

## Opracowanie technologii efektywnego projektowania i produkcji przekładni stożkowych z wykorzystaniem systemu Phoenix firmy Gleason

Politechnika Rzeszowska, Politechnika Warszawska

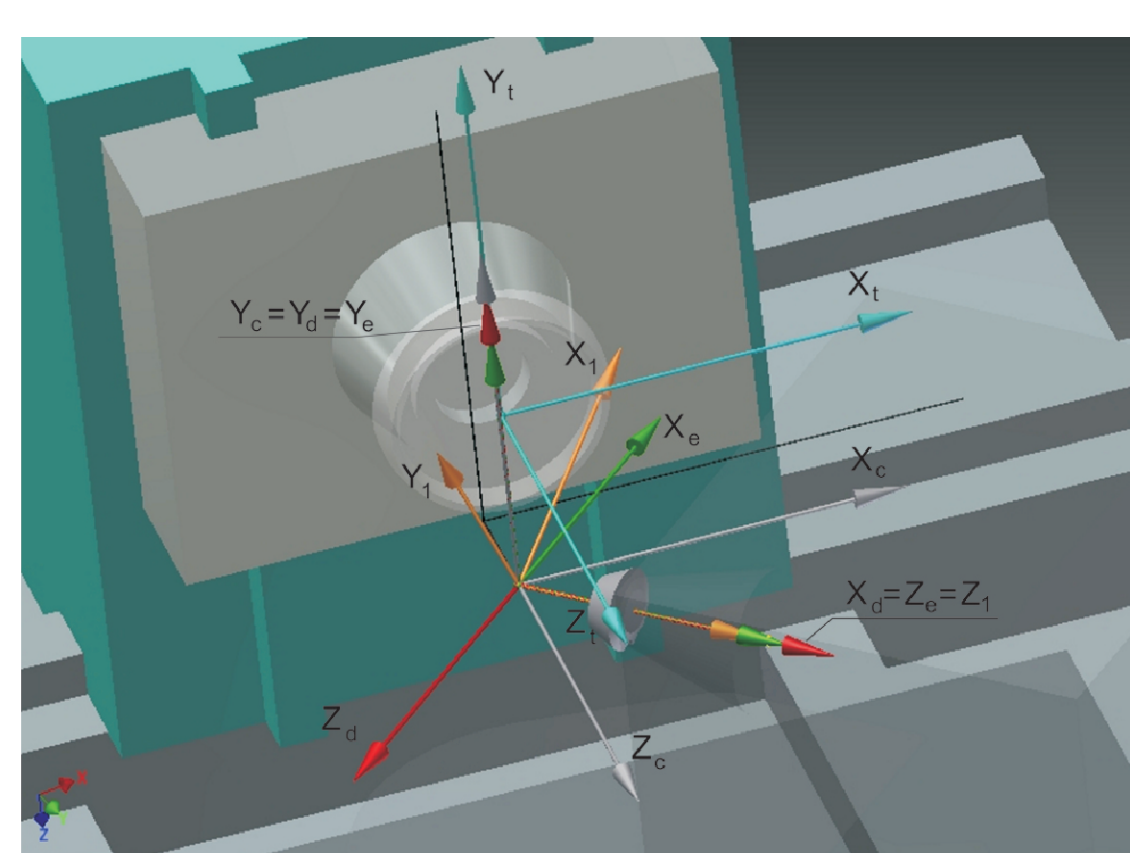
### Wyniki badań

#### 1. Opracowanie metody wyznaczania funkcji ruchu osi sterowanych obrabiarki Phoenix odzwierciedlających obróbkę klasycznymi metodami

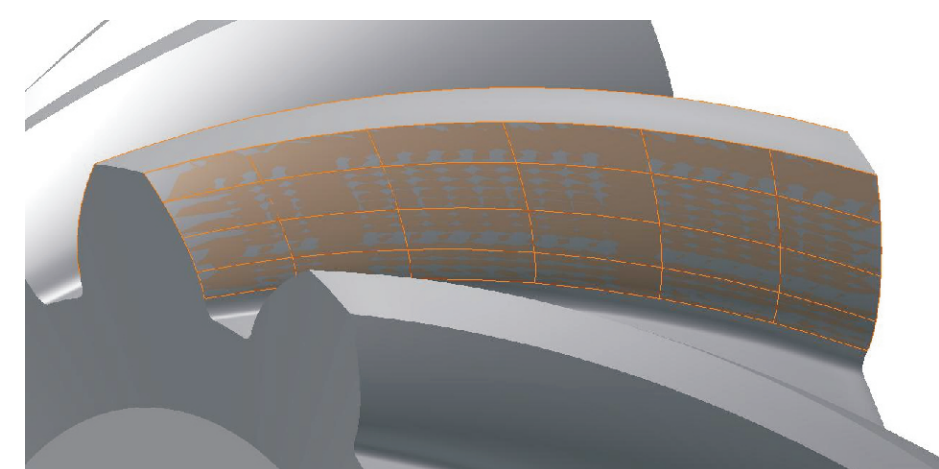
#### 2. Opracowanie metody wyznaczania powierzchni zębów zębniaka obrabianego na obrabiarku Phoenix klasycznymi metodami

Opracowana metoda wyznaczania funkcji ruchu osi obrabiarki Phoenix pozwala na projektowanie procesu obróbki sterowanej numerycznie według klasycznych metod Gleasona. Jednym z problemów, które rozwiązano, było przeniesienie kinematyki obrabiarki klasycznej na numeryczną. Zagadnienie przekształcania geometrii obrabiarki klasycznej 116 na geometrię obrabiarki numerycznej Phoenix zostało zrealizowane (w zapisie matematycznym) za pomocą rachunku macierzowego.

Uniwersalną metodę wyznaczania powierzchni bocznej zęba koła lub zębniaka, obrabianego na maszynie numerycznej Phoenix opracowano, odtwarzając geometrię kształtowania uzębienia na klasycznej obrabiarku 116 oraz przekształcając ją do zastosowania na obrabiarku numerycznej. Efektem procesu nacinania, modelowanego przez kolejne położenia powierzchni działania wybranego narzędzia, jest rodzina powierzchni, której obwiednią jest poszukiwana

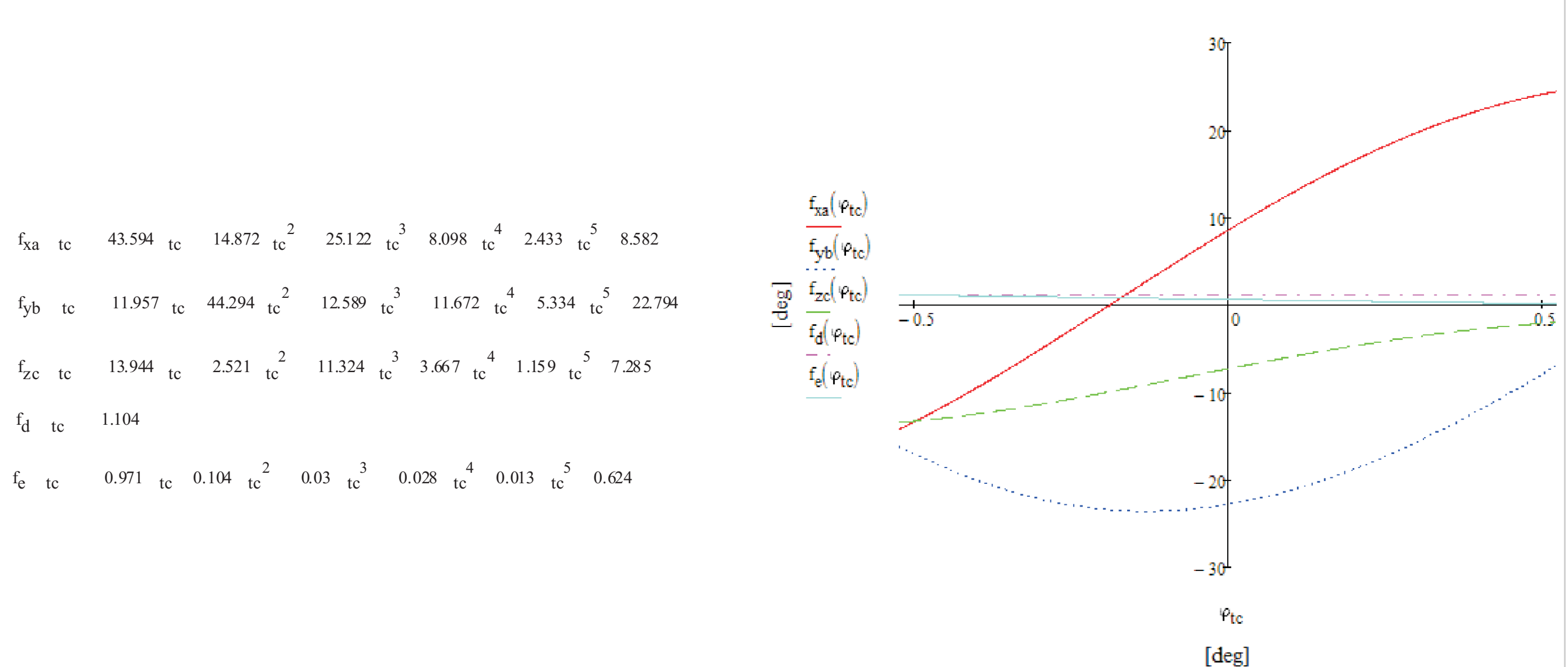


Rys. 1. Zespół układów współrzędnych modelujących obrabiarkę Phoenix 175HC

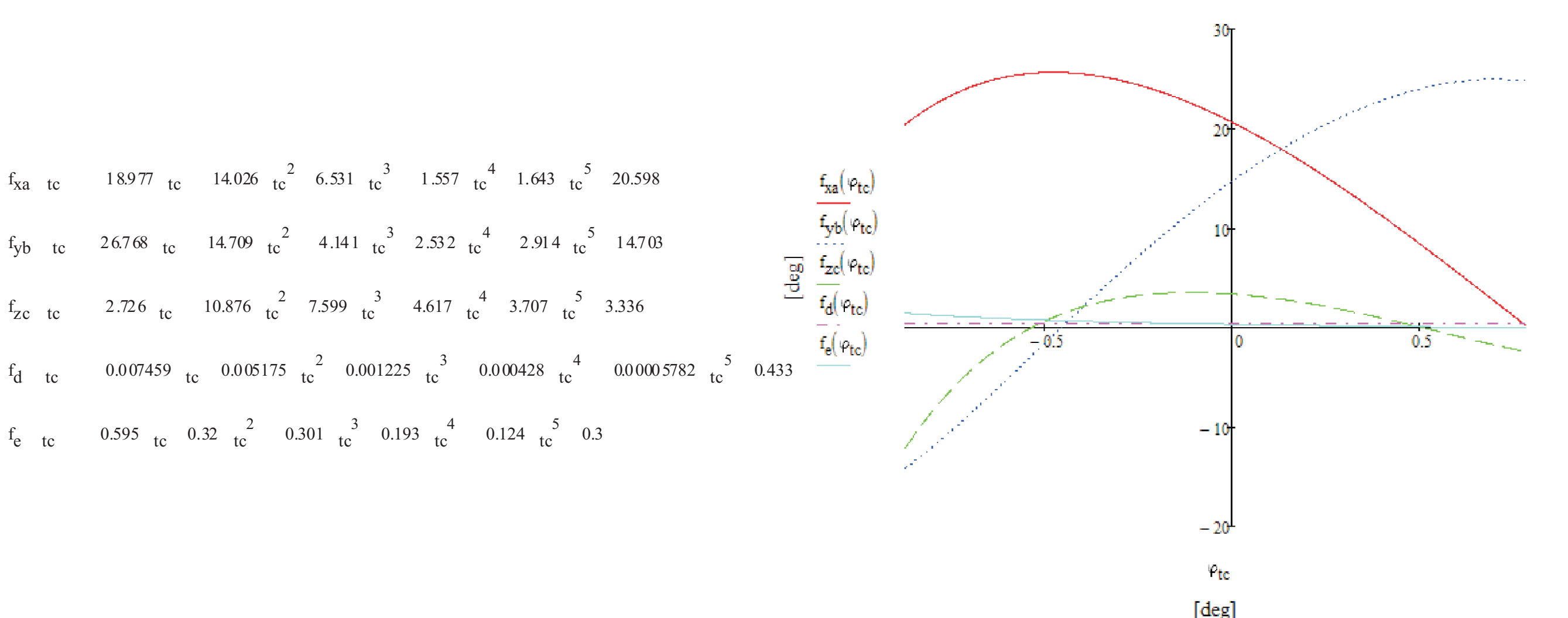


Rys. 2. Zestawienie powierzchni bocznych zęba zębniaka, uzyskanych metodami: numeryczną i przez symulację obróbki w systemie CAD

Poniżej przedstawiono wielomiany 5 stopnia funkcji ruchu w poszczególnych osiach sterowanych obrabiarki Phoenix.



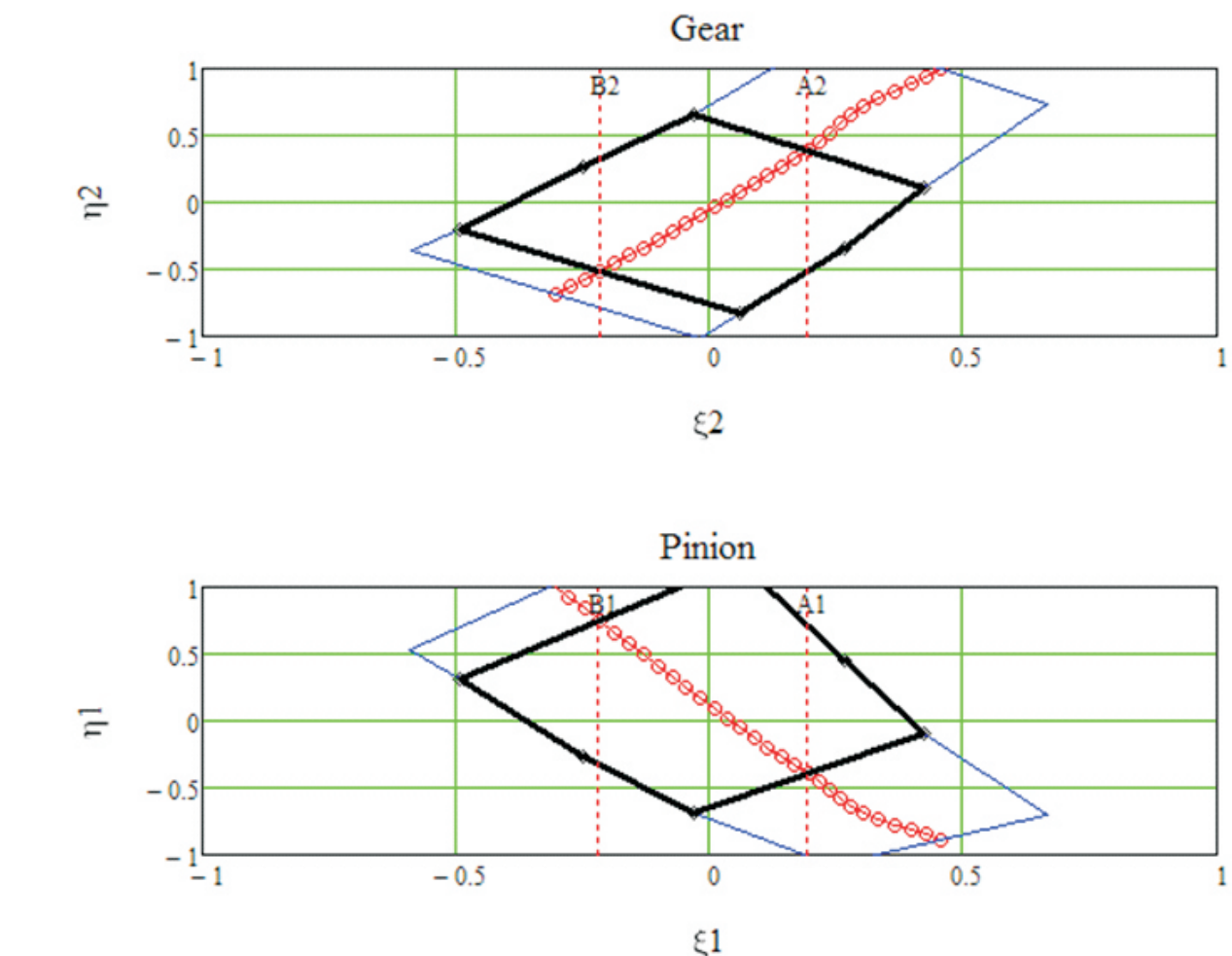
Rys. 3. Funkcje oraz wykresy zależności kinematycznych osi obrabiarki Phoenix do obróbki koła



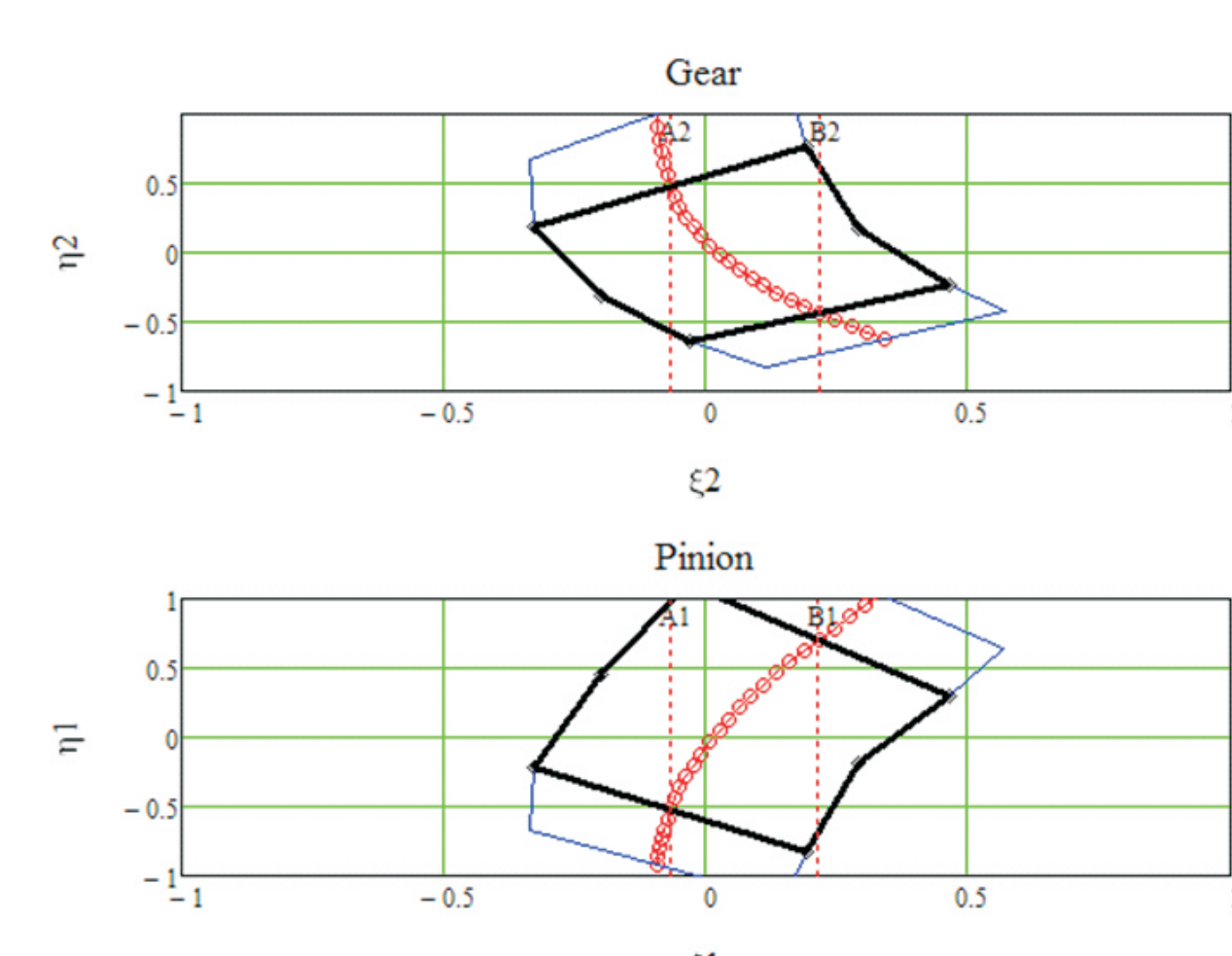
Rys. 4. Funkcje oraz wykresy zależności kinematycznych osi obrabiarki Phoenix do obróbki zębniaka

#### TCA - wyniki analizy na podstawie opracowanego programu

Wykresy śladu współpracy jedno- i dwuparowej przekładni 14x43 na tle przekroju osiowego zęba koła i zębniaka



Rys. 5. Wykresy: a) śladu współpracy powierzchni bocznych zębów oraz b) nierównomierności przenoszenia ruchu, wykonane dla czynnej strony ząbienia pary 14x43



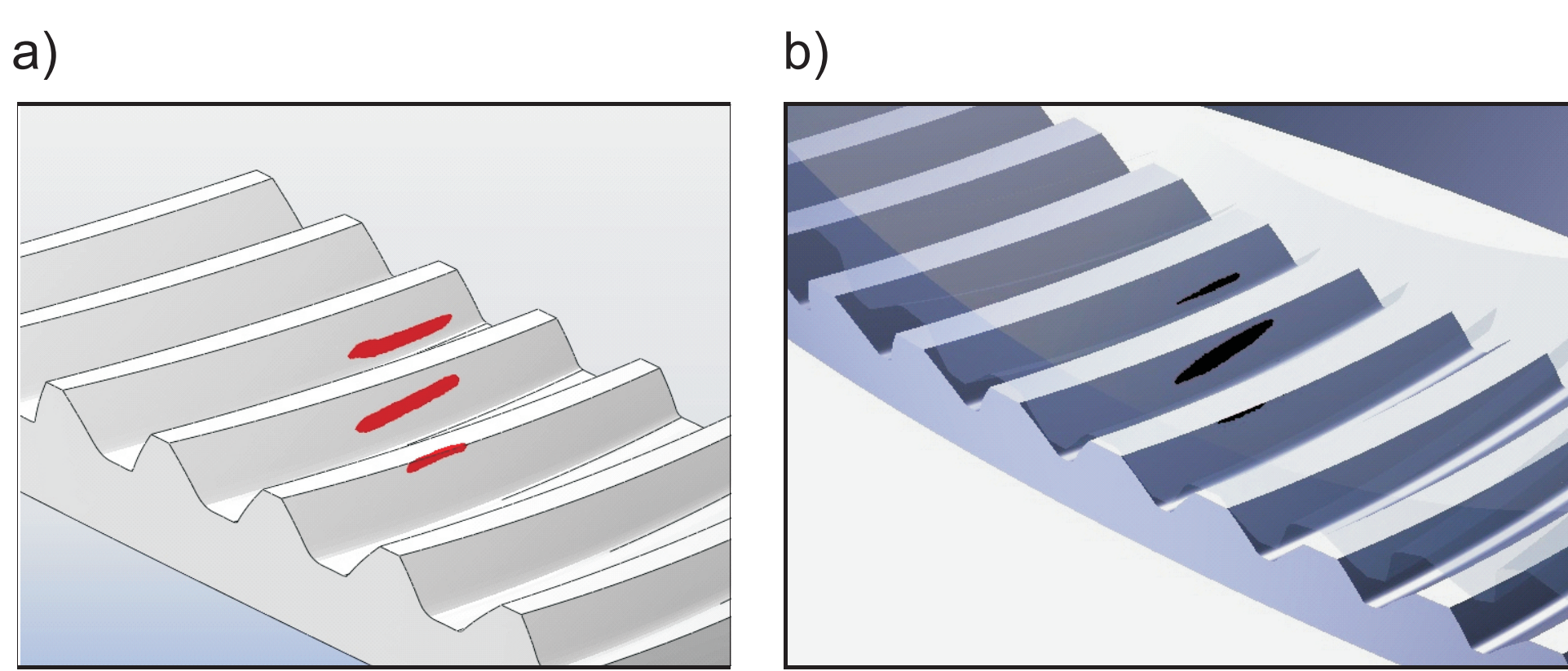
Rys. 6. Wykresy: a) współpracy powierzchni bocznych zębów oraz b) nierównomierności przenoszenia ruchu, wykonane dla biernej strony ząbienia pary 14x43

Opracowano 2 odmienne metody wyznaczania śladu współpracy: 1. metoda dla powierzchni zębów zapisanych w postaci równań algebraicznych; 2. metoda dla powierzchni zębów określonych w sposób dyskretny, za pomocą siatki punktów.

#### 3. Opracowanie procedury analizy śladu współpracy i nierównomierności ruchu przekładni obciążonej (LTCA) z wykorzystaniem MES oraz wykonanie analizy stanu naprężeń (Etap III)

W analizie stanu naprężeń skupiono się głównie na wyznaczeniu wyników obliczeń numerycznych dotyczących: naprężeń stykowych na bokach współpracujących zębów kół przekładni stożkowej, naprężeń zginających u podstawy zęba, chwilowych śladów współpracy zębów, sumarycznych śladów współpracy oraz wykresów nierównomierności ruchu dla kół zębnych przekładni stożkowej.

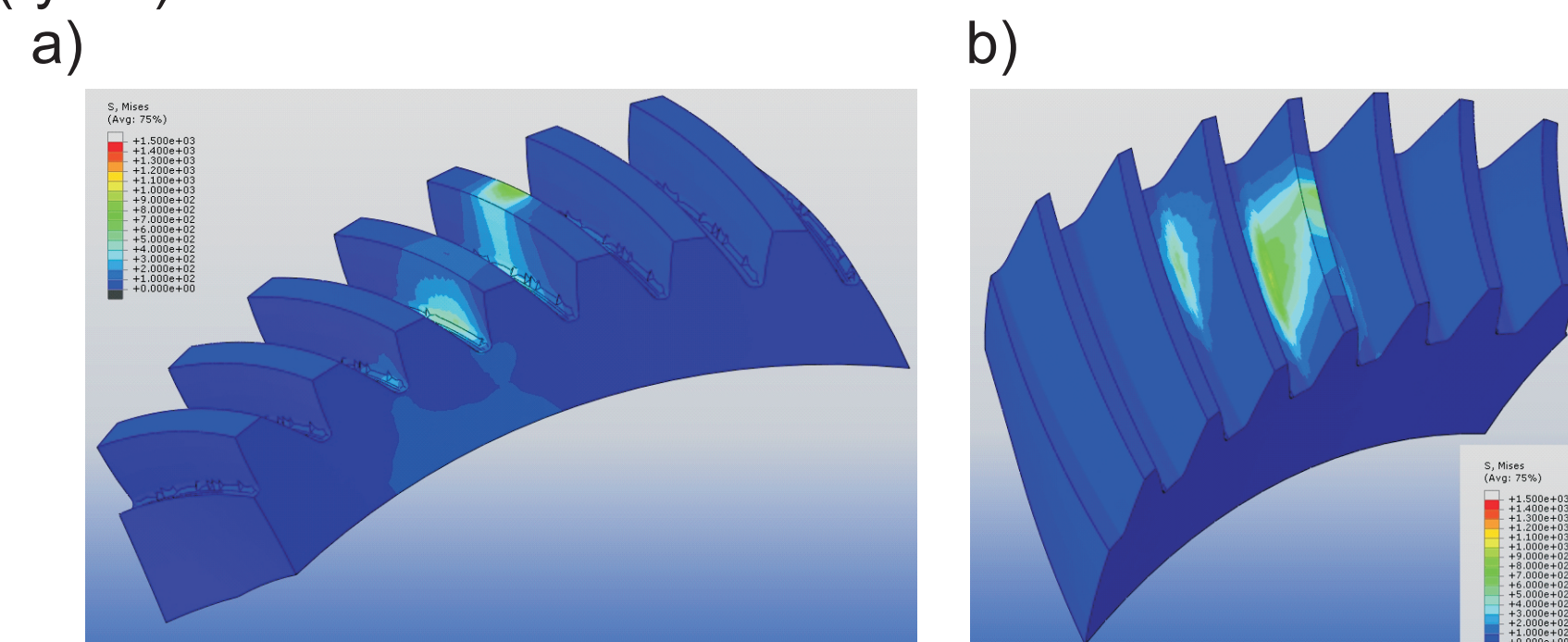
W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano rozwiązania określające rozkłady i poziom naprężeń stykowych na powierzchniach bocznych zębów oraz chwilowe i sumaryczne ślady współpracy. Wyznaczone ślady współpracy zestawiono z otrzymanymi przy pomocy symulacji współpracy z zastosowaniem modeli CAD.



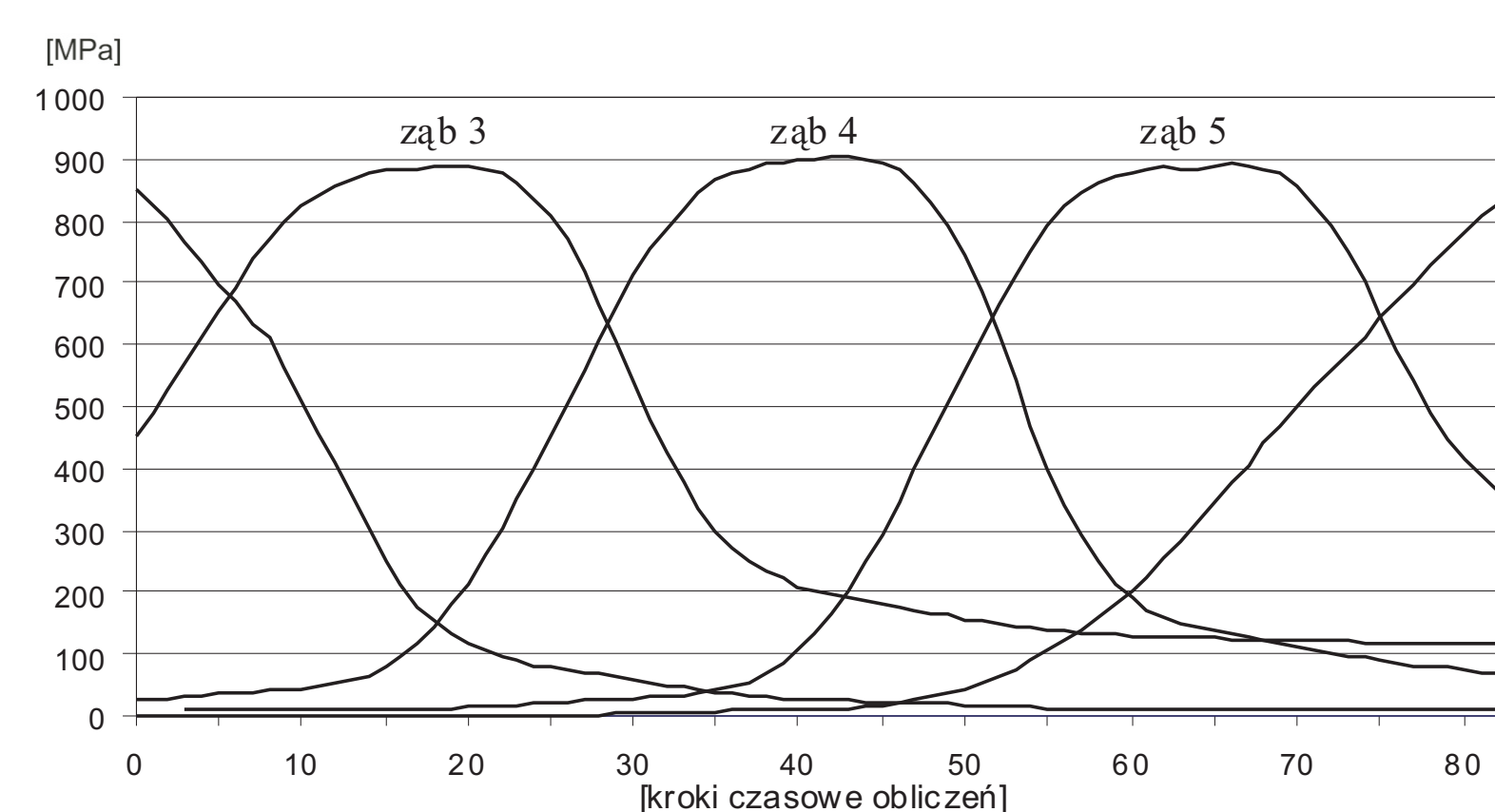
Rys. 7. Chwilowe ślady współpracy dla koła zębatego uzyskane na podstawie: a) obliczeń MES, b) symulacji CAD

W zakresie naprężeń stykowych na boku zęba, wyniki obliczone na podstawie norm oraz uzyskane numerycznie nie różniły się znacząco. Wartość naprężeń stykowych na boku zęba, wyznaczona na podstawie ISO 10300 wynosiła 1316,83 [Mpa]. Najwyższy określony w wyniku obliczeń numerycznych poziom naprężeń osiągnął wartości: dla zębniaka 1320 [MPa], a dla koła 1303 [MPa]. Szczególnie dla koła zębatego, jest to wartość nadspodziewanie bliska do otrzymanej w wyniku obliczeń analitycznych, co może potwierdzać dużą dokładność wykonania modeli i staranne przygotowanie obliczeń numerycznych.

Maksymalne naprężenia zginające określano w metodzie MES, bezpośrednio na modelach kół zębnych (rys. 8), oraz na podstawie utworzonych wykresów obciążenia zębów u podstawy (rys. 9).



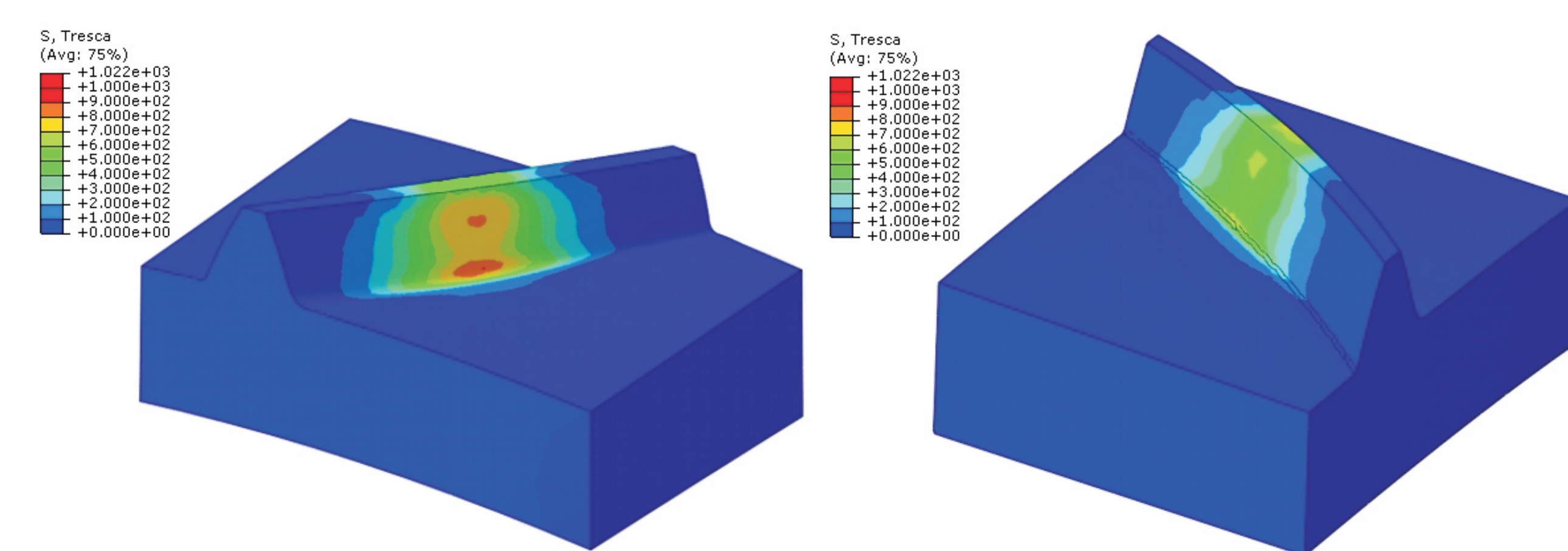
Rys. 8. Rozkłady naprężeń zredukowanych dla modeli kół przekładni stożkowej: a) zębniak, b) koło



Rys. 9. Naprężenia zginające u podstawy zęba przekładni stożkowej

Zauważono rozbieżności w wielkościach naprężeń zginających wyznaczonych zgodnie z zaleceniami normy ISO 10300 i w programie Abaqus. Zarówno w przypadku zębniaka, jak i koła analizowanej przekładni stożkowej, w wyniku obliczeń analitycznych otrzymano znacznie wyższe wartości naprężeń zginających.

Przeprowadzono więc dodatkowe obliczenia numeryczne MES dotyczące pojedynczego zęba obciążonego dwukrotnie, po stronie wypukłej i wklęsłej. Potwierdziły one, że dla przekładni stożkowych o kołowo-lukowej linii zęba, poziom naprężeń zginających u podstawy zęba w dużej mierze zależy od kierunku działającego obciążenia.

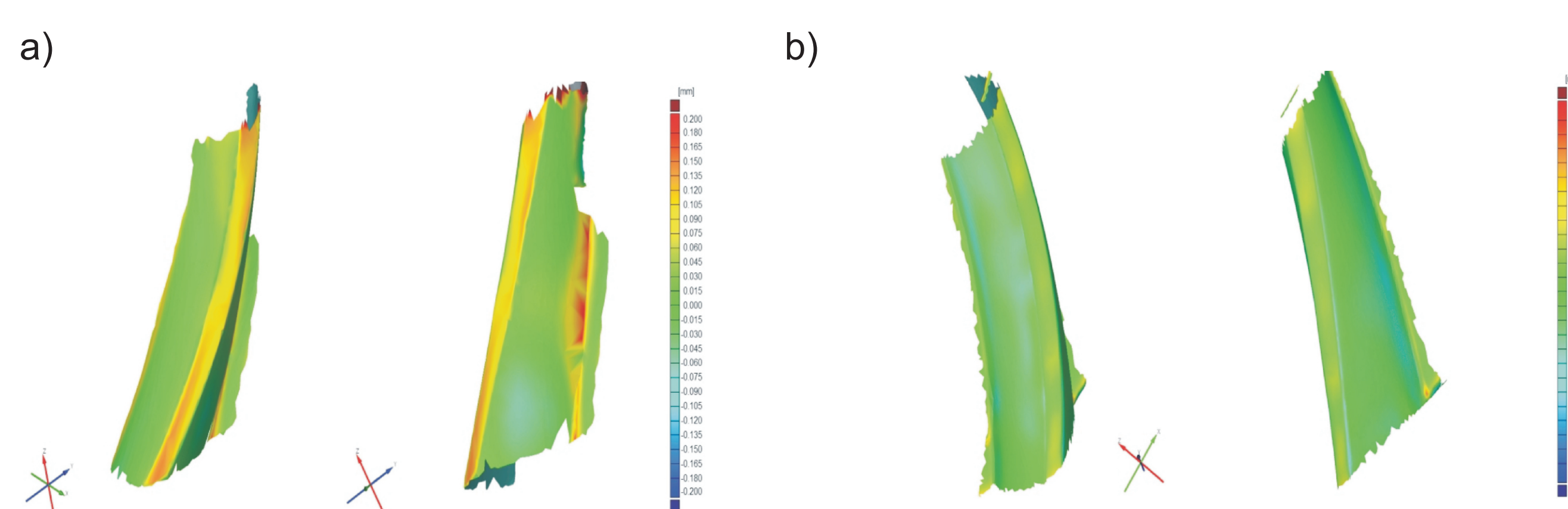


Rys. 8. Rozkłady naprężeń dla modeli obliczeniowych, odzwierciedlających charakter pracy zęba: a) zębniaka, b) koła

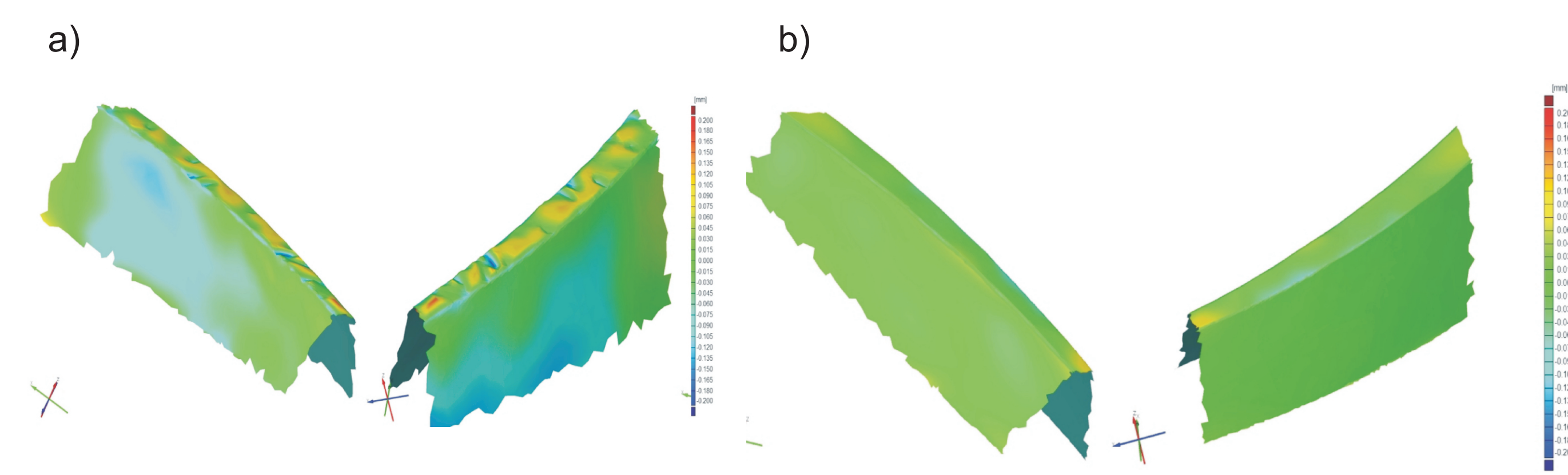
#### 4. Opracowanie i wykonanie analizy dokładności geometrycznej stożkowych kół zębnych z zastosowaniem współrzędnościowych optycznych metod pomiarowych

Przeprowadzone optyczne pomiary koła i zębniaka, wykonanych dwiema przyrostowymi metodami RP (SLA - stereolitografia i FDM - Fused Deposition Modeling) pozwoliły na szybkie określenie rzeczywistej dokładności wykonania stożkowych kół zębnych. W przypadku konieczności uzyskania wyników o wysokiej dokładności należy wykonać pomiary z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej. Możliwa do przeprowadzenia dekompozycja odchyłek kół zębnych na odchyłki elementarne pozwala wyizolować poszczególne parametry technologiczne urządzeń RP, które w dominujący sposób mogą wpływać na powstające odchyłki.

Na rys. 9 i 10 przedstawiono przykładowy efekt pomiarów kół systemem optycznym GOM.



Rys. 9. Odchyłki geometrii boków zęba zębniaka wykonanego metodą: a) FDM (wartości nie przekraczają 0,13 mm), b) SLA (wartości nie przekraczają 0,05 mm)



Rys. 10. Odchyłki geometrii boków zęba koła wykonanego metodą: a) FDM (wartości nie przekraczają 0,12 mm), b) SLA (wartości nie przekraczają 0,05 mm)

### Wnioski

Ad. 1,2. Przyjęta koncepcja wykorzystania rachunku macierzowego do tworzenia wirtualnych modeli obrabiarek (konwencjonalnej i numerycznej) oraz układów technologicznych, okazała się słuszną. Za pomocą macierzy zdefiniowano układy współrzędnych, modelujące narzędzie oraz poszczególne zespoły funkcyjne obrabiarki. Określono wzajemne zależności geometryczne i kinematyczne między układami, wyznaczając macierz przejścia układu związanego z narzędziem do układu związanego z obrabianym zębniakiem. Opracowany model matematyczny obrabiarki Phoenix wykorzystuje ustawienia, generowane dla maszyny klasycznej 116. Wielkość ustawcze tej obrabiarki są zaaplikowane do układu roboczego maszyny Phoenix z odwrotaniem jej możliwości kinematycznych. Opracowana metoda wyznaczania funkcji ruchu osi sterowanych obrabiarki numerycznej Phoenix pozwala na samodzielne projektowanie obróbki według klasycznych metod Gleasona.

Ad. 3. Zaprezentowaną metodę obliczeń geometrycznych i wytrzymałościowych oparto o normy ISO. Obliczenia numeryczne wykonano w programie Abaqus. Zestawienie wyników otrzymanych w obliczeniach analitycznych z odpowiadającymi im rozwiązaniami uzyskanymi w MES, pozwoliło ocenić ich poprawność i uzasadnić zasadność stosowania obydwu metod przy projektowaniu kół zębnych przekładni stożkowej.

Ad. 4. Dobór systemów pomiarowych do analizy geometrii kół stożkowych powinien odbywać się z uwzględnieniem dokładności wykonania tych kół, rodzaju materiałów w których wykonane zostały koła oraz z uwzględnieniem potrzeb pomiarowych. Poprzez pomiar i analizę parametrów geometrycznych kół zębnych można dokonać kompensacji błędów oraz wyznaczyć się wartości korekcyj dla urządzeń RP.

### Przykłady zastosowania w lotnictwie

Podnoszenie efektywności procesu przygotowania produkcji oraz kontroli jakości przekładni stożkowych. Na fotografii przekładnia główna W-3 Sokół (uzębienie o zmiennej wysokości typu Gleason)



### Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym

Wizyta studyjna w firmie Pratt&Whitney Kalisz w celu konsultacji i weryfikacji wyników prac w zakresie aplikacji ustawień obrabiarki konwencjonalnej na obrabiarkę numeryczną Phoenix. Konsultacje pozwoliły na opracowanie i sprawdzenie metodyki przekształcania ustawień obrabiarki konwencjonalnej 116 na obrabiarkę numeryczną Phoenix.

### Wskaźniki realizacji celów projektu

#### Referaty

- Marciniak A., Grzelka M., Wieczorowski M., Budzik G., Sobolewski B.: **Ocena dokładności prototypów stożkowych kół zębnych z zastosowaniem CMM**. Konferencja naukowo-techniczna „Przekładnie Zębate 2010”, Kraków 24 09 2010. Artykuł przyjęty do publikacji w Czołpiśmie Technicznym.
- Marciniak A., Sobolewski B.: **Symulacja nacinania uzębienia kół stożkowych w środowisku Inventor 2010**. IX Forum Inżynierskie ProCAx, Sosnowiec-Siewierz 2010. Referat przyjęty do druku w czasopiśmie „Mechanik”.
- Pisula J., Płocica M.: **Zastosowanie modelowania matematycznego i środowiska CAD w projektowaniu przekładni stożkowych**. IX Forum Inżynierskie ProCAx, Sosnowiec-Siewierz 2010. Referat przyjęty do druku w czasopiśmie „Mechanik”.
- Dziubek T., Budzik G.: **Automatyzacja pomiaru stożkowych kół zębnych w systemie GOM**. III Międzynarodowe Seminarium Studentów Kół Naukowych i Studiów Doktoranckich INŻYNIERIA WYTWARZANIA, PWSZ Kalisz 2010.
- Sobolewski B., Zaborniak M.: **Modelowanie uzębienia kół zębnych walcowych i stożkowych metodą symulacji obróbki**. III Międzynarodowe Seminarium Studentów Kół Naukowych i Studiów Doktoranckich INŻYNIERIA WYTWARZANIA, PWSZ Kalisz 2010.

#### Publikacje

- Marciniak A., Markowski T., Budzik G., Trytek A., Kozik B., Bernacki J., Pacana J., Matysiak H., Banas A.: **Application of ZP131 powder for manufacture of casting molds using ZCast technology for Al-alloys casting**. Archives of Foundry Engineering, Vol. 10, Special Issue 1/2010, s.423-426

#### Prace mgr, dr, hab.

- Prace magisterskie obronione:**  
Chmielowiec Witold: **Geometria i kinematyka kształtowania uzębienia kół stożkowych na obrabiarkach kołowych systemu Gleason**. Promotor: dr inż. Mieczysław Płocica  
Fał Piotr: **Symulacja obróbki kół zębnych nacinanych metodami SGM**. Promotor: dr hab. inż. Adam Marciniak.

#### Prace magisterskie planowane

- Dziubek Tomasz: **Model matematyczny i CAD uzębienia kół stożkowych wykonanych metodą Duplex Helical**. Promotor: dr hab. inż. Pisula Jadwiga, planowany termin obrony: luty 2012  
Bieńkowski Marcin: **Symulacja śladu współpracy przekładni stożkowej generowanej metodami spread blade fixed setting Gleasona**. Promotor: dr inż. Pisula Jadwiga, planowany termin obrony: luty 2012  
Dudek Paweł: **Symulacja generowania uzębienia kół stożkowych metodą SGT i SFT firmy Gleason w systemie Inventor**. Promotor: dr inż. Pisula Jadwiga, planowany termin obrony: luty 2012  
Borek Dariusz: **Wyznaczanie śladu współpracy zębów przekładni zębatej stożkowej z wykorzystaniem MES**. Promotor: dr inż. Pisula Jadwiga, planowany termin obrony: luty 2012

#### Prace doktorskie

- Tytuł: **Analiza wytrzymałościowa lotniczych przekładni stożkowych o kołowo-lukowej linii zęba**  
Autor: mgr inż. Jacek Sowa  
Promotor: dr hab. inż. Adam Marciniak  
Status: w realizacji, przewód otwarty na WBMIL PRz w 2009r.

- Tytuł: **Analiza współrzędnościowych systemów pomiarowych kół zębnych**  
Autor: mgr inż. Dziubek Tomasz  
Promotor: dr hab. inż. Budzik Grzegorz, prof. PRz  
Status: przygotowanie do otwarcia przewodu. Otwarcie 15.12.2010 r.

- Tytuł: **Identyfikacja geometrii kół zębnych z wykorzystaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej i systemów CAD**  
Autor: mgr inż. Małgorzata Zaborniak  
Promotor: dr hab. inż. Adam Marciniak  
Status: przewód otwarty na WBMIL PRz w 2010r.