

MODEL CIEPLNY ELEKTROWRZECIONA

JAN KOSMOL
KRZYSZTOF LEHRICH

*Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska
e-mail: jkosmol@polsl.pl
e-mail: krzysztof.lehrich@polsl.pl*

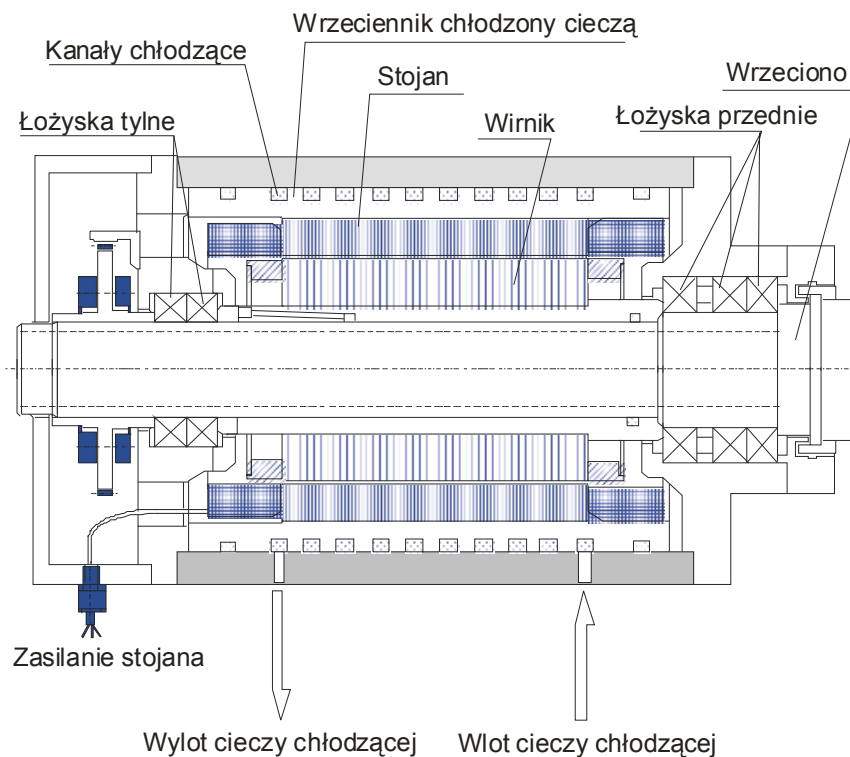
Streszczenie. W artykule przedstawiono model numeryczny w konwencji metody elementów skończonych, tzw. elektrowrzeciona obrabiarki oraz przykładowe wyniki badań symulacyjnych rozptywu ciepła w takim napędzie. Celem tych badań jest poznanie rozkładu temperatury we wrzecienniku obrabiarki i ocena wpływu prędkości obrotowej wrzeciona na maksymalne wartości temperatury.

1. WPROWADZENIE

Ogólną tendencją w rozwoju obrabiarek skrawających jest dążenie do wzrostu wydajności. Ta tendencja przejawia się m.in. w formie rosnących parametrów kinematycznych, tj. prędkości obrotowych i liniowych, ale i przyspieszeń. Wzrastające prędkości przyczyniają się do coraz większego wpływu drgań wymuszonych o wyższych częstotliwościach na jakość działania obrabiarki. Jedną z możliwych dróg przeciwdziałania takiemu stanowi rzeczy jest dążenie do zmniejszenia albo i całkowitego usunięcia elementów mechanicznych takich jak wałki, koła zębate, łożyska z łańcuchów kinematycznych napędów obrabiarkowych. Prowadzi to do powstania napędów zintegrowanych, tzn. do łączenia zespołów silnika i zespołu roboczego obrabiarki (zespołu napędzanego) w jedną funkcjonalną całość. Przykładem takiego rozwiązania konstrukcyjnego napędu zintegrowanego jest tzw. elektrowrzeciono.

Na rys. 1 przedstawiono schematycznie koncepcję elektrowrzeciona [1].

