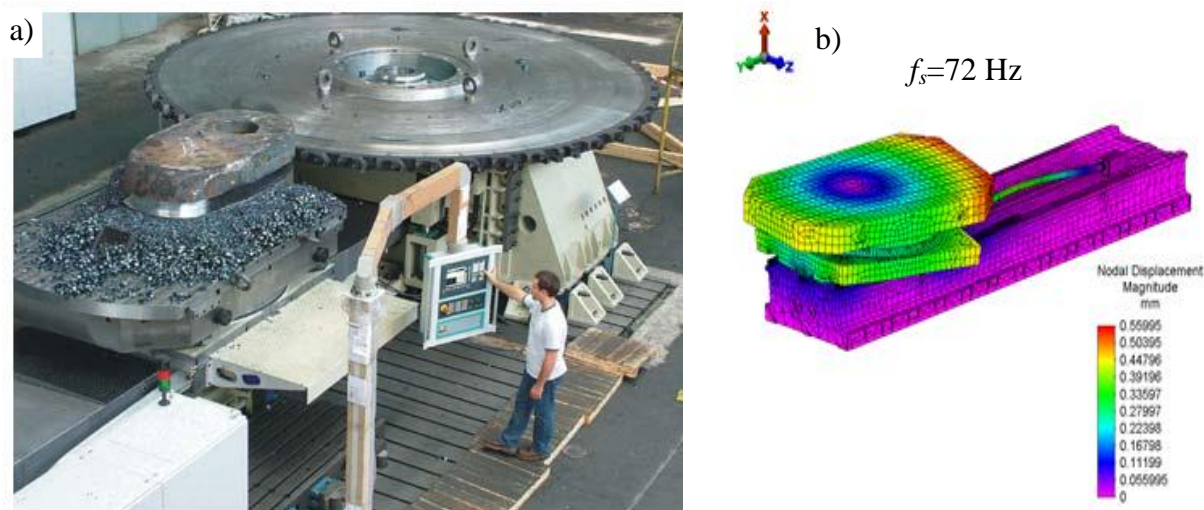
Istota tej metody polega na zastosowaniu czujników drgań (akcelerometrów) do pomiaru wolnozmiennych drgań wywołanych wzbudnikiem hydraulicznym. Dzięki temu unika się konieczności budowania skomplikowanych konstrukcji wsporczych do mocowania czujników przemieszczeń (akcelerometry mocuje się za pomocą magnesów). Pozwala to na wyraźne skrócenie czasu pomiarów sztywności całej obrabiarki nawet do

jednego dnia. Metoda sprawdziła się zwłaszcza dla obrabiarek ciężkich, które można badać tylko w warunkach przemysłowych.

Badania w tym kierunku kontynuował dr inż. M. Kaźmierczak, który w ramach swojej pracy doktorskiej [4] opracował metodykę przeprowadzania takich testów w warunkach przemysłowych.

Inną, ważną inspiracją nowych obszarów badawczych były analizy symulacyjne z zastosowaniem metody elementów skończonych. Rzecz w tym, że obrabiarki ciężkie są wytwarzane jednostkowo i nie ma możliwości prowadzenia badań eksperymentalnych na prototypie doświadczalnym. Pozostają tylko metody symulacyjne. Z uwagi na dużą złożoność obiektu, jakim jest obrabiarka i z uwagi na wielkość modelu MES, zagadnienie symulacyjne staje się trudne. Dużą trudnością jest konieczność modelowania kontaktów, których w obrabiarkach jest kilkadziesiąt. Prace prowadzone przez dr. inż. K. Lehricha, najpierw w systemie Algor a później w systemie Ansys mają cechy oryginalności.

Pan dr K. Lehrich wykonał swoją pracę doktorską [5] z tego właśnie obszaru i opublikował szereg interesujących wyników badań symulacyjnych, niespotykanych dotąd w literaturze krajowej. Na rysunku 5 przedstawiono przykłady takich wyników badań.

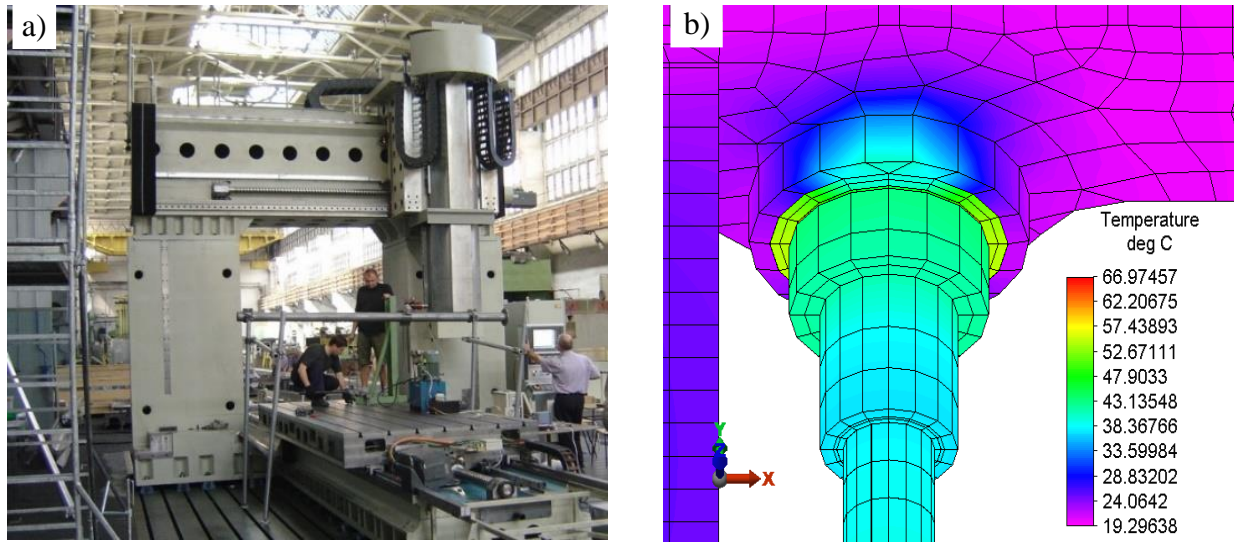


Rys. 5. Widok specjalnej frezarki do wykorbień (a) i przykładowy wyniki drgań stołu obrabiarki (b)
Fig. 5. View of special milling machine for the cranks (a) and example of table vibrations results (b)

Rozwój konstrukcji HSC (High Speed Cutting) znacząco odbił się na konstrukcjach obrabiarek ciężkich. Przykładem może być ciężka frezarka bramowa HSM 180CNC, gdzie oprócz problemu dużych i ciężkich korpusów wystąpił problem dużej ilości ciepła z tytułu dużych prędkości ruchu posuwu. Analizy cieplne metodą elementów skończonych to było nowe wezwanie we współpracy z przemysłem. Prace dr. K. Lehricha znacząco pomogły oszacować naprężenia i przemieszczenia cieplne w takich obrabiarkach. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe wyniki cieplnych badań symulacyjnych MES frezarki HSM 180CNC w postaci rozkładu temperatury.

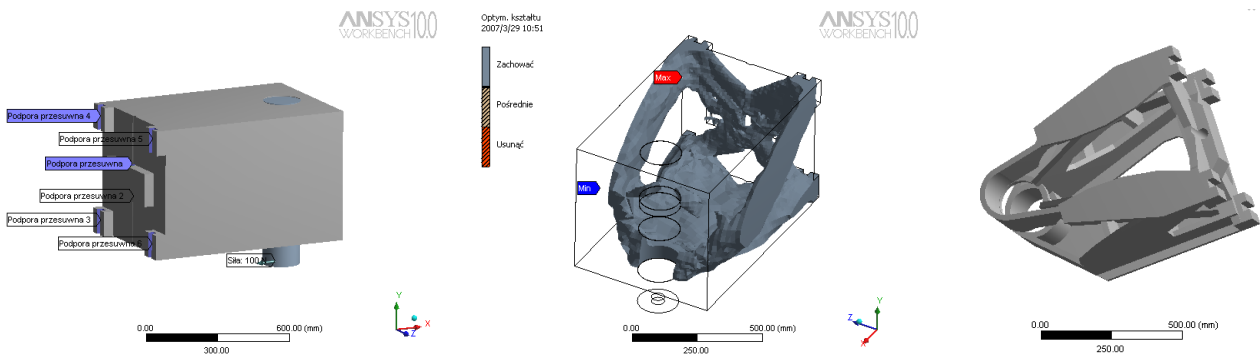
Obrabiarki ciężkie należą do obiektów, które przede wszystkim należy konstruować w sposób optymalny. Wynika to z faktu, że ich duże masy mają znaczący wpływ na koszt

obrabiarki jak i na właściwości eksploatacyjne. To stało się nowym obszarem badawczym w Katedrze, podjętym przez kilku Kolegów. Początkowo próby optymalizacji były realizowane metodą elementów skończonych, wykorzystując zaimplementowane w systemie Ansys procedury optymalizacyjne. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki takich symulacji optymalizacyjnych, przeprowadzonych przez dr. K. Lehricha.



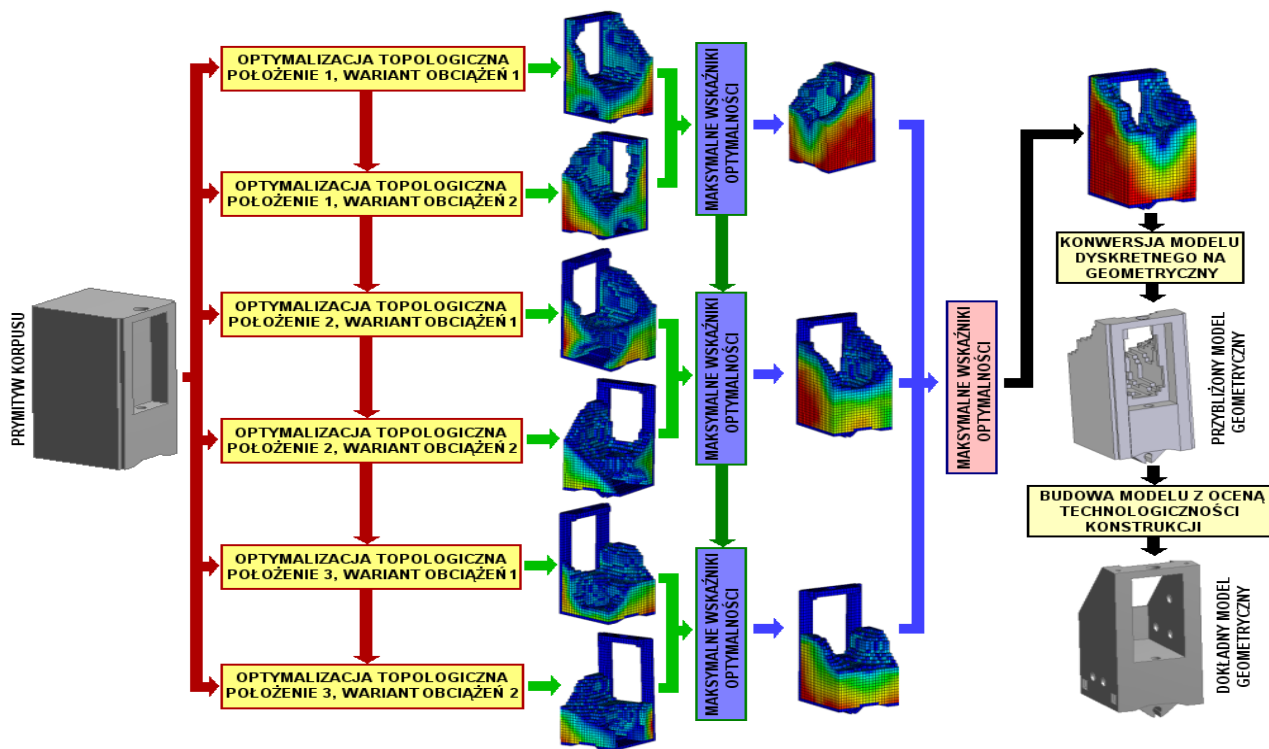
Rys. 6. Widok ciężkiej frezarki HSC (a) i przykładowe wyniki rozkładu temperatury w węzle łożyskowym śruby toczonej (b)

Fig. 6. View of HSC heavy milling machine (a) and example results of temperature distribution in bearing system of ball screw (b)



Rys. 7. Proces optymalizacji wrzeciennika z wykorzystaniem procedur zaimplementowanych w systemie Ansys
Fig. 7. Optimization proces of the headstock with using procedured implemented in Ansys system

Kolejny, milowy krok na drodze optymalizacji obrabiarek został wykonany przez dr. inż. P. Wilka, który w ramach swojej pracy doktorskiej [6] połączył metodę elementów skończonych z metodą algorytmów ewolucyjnych. Było to pierwsze takie podejście do optymalizacji obrabiarek w kraju, a być może i poza jego granicami. Na rysunku 8 przedstawiono w postaci symbolicznej schemat postępowania wg proponowanej metody, dla optymalizacji topologicznej stojaka centrum frezarskiego.



Rys. 8. Schemat optymalizacji topologicznej stojaka centrum frezarskiego wg metody dr. Wilka
 Fig. 8. Topological optimization scheme of the column of milling center according to the Ph.D. Wilk method

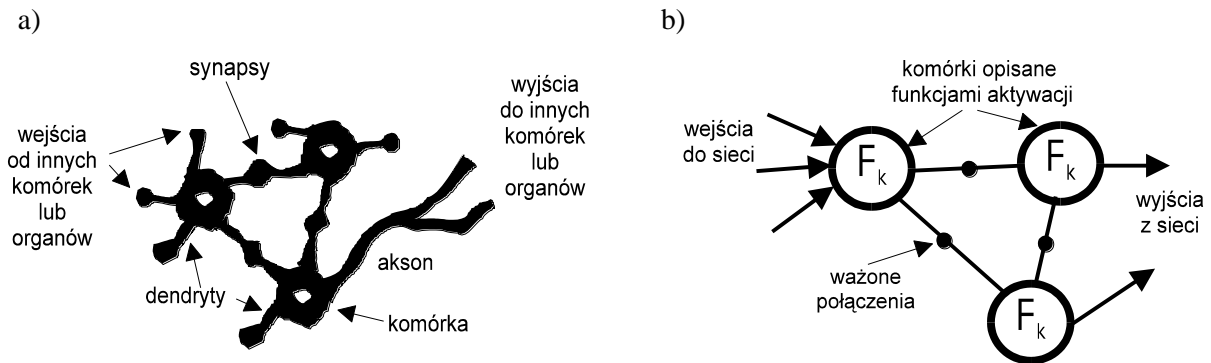
Dr P. Wilk w swojej pracy doktorskiej przedstawił procedury postępowania dla optymalizacji parametrycznej (prostszej) i topologicznej (bardziej złożonej).

Zastosowanie metod sztucznej inteligencji do procesu optymalizacji korpusów obrabiarek można w tym wypadku uznać za innowacyjne podejście do konstruowania obrabiarek.

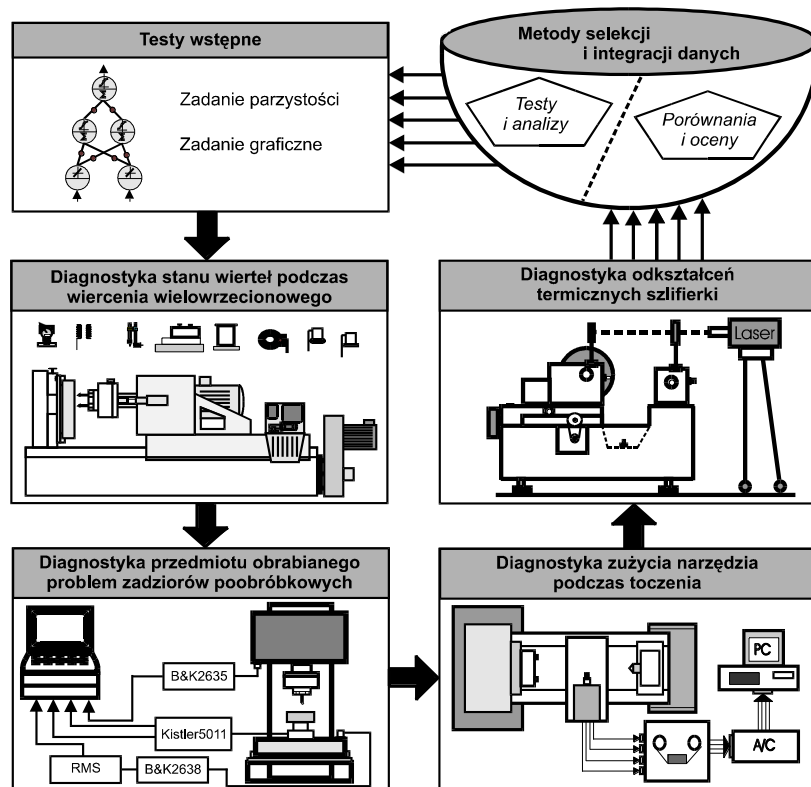
Sztuczna inteligencja w wytwarzaniu to zupełnie nowy kierunek w działalności Katedry Budowy Maszyn. Zainicjował go i w dalszym ciągu rozwija obecny prof. dr hab. inż. Andrzej Sokołowski. W 1995 r. obronił swoją pracę doktorską [7], poświęconą zastosowaniu sieci neuronowych do nadzorowania stanu ostrza skrawającego. Była to pierwsza taka praca doktorska w kraju i jedna z nielicznych, poza granicami kraju. Można to uznać za początek nowego kierunku badawczego w Katedrze Budowy Maszyn. Na rysunku 9 przedstawiono schemat biologicznej sieci neuronowej i jej model numeryczny.

W dalszym ciągu Profesor A. Sokołowski skupił się na zastosowaniach sztucznej inteligencji do diagnostyki zjawisk i procesów obróbki skrawaniem, w tym zwłaszcza narzędzi skrawających. W 2003 r. obronił swoją rozprawę habilitacyjną [8], dotyczącą zagadnień projektowania układów diagnostycznych obrabiarki i procesu skrawania. Na rysunku 10 schematycznie przedstawiono zakres badań prowadzonych w ramach rozprawy habilitacyjnej. Już jako doktor habilitowany intensywnie rozszerza zastosowanie metod sztucznej inteligencji w procesach wytwarzania i diagnostyki. Przykładem tego są prace doktorskie, wykonanego pod Jego kierunkiem. Praca doktorska Pani dr inż. M. Kuchty [9] dotyczą zastosowania sztucznych systemów immunologicznych w diagnostyce. Rysunek 11 przedstawia w formie symbolicznej algorytm klasyfikacji do tworzenia pamięci

immunologicznej. Z kolei praca doktorska dr. inż. T. Czyszpaka [10] dotyczy zagadnienia wnioskowania rozmytego w diagnostyce obrabiarki i obróbki skrawaniem. Na rysunku 12 przedstawiono ogólną strukturę wnioskowania rozmytego.



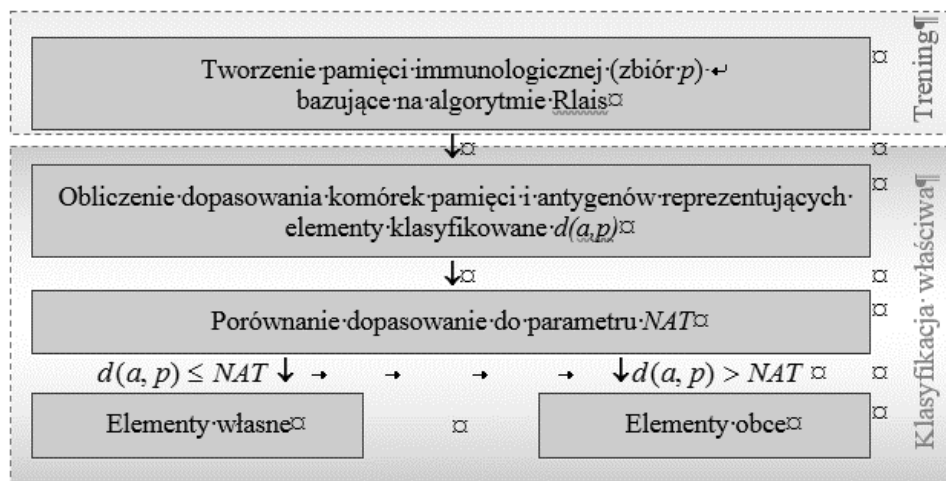
Rys. 9. Uproszczony schemat biologicznej sieci neuronowej (a) i jej model (b)
Fig. 9. Simplified scheme of the biological neural network (a) and its model (b)



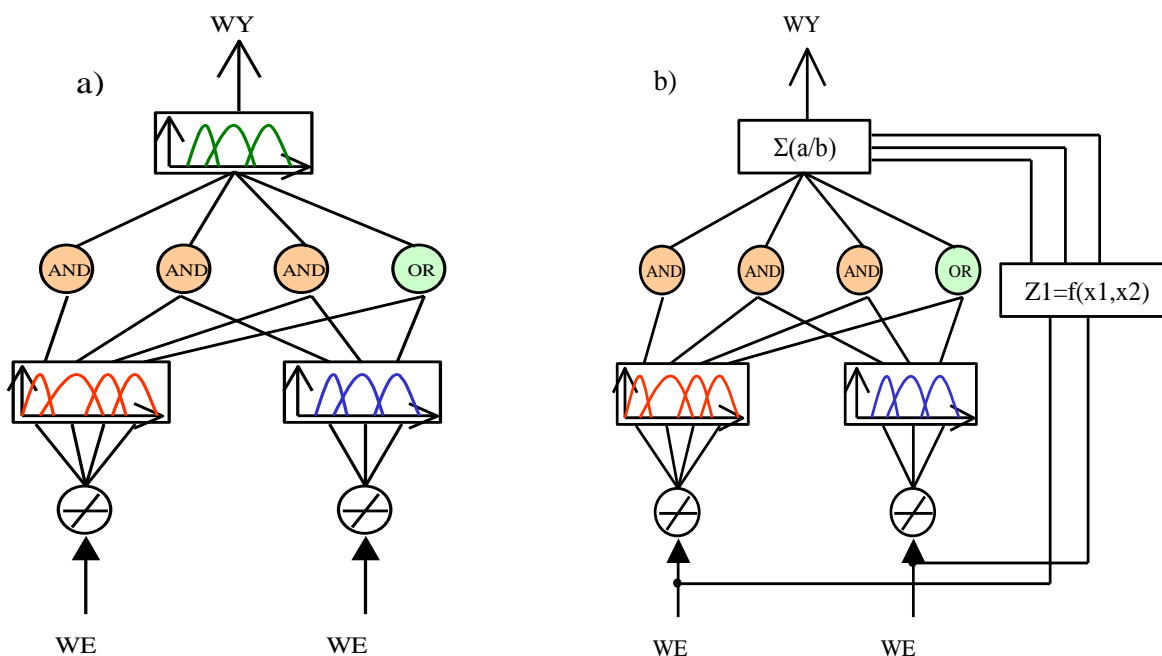
Rys. 10. Schematyczne przedstawienie zakresu badań prowadzonych w ramach rozprawy habilitacyjnej
Fig. 10. A schematic representation of the scope of research within the habilitation thesis

Prowadzone w Katedrze badania optymalizacyjne bazowały do tej pory na metodzie elementów skończonych wspartych metodami sztucznej inteligencji. Takie postępowanie może być zasadne, kiedy jest opracowana dokumentacja prototypu doświadczalnego.

W odniesieniu do obrabiarek ciężkich jest to sytuacja rzadka, jako że dokumentacja konstrukcyjna dla prototypu jest na ogół dokumentacją ostateczną. Stąd próby zastosowania połączonych metod sztywnych elementów skończonych i elastycznych elementów skończonych. Takie podejście pozwala już na etapie wstępnym ocenić właściwości statyczne i dynamiczne projektowanej obrabiarki, a na dalszym etapie na zastosowanie klasycznej metody elementów skończonych. Prace te prowadzi Pan mgr inż. J. Grzywocz, w ramach swojej pracy doktorskiej.



Rys. 11. Algorytm klasyfikacji wykorzystujący do tworzenia pamięci immunologicznej algorytm Rlais
 Fig. 11. Classification algorithm using Rlais algorithm to create immunological memory

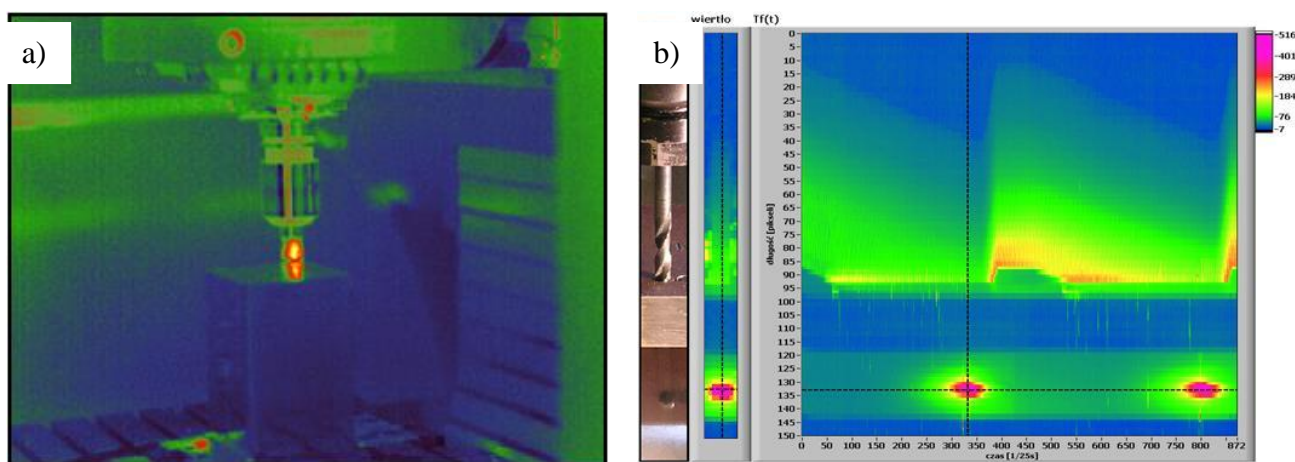


Rys. 12. Ogólna struktura wnioskowania rozmytego: a) system z wnioskowaniem Mamdani,
 b) system z wnioskowaniem Takagi–Sugeno
 Fig. 12. General structure of fuzzy inference: a) system with Mamdani inference,
 b) system with Takagi–Sugeno inference

Kolejnym tematem badawczym o cechach optymalizacji konstrukcji to konstrukcje hybrydowe, czyli połączenie korpusów żeliwnych czy stalowych wypełnionych polimerobetonem. Takie konstrukcje są lżejsze, a optymalizacja ma zagwarantować pożądane właściwości eksploatacyjne. Głównym wykonawcą tych prac jest Pan mgr inż. P. Całka, który jest uczestnikiem studiów doktoranckich.

Stosunkowo młodą tematyką badawczą są prace związane z optymalizacją konstrukcji obrabiarek ciężkich, ale z uwagi na kryterium odkształceń cieplnych. Jest to ważne zagadnienie zwłaszcza w świetle technologii HSC. Optymalizacja cieplna ma prowadzić do minimalizacji przemieszczeń w punkcie styku narzędzia skrawającego i przedmiotu obrabianego. Te zagadnienia w ramach swojej pracy doktorskiej rozwija mgr inż. M. Wąsik.

Od chwili, kiedy prof. J. Kosmol zaczął rozwijać tematykę sterowań adaptacyjnych (lata 70. ubiegłego stulecia) duży nacisk został położony na zagadnienia diagnostyki i automatycznego nadzoru w obrabiarkach i w obróbce skrawaniem. Cała działalność prof. A. Sokołowskiego w obszarze sztucznej inteligencji jest ukierunkowana na diagnostykę i nadzór.



Rys. 13. Pomiar temperatury kamerą termowizyjną (a) i wyznaczenie współczynnika emisyjności (b)
Fig. 13. Temperature measurement with a thermographic camera (a) and a emissivity factor determination (b)

Jednym z tematów szczególnie rozwijanych w ostatnich latach to diagnostyka cieplna w procesach wiercenia. Reprezentuje ją dr inż. K. Lis, który wykonał pracę doktorską z tematyki wiercenia [11]. To co wyróżnia ten temat badawczy to zastosowanie kamery termowizyjnej i modeli MES oraz sztucznej inteligencji do identyfikacji temperatury ostrza wiertła (technicznie, nie ma możliwości bezpośredniego mierzenia temperatury ostrza wiertła). Na rysunku 13 przedstawiono przykład pomiaru temperatury podczas wiercenia oraz ilustrację wspomagającą wyznaczenie współczynnika emisyjności.

Niezwykle ważną dla rozwoju naukowego Katedry okazała się tematyka obróbki strumieniem wodnościernym AWJM (Abrasive Water Jet Machining), którą rozpoczął w 1988r student z Egiptu Ashraf J. Hassan. To co wyróżniło ten temat badawczy na tle innych, spotykanych w kraju to próba symulacji zjawisk występujących w cięciu strumieniem wodnościernym za pomocą metody elementów skończonych. Sądzę, że w tym czasie był to ewenement na skalę światową. Ashraf J. Hassan zakończył swoje badania

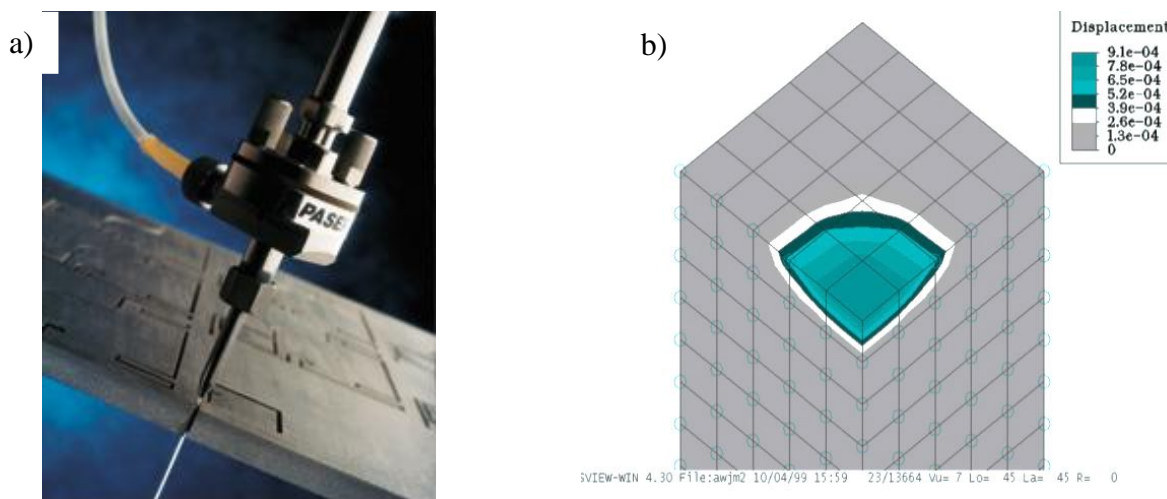
pracą doktorską w 2001 r [12], w której zawarł podstawy modelowania zjawisk skrawania za pomocą strugi wodnościernej. Na rysunku 14 przedstawiono ilustrację obrazującą wyniki symulacji MES, w postaci rozkładu przemieszczeń w ciętym materiale.

Tematyka modelowania obróbki wodnościernej była kontynuowana przez dr. inż. T. Walę, który w 2005 r obronił swoją pracę doktorską [13], poświęconą cięciu tworzyw sztucznych metodą AWJM. Istotą tych badań było zjawisko delaminacji i próba doboru warunków obróbki, które nie wywoływałyby tego zjawiska.

Dużym udogodnieniem w prowadzeniu badań zjawisk towarzyszących obróbce wodnościernej stała się możliwość ich weryfikacji eksperymentalnej, dzięki zakupowi obrabiarki do tej technologii. Na rysunku 15 pokazano model MES cząstki kompozytu wzmacnianego włóknem szklanym i przykładowy rozkład przemieszczeń.

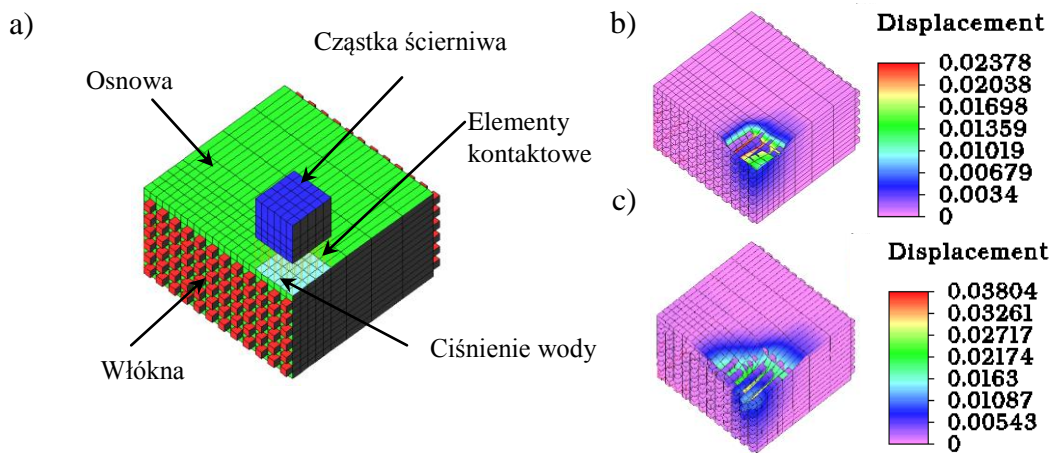
Metoda elementów skończonych poza wspomaganie procesów projektowania i konstruowania pozwala na symulację zjawisk fizycznych. Przykładem tego jest obróbka strumieniem wodnościernym, gdzie zjawiska cięcia były symulowane MES-em.

W Katedrze Budowy Maszyn zainicjowano nowy w skali kraju temat badawczy, tj. symulacja tworzenia się wióra podczas procesu skrawania metodą elementów skończonych. Zagadnie niezwykle trudne, ponieważ zachodzi konieczność łączenia zjawisk mechanicznych w obszarze nieliniowym, cieplnych i tarcia. Prekursorem tych działań był dr inż. W. Mieszczak, który wykonał swoją pracę doktorską [14] w zakresie predykcji sił i momentów podczas wiercenia z zastosowaniem metody elementów skończonych. Na rysunku 16 przedstawiono ilustrację prezentującą niektóre wyniki badań symulacyjnych.



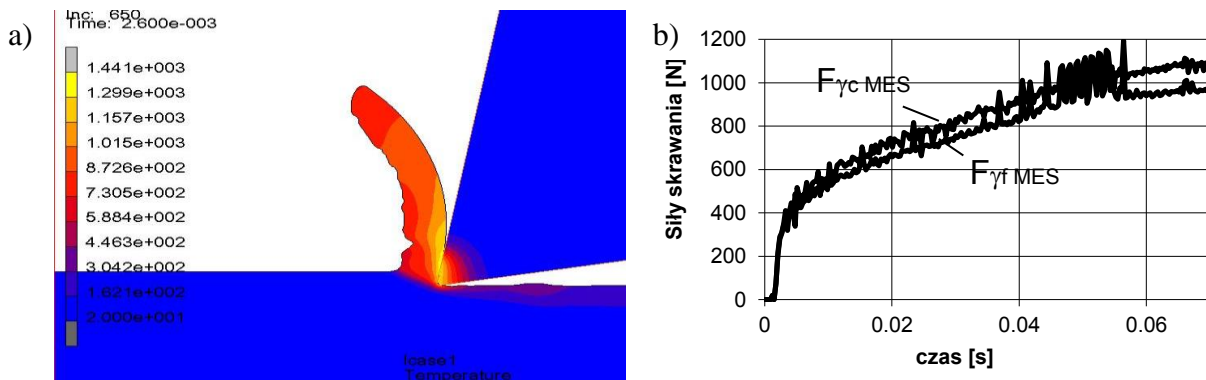
Rys. 14. Widok głowicy wodnościernej (a) i rozkład przemieszczeń w ciętym materiale (b)
Fig. 14. View of waterjet machine headstock (a) and displacement distribution in material being cut (b)

W Katedrze Budowy Maszyn od samego początku jej istnienia dużą wagę przykładano do metrologii warsztatowej, bowiem metrologia jest nieodłącznym składnikiem procesów technologicznych wytwarzania. Tradycyjna metrologia warsztatowa została zdominowana przez metody numeryczne, wykorzystujące maszyny pomiarowe CNC, a ostatnio i ramiona pomiarowe CNC. Dlatego w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku powstały rozprawy naukowe traktujące o metodologii ich użytkowania.



Rys. 15. Model MES obróbki wodnościerniej kompozytu wzmocnionego włóknami (a) i przykładowy rozkład przemieszczeń (b, c)

Fig. 15. MES model of abrasive water jet machining of fiber reinforced composite (a) and displacement distribution example (b, c)



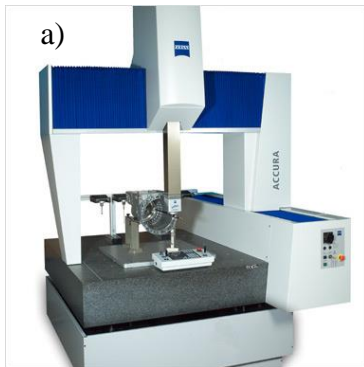
Rys. 16. Rozkład temperatury (a) i przebieg siły skrawania uzyskane z badań symulacyjnych MES (b)

Fig. 16. Temperature distribution (a) and cutting force time course from simulation MES tests (b)

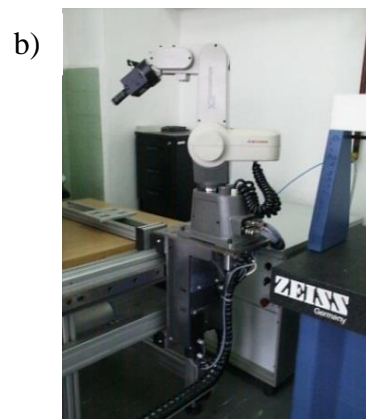
W Katedrze znaczący wkład w rozwój tego obszaru wniósł dr inż. M. Kaźmierczak, który m.in. opracował podstawy użytkowania maszyn pomiarowych w procesach kontroli wymiarowej. Pracę naukową zmierzającą do optymalizacji pomiarów na maszynach pomiarowych kontynuował dr inż. D. Hylewski, który w swojej pracy doktorskiej [15] zaproponował metodę doboru algorytmów pomiarowych, których zastosowanie pozwalało na skrócenie czasu samych pomiarów. Znamiennym krokiem w pracach badawczych był zakup inwestycyjny maszyny pomiarowej Zeiss Accura, oraz ramienia pomiarowego (rys. 17). Urządzenia zakupił pobliski „Technopark Gliwice”, którym kieruje prof. J. Kosmol.

Kierunkiem badawczym preferowanym w Katedrze Budowy Maszyn od kilkadziesiąt lat jest automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem. Katedra posiada oryginalne maszyny i systemy, takie jak elastyczne gniazdo obróbkowe, składające się z frezarki NC, tokarki NC, mini robota Mitsubishi, maszyny pomiarowej Zeiss 400CNC i układu sterowania gniazdem (rys. 18). Ponadto, Katedra posiada 5-osiowe centrum obróbkowe DMU-60MB oraz dostęp do centrum tokarsko-frezarskiego firmy Okuma.

Prowadzone prace badawcze dotyczą przede wszystkim automatyzacji programowania, a w szczególności obrabiarek 5-osiowych. W tym celu stosujemy technologię CAM, posługując się profesjonalnym oprogramowaniem Catia, MasterCAM, SolidEdge, MTS.



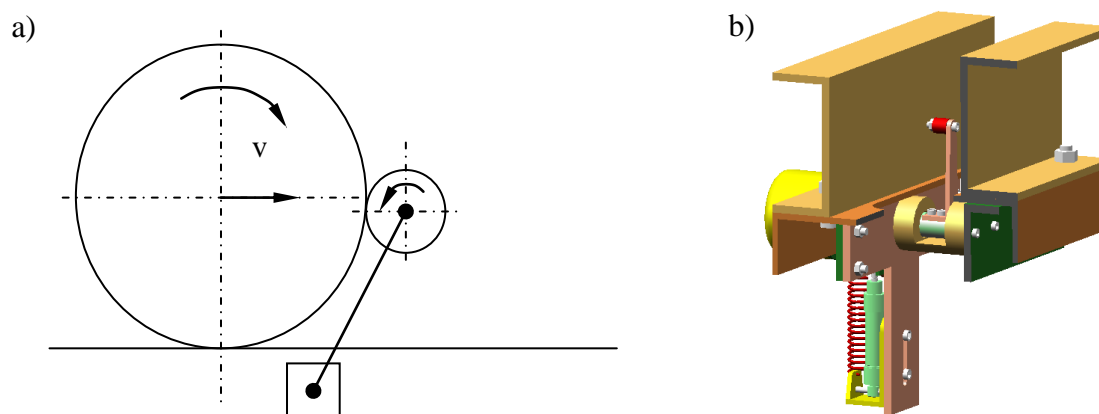
Rys. 17. Maszyna pomiarowa Accura firmy Zeiss (a) i ramię pomiarowe RA 7320 firmy Hexagon (b)
 Fig. 17. Accura coordinate measuring machine (a) and Hexagon measuring arm RA 7320 (b)



Rys. 18. Gniazdo elastyczne (a) zrobotyzowane (b), centrum obróbkowe 5-osiowe (c), centrum tokarsko-frezarskie Okuma (d)

Fig. 18. Flexible machining socket (a) robotized (b), 5-axis machining center (c), Okuma turning/milling center (d)

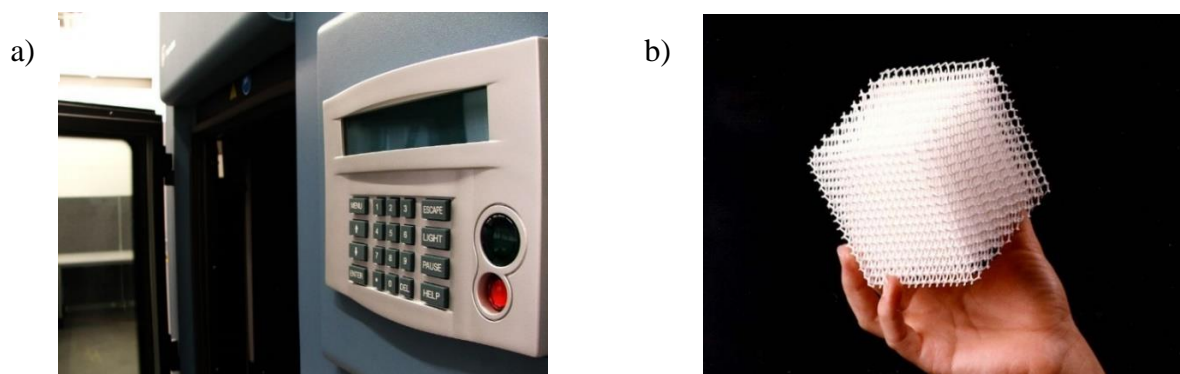
Oryginalnym wątkiem badawczym były prace nad automatyzacją pomiarów zużycia kół zestawów kolejowych będących w ruchu. Pan dr inż. A. Kolka wykonał swoją pracę doktorską [16], gdzie przedstawił wyniki zaproponowanej i oryginalnej metody pomiaru z zastosowaniem przetworników obrotowo-impulsowych. Na rysunku 19 przedstawiono koncepcję pomiaru i schemat modułu pomiarowego.



Rys. 19. Koncepcja pomiaru średnicy koła (a) i schemat modułu pomiarowego z przetwornikiem obrotowo-impulsowym (b)

Fig. 19. The concept of wheel diameter measurement (a) and scheme of measuring module with rotary pulse transducer (b)

Od ok. 10 lat prowadzone są w Katedrze prace badawcze nad rozwojem technologii addytywnych (przyrostowych), czyli popularnie nazywanych drukarkami 3D. Dr inż. G. Dyrbuś koncentruje swoje badania nad optymalizacją technologii FDM, w której podstawowym tworzywem jest ABS. Badania te dotyczą wpływu kształtu przedmiotu, średnicy dysz, posuwu na dokładność wymiarowo-kształtową i chropowatość powierzchni. Prace eksperymentalne są prowadzone na urządzeniu firmy Stratasys typu Vantage (rys. 20).

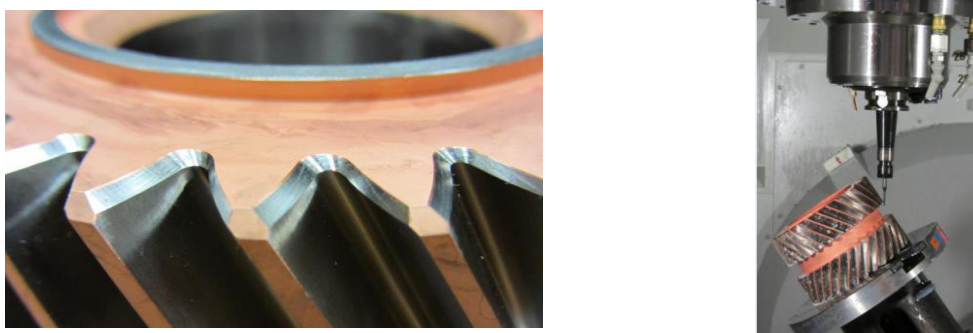


Rys. 20. Rapid prototyping: a) drukarka firmy Stratasys w technologii FDM, b) przykład przedmiotu wykonanego w tej technologii

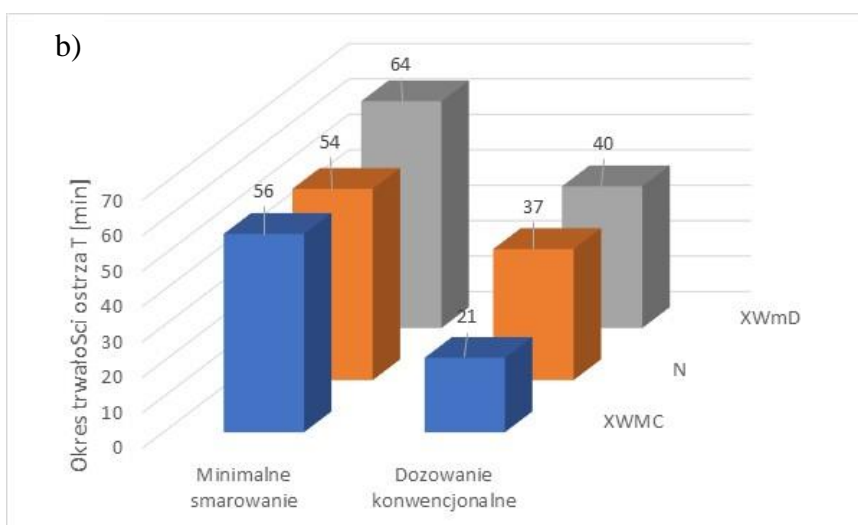
Fig. 20. Rapid prototyping: a) Stratasys 3D printer in FDM technology, b) object made in this technology

W ostatnich 3 latach Katedra uczestniczyła w programie sektorowym Innolot, prowadząc prace badawcze nad automatyzacją zatępienia krawędzi zębów kół zębatych hartowanych. Opracowana została oryginalna metoda zatępienia na obrabiarce 5-osiowej z zastosowaniem narzędzi ściernych lub wiórowych (frez palcowy). Jest to znaczący postęp w technologii zatępienia zębów, ponieważ do tej pory, w produkcji mała i średnioseryjnej dominuje obróbka ręczna. Na rysunku 21 pokazano fragment koła zębatego z zatępionymi krawędziami oraz ideę metody zatępienia.

Do prac dotyczących optymalizacji, jakkolwiek nie konstrukcji obrabiarek możemy także zaliczyć badania naukowe nad tzw. minimalnym smarowaniem. Pan dr inż. G. Dyrbuś w ramach swojej pracy doktorskiej [17] przedstawił wpływ ilości cieczy chłodząco-smarujących na trwałość wiertel podczas obróbki stali austenitycznych. Pozwoliło to na sformułowanie zaleceń odnośnie minimalnej ilości cieczy, jaka jest niezbędna dla osiągnięcia pożądanej trwałości narzędzia skrawającego. Na rysunku 22 przedstawiono stanowisko badawcze i przykładowe wyniki badań eksperymentalnych, pozwalające porównać trwałość ostrza dla chłodzenia tradycyjnego i z minimalnym smarowaniem.



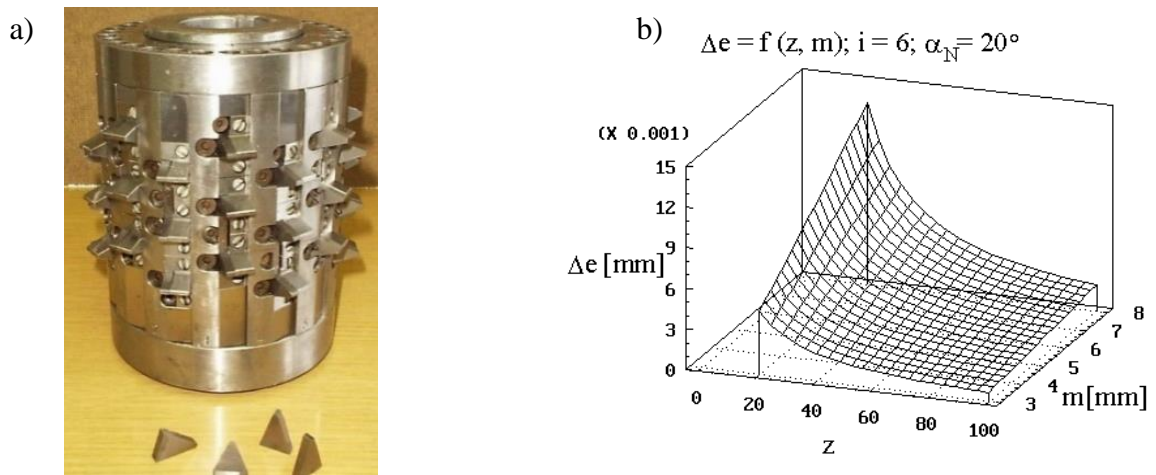
Rys. 21. Zatępienie krawędzi zębów kół zębatych z zastosowaniem 5-osiowego centrum CNC
Fig. 21. Tooth edge chamfering using 5-axic CNC center



Rys. 22. Widok oryginalnego przyrządu do dozowania cieczy (a) i przykładowe wyniki badań eksperymentalnych (b)
Fig. 22. View of original dosing device for liquid cooling (a) and example results of experimental research (b)

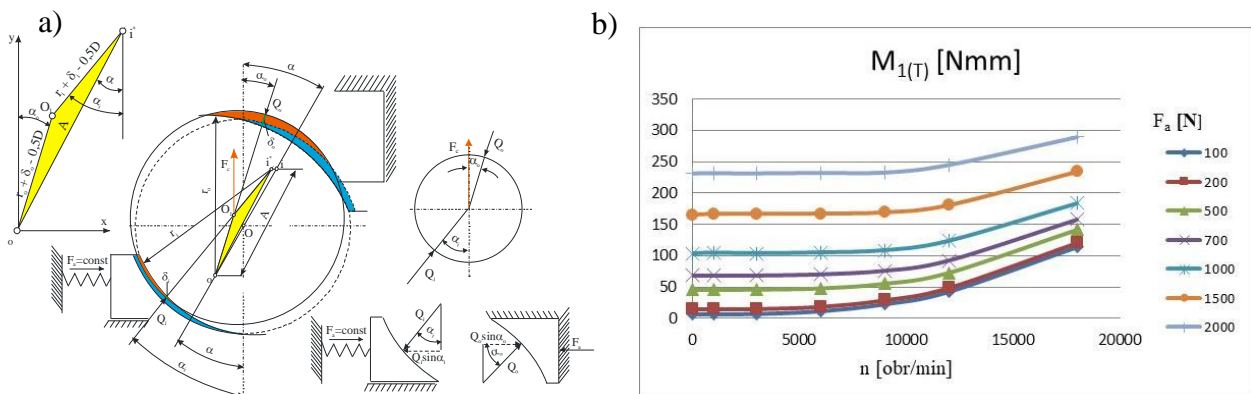
Przez kilkanaście lat w Katedrze prowadzone były prace badawcze nad metodą obróbki uzębień w stanie twardym, bez operacji szlifowania. Prekursorem metody był dr inż. Z. Stachurski, który opracował koncepcję i konstrukcję narzędzia (frezu ślimakowego) z wstawianymi ostrzami z węglików spiekanych. Na rysunku 23 przedstawiono widok takiego frezu. Prace badawcze w tym obszarze kontynuował dr inż. A. Salomon, który w swojej pracy doktorskiej [18] opracował wytyczne odnośnie wpływu wybranych cech konstrukcyjnych frezów ślimakowych składanych na dokładność frezowania wykańczającego uzębień. Badania te uległy zahamowaniu, kiedy na skalę przemysłową upowszechniły się sterowania CNC 5-osiowe, które umożliwiły obróbkę uzębień w stanie twardym metodami numerycznymi.

Prof. J. Kosmol od kilku lat skupia swoją uwagę na modelowaniu łożysk tocznych dla obrabiarek HSC. Profesor chciałby opracować proste modele matematyczne, które pozwoliłyby konstruktorom na oszacowanie ilości ciepła powstającego w węzłach łożysk tocznych. Swoje kilkuletnie badania zawarł w monografii [19].



Rys. 23. Widok frezu ślimakowego z ostrzami z węglików spiekanych (a) oraz wpływ liczby zębów z i modułu m na błąd ewolwenty Δe (b)

Fig. 23. View of hob cutter with cemented carbide tips (a) and the influence of the number of teeth z and module m on involute error Δe (b)



Rys. 24. Model obliczeniowy łożyska (a) i przykładowy wpływ prędkości łożyska na opory ruchu (b)

Fig. 24. Bearing calculation model (a) and example of the influence of bearing velocity on movement resistance (b)

Opracowane zostały modele analityczne w postaci zależności momentu oporów ruchu łożysk w funkcji prędkości obrotowej i napięcia wstępnego, a także obciążenia zewnętrznego łożyska. Korzystając np. z MS Excel-a można stosunkowo łatwo i szybko oszacować wartości oporów ruchu dla znanej prędkości, napięcia wstępnego czy obciążenia zewnętrznego łożyska. Na rysunku 24 przedstawiono w postaci symbolicznej model fenomenologiczny łożyska tocznego i przykładową, graficzną zależność oporów ruchu od prędkości obrotowej.

3. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono najważniejsze kierunki i prace badawcze prowadzone w Katedrze Budowy Maszyn przez ostatnie 25 lat. Zdecydowana większość tych prac dotyczy rozwoju i konstrukcji obrabiarek, zwłaszcza ciężkich. Tematyka prowadzonych badań jest aktualna i skupia się na konsekwencjach rozwoju technologii HSC dla konstrukcji obrabiarek i na metodach optymalizacji tych konstrukcji.

Dotychczasowe metody projektowania i konstruowania, zwłaszcza obrabiarek ciężkich, bazujące przede wszystkim na doświadczeniu konstruktora, Jego wiedzy i wyczuciu konstruktorskim, w wielu przypadkach nie są już wystarczające. W konstruowaniu obrabiarek HSC dominującymi kryteriami stają się: wibrostabilność oraz termostabilność. Oba te kryteria mają swoje źródła w rosnących parametrach kinematycznych obrabiarek, tj. prędkości obrotowej i prędkości posuwu. Kryteria te zmuszają konstruktorów do obniżania masy korpusów, do podwyższania ich sztywności statycznej i dynamicznej, do minimalizacji oporów ruchu w ruchowych węzłach kinematycznych, do aktywnego kontrolowania (nadzorowania) najważniejszych modułów obrabiarkowych, do automatyzacji pracy obrabiarek. Stosowanie metod optymalizacyjnych w projektowaniu i konstruowaniu obrabiarek staje się nieodzowne, jako że obniżanie masy zespołów obrabiarek prowadzi równocześnie do podwyższenia naprężeń w materiale, do obniżenia sztywności statycznej, a w konsekwencji podwyższenia przemieszczeń i odkształceń wpływających na błąd obróbki. Konstrukcje optymalne są lżejsze, ale równocześnie nie gorsze pod względem właściwości mechanicznych, termicznych czy trwałościowych.

Katedra swoimi działaniami badawczymi wpisuje się w te tendencje i w dalszym ciągu będzie to kontynuować.

LITERATURA

- [1] TYRLIK T., 1997, *Działalność Katedry Obrabiarek i Zespołu Obrabiarek w minionym 50-leciu*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 2/97, 9–38.
- [2] ŚLIWKA J., 2000, *Wyznaczanie sztywności statycznej obrabiarek metodą wymuszenia dynamicznego*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 2/2000, 144.
- [3] ŚLIWKA J., 2013, *Identyfikacja sztywności statycznej obrabiarek ciężkich w warunkach przemysłowych*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 139.
- [4] KAŻMIERCZAK M., 2003, *Metodyka badań sztywności statycznej obrabiarek ciężkich w warunkach przemysłowych*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 1/23, 162.

- [5] LEHRICH K., 2005, *Wpływ wybranych zespołów obrabiarek do skrawania z dużymi prędkościami na dokładność obróbki*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 2/20, 151.
- [6] WILK P., 2011, *Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych i metody elementów skończonych w optymalizacji korpusów obrabiarek*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 1/31, 207.
- [7] SOKOŁOWSKI A., 1994, *Nadzorowanie stanu ostrza skrawającego z zastosowaniem sieci neuronowych*, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 170.
- [8] SOKOŁOWSKI A., 2003, *Wybrane zagadnienia projektowania układów diagnostycznych obrabiarki i procesu skrawania*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Mechanika, Gliwice, 142, 231.
- [9] KUCHTA M., 2011, *Zastosowanie sztucznych systemów immunologicznych w wybranych zadaniach diagnostycznych*, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 140.
- [10] CZYSZPAK T., 2008, *Zastosowanie systemów wnioskowania rozmytego w diagnostyce obrabiarki i procesu skrawania*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 2/27, 133.
- [11] LIS K., 2008, *Zastosowanie metod pirometrycznych do identyfikacji temperatury narzędzia podczas wiercenia*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 1/26, 156.
- [12] ASHRAF I. HASSAN, 2001, *Finite Element Analysis of Abrasive Waterjet Machining*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 1, 118.
- [13] WALA T., 2005, *Modelowanie obróbki strumieniem wodnościernym tworzyw sztucznych metodą elementów skończonych*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 3/21, 158.
- [14] MIESZCZAK W., 2005, *Model predykcyjny siły i momentu skrawania w procesie wiercenia*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 1/19, 145.
- [15] HYLEWSKI D., 2013, *Inżynieria odwrotna z wykorzystaniem zaawansowanych technik wytwarzania*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 1/34, 204.
- [16] KOLKA A., 2002, *Metodyka wyznaczania wielkości średnicowych kół pojazdów szynowych w ruchu*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 1, 174.
- [17] DYRBUŚ G., 2002, *Wpływ cieczy chłodząco-smarujących na trwałość wiertel krętych podczas wiercenia stali austenitycznych*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Gliwice, 3, 142.
- [18] SALOMON A., 2002, *Wpływ wybranych cech konstrukcyjnych frezów ślimakowych składanych na dokładność frezowania wykańczającego uzębień*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn Gliwice, 2, 153.
- [19] KOSMOL J., 2016, *Determination of Motion Resistances in High-Speed Spindle Angular Bearings*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 93.

THE ROLE OF MACHINE TECHNOLOGY DEPARTMENT OF SILESIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN HEAVY MACHINE TOOLS DEVELOPMENT

The paper presents research and investigations in the field of machine tools for the last 25 years in the Department of Machine Technology of Silesian University of Technology, during the time when prof. J. Kosmol was the head of the Department. The directions and results of research and investigations were shown based on 15 doctoral theses and 2 habilitations which were favorable performed. Prof. J. Kosmol was the supervisor of 11 doctoral theses and Prof. A. Sokołowski 4 of them. The attention was concentrated on the directions of investigations related to design, exploitation control and automation of machine tools, first of all heavy machine tools and on practical application of artificial intelligence in manufacturing. These directions of research and investigations are still actual.

Keywords: *heavy machine tool, design, optimization, FEM, artificial intelligence*