Zespół roboczy napędzany, tj. wrzeciono, który jest ułożyskowany w korpusie zwanym wrzeciennikiem, w klasycznym rozwiązaniu konstrukcyjnym napędzany jest poprzez łańcuch kinematyczny, zawierający silnik napędowy i liczne koła zębate, pasowe oraz wałki i łożyska (te elementy znajdują się albo w oddzielnym korpusie zwanym skrzynka prędkości albo w korpusie wrzeciennika). Natomiast rozwiązanie konstrukcyjne elektrowrzeciona na rys. 1 jest pozbawione łańcucha kinematycznego, przy czym stojan silnika elektrycznego jest zamocowany (unieruchomiony) w korpusie wrzeciennika, a wirnik silnika jest zamocowany na wale wrzeciona. Tak więc wrzeciono i wirnik silnika stanowią jeden wspólny zintegrowany zespół, a korpus wrzeciennika i stojan silnika drugi, wspólny, zintegrowany zespół. Najważniejszą zaletą takiego zintegrowanego rozwiązania konstrukcyjnego napędu wrzeciona jest wyraźne zmniejszenie liczby elementów mechanicznych w łańcuchu kinematycznym, co pozwala na wyższe prędkości obrotowe wrzeciona, które do tej pory były ograniczone możliwością powstawania drgań elementów wirujących (kół zębatach, wałków).



Rys. 1. Koncepcja elektrowrzeciona obrabiarki

Przedstawione na rys. 1 rozwiązanie konstrukcyjne ma także istotną wadę, której klasyczne rozwiązania napędów wrzecion nie posiadają. Nieuniknione straty ciepła w silniku napędowym, zamkniętym obecnie w korpusie wrzeciennika, oddziałują na łożyskowanie wrzeciona i samo wrzeciono, powodując jego odkształcenia cieplne [3],[4]. Te ostatnie znacząco mogą pogorszyć jakość działania obrabiarki, przyczyniając się do błędów geometrycznych przedmiotów wykonywanych na takiej obrabiarence.

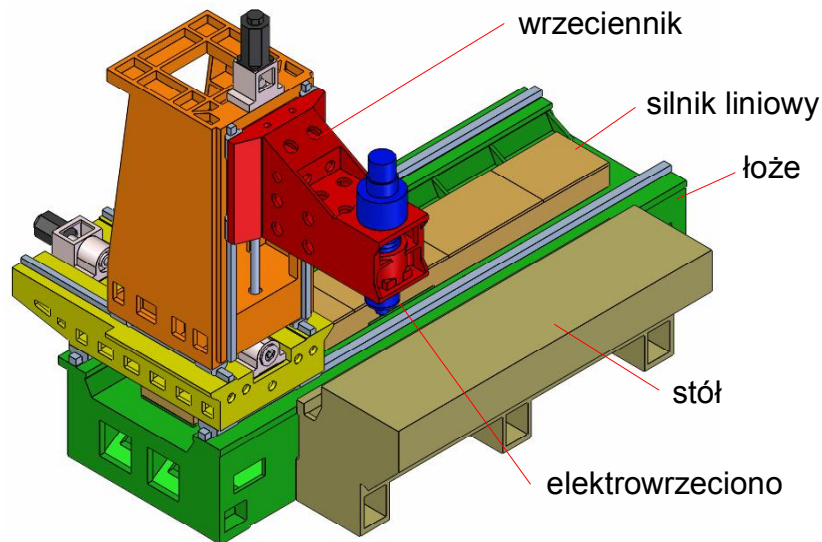
Z punktu widzenia projektanta obrabiarki istotna jest wiedza o wpływie prędkości obrotowej wrzeciona na wysokość i rozkład temperatury wewnątrz wrzeciennika oraz na odkształcenia cieplne, występujące przede wszystkim na końcu wrzeciona (tam, gdzie mocowany jest przedmiot obrabiany lub narzędzie skrawające). Na podstawie tej wiedzy projektant może skonstruować odpowiedni układ chłodzenia elektrowrzeciona, a zwłaszcza strukturę kanałów chłodzących.

2. PRZEDMIOT BADAŃ MODELOWYCH

W artykule przedstawiono metodę badań cieplnych elektrowrzeciona obrabiarki na przykładzie wrzeciennika prototypowego centrum frezarskiego, pokazanego na rys. 2.

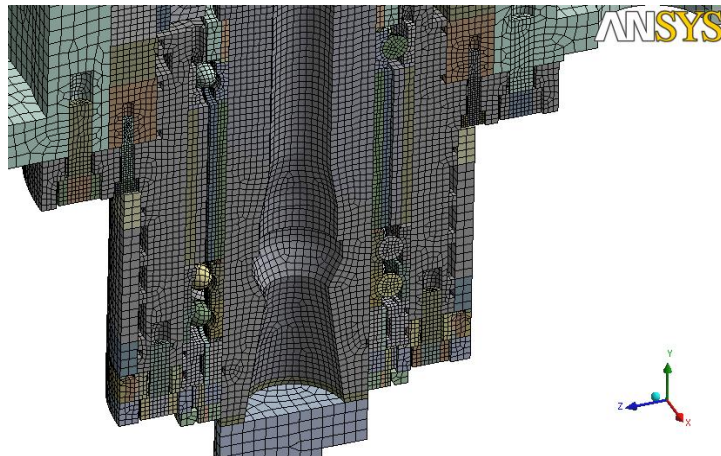
W obrabiarence tej zastosowano elektryczny silnik synchroniczny umożliwiający bezstopniową zmianę prędkości $0 \div 12\,000$ obr/min. Regulacja prędkości odbywa się w dwóch zakresach, w zakresie tzw. stałego momentu ($0 \div 4.300$ obr/min), kiedy steruje się napięciem wirnika oraz w zakresie tzw. stałej mocy (4.300 obr/min \div 12.000 obr/min), kiedy steruje się polem magnetycznym (poprzez osłabienie strumienia magnetycznego). Sposób sterowania prędkością ma zasadniczy wpływ na ilość ciepła powstającego w silniku elektrycznym. Ponieważ konstrukcja wrzeciennika z elektrowrzecionem została opracowana przez doświadczonych projektantów [2], przyjęto, że jest ona właściwa. Celem badań symulacyjnych była ocena stanu cieplnego takiego elektrowrzeciona w funkcji prędkości

obrotowej i odpowiedź na pytanie: czy możliwa jest prawidłowa eksploatacja elektrowrzeciona w zakresie do 12.000 obr/min.



Rys. 2. Prototyp centrum frezarskiego [2]

Na podstawie dokumentacji CAD wrzeciennika utworzono modele MES (rys. 3) w systemie Ansys. Analizę numeryczną przeprowadzono jako analizę liniową.



Rys.3. Fragment modelu geometrycznego MES wrzeciennika

Najistotniejsze, z punktu widzenia celu symulacji, były:

- źródła ciepła występujące we wrzecienniku,
- parametry cieplne determinujące rozptył ciepła.

Na rys. 4 zaznaczono najważniejsze źródła ciepła, które zostały zdefiniowane dla celów niniejszej analizy. Są to:

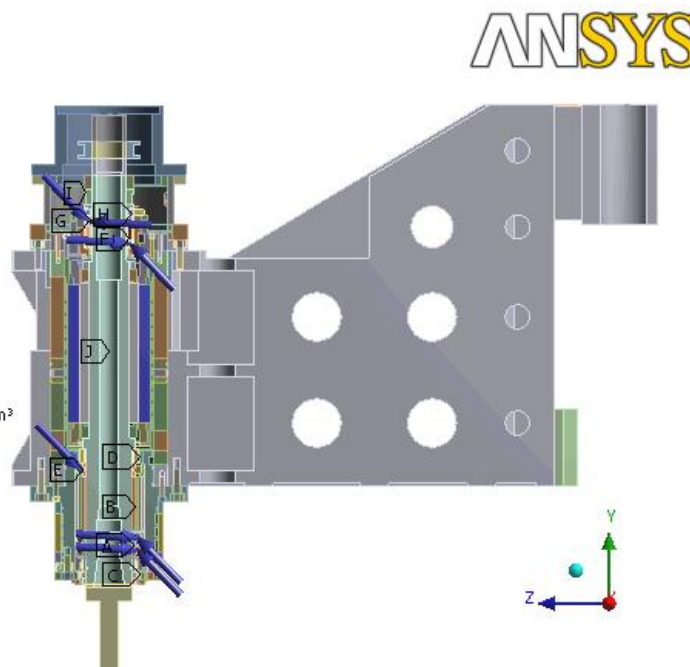
- ciepło wytwarzane w samym silniku elektrycznym (J), które powstaje w wyniku przepływu prądu przez uzwojenia stojana silnika,
- ciepło wytwarzane w łożyskach wrzeciona (przednich i tylnych) w wyniku oporów tarcia (łożyska stosowane we wrzecienniku są wstępnie napięte, stąd opory ruchu na biegu jałowym są funkcją tego napięcia).

Ponieważ badania symulacyjne prowadzono dla stanu nieobciążonego (na biegu jałowym), nie definiowano dodatkowych oporów ruchu, wynikających np. z sił skrawania.

Internal Heat Generation razy

Time: 8400, s
2009-07-15 09:35

- A** lozysko przod wsp 0,1: 29,875 W
- B** lozysko przod 2 wsp 0,1: 29,875 W
- C** lozysko przod 3 wsp 0,1: 29,875 W
- D** lozysko przod 4 wsp 0,1: 29,875 W
- E** lozysko przod 5 wsp 0,1: 29,875 W
- F** lozysko tyl wsp 0,1: 10,463 W
- G** lozysko tyl 2 wsp 0,1: 10,463 W
- H** lozysko tyl 3 wsp 0,1: 10,463 W
- I** lozysko tyl 4 wsp 0,1: 10,463 W
- J** Internal Heat Generation razy: 1,7559e-003 W/mm³



Rys. 4. Miejsca usytuowania źródeł ciepła we wrzecienniku

Ciepło powstające w łożyskach przyjęto jako wprost proporcjonalne do napięcia wstępnego (w tym przypadku do 10% nośności dynamicznej łożysk C_d) oraz do prędkości obrotowej wrzeciona n_{WR}

$$Q_L = k \cdot 0,1 C_d \mu \cdot n_{WR} \quad (1)$$

gdzie:

- Q_L – ciepło powstające w łożysku tocznym,
- C_d – nośność dynamiczna łożyska,
- n_{WR} – prędkość obrotowa wrzeciona,
- μ – współczynnik tarcia w łożysku tocznym,
- k – współczynnik proporcjonalności wynikający z wymiarów geometrycznych łożyska.

Ciepło powstające w silniku elektrycznym Q_s (w stojanie silnika, ponieważ wirnik silnika miał postać magnesów trwałych) przyjęto jako proporcjonalne do mocy traconej przy przepływie prądu i przez przewodnik o rezystancji R (rezystancja uzwojenia trójfazowego):

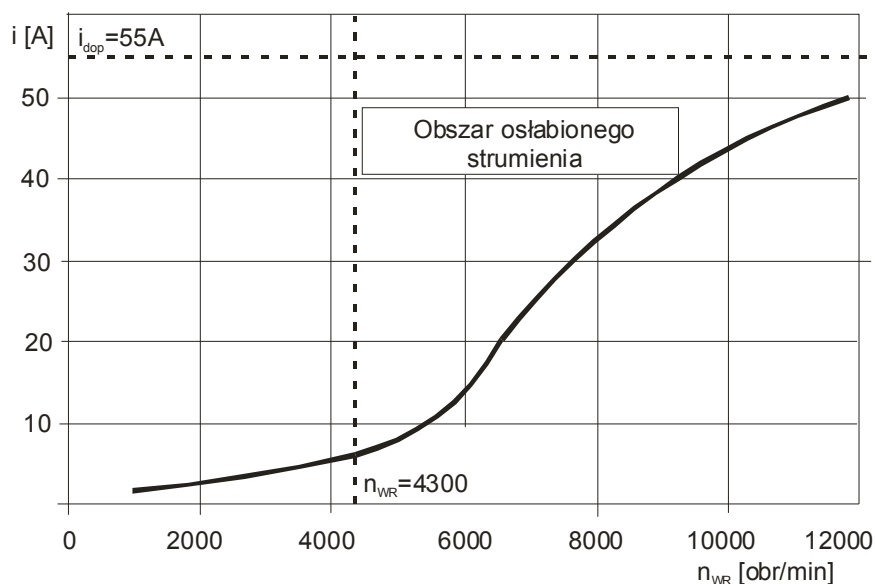
$$Q_s = 3i^2 R \quad (2)$$

gdzie:

- Q_s – ciepło powstające w silniku elektrycznym,
- i – wartość skuteczna prądu płynącego w stojanie,
- R – rezystancja uzwojenia stojana (jednej fazy).

Zasadniczy problem, jaki występuje przy obliczaniu ciepła Q_s , wiąże się ze znajomością prądu i w funkcji prędkości obrotowej n_{WR} . W silniku, w którym wirnik ma postać magnesu trwałego, strumień wzbudzenia jest nieregulowany.

Aby można było sterować prędkością obrotową w zakresie osłabionego strumienia wzbudzenia do stojana silnika należy doprowadzić dodatkowy prąd (wyższy aniżeli wynika to z potrzeb momentu elektromagnetycznego), który wytworzy pole magnetyczne skierowane przeciwnie do pola magnetycznego wytwarzanego przez magnesy trwałe wirnika. Znajomość charakterystyki prądowej jako funkcji prędkości obrotowej jest w tym przypadku konieczna. Na rys. 5 przedstawiono taką charakterystykę dla silnika, który był przedmiotem symulacji.



Rys. 5. Charakterystyka prądowa silnika synchronicznego na biegu jałowym

Z rys. 5 wynika m.in., że przy prędkościach obrotowych powyżej 4.300 obr/min (jest to prędkość znamionowa silnika) wielkość prądu gwałtownie wzrasta i przy maksymalnej prędkości 12.000 obr/min niewiele różni się od maksymalnej dopuszczalnej dla takiego silnika wartości prądu, tj. 55A. Z tego rysunku wynika również jednoznacznie, że ilość ciepła powstającego w silniku wzrasta w sposób nieliniowy wraz z prędkością obrotową.

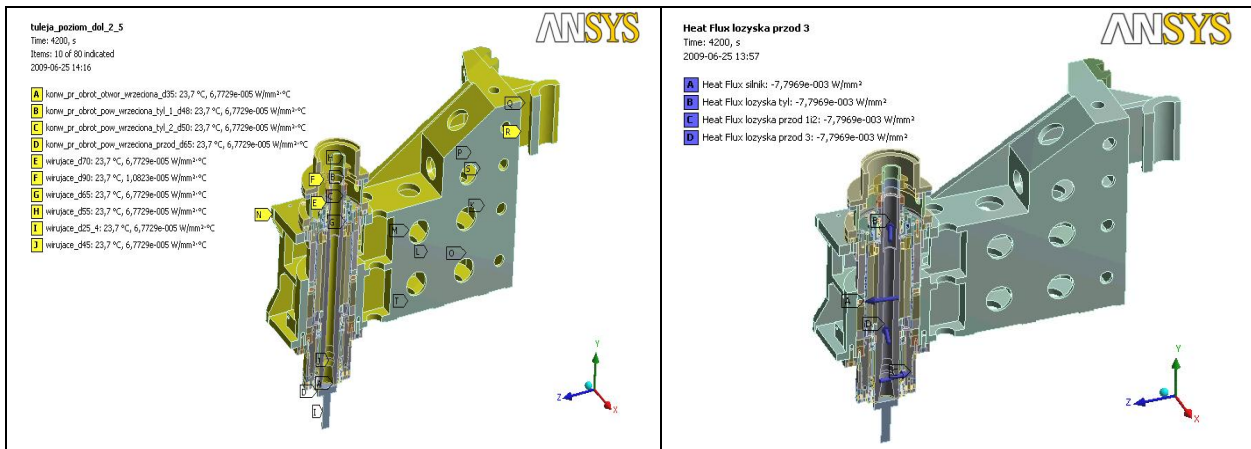
W tabelicy 1 przedstawiono wartości mocy źródeł ciepła, których użyto w badaniach symulacyjnych elektrowrzciona. Moce źródeł ciepła obliczono dla 5 prędkości obrotowych, dla których przeprowadzono badania symulacyjne. Z informacji zawartych w tabelicy wynika jednoznacznie, że o ilości ciepła wytwarzanego we wrzecienniku decyduje w pierwszym rzędzie silnik elektryczny oraz, że ze wzrostem prędkości obrotowej moc tracona w silniku rośnie silnie nieliniowo.

Drugi istotny problem modelowania zjawisk cieplnych w elektrowrzcieniu wiąże się z wartościami parametrów takich jak współczynniki konwekcji, promieniowania, przewodności cieplnej czy ciepła właściwego. Znaczące trudności w zidentyfikowaniu rzeczywistych wartości tych parametrów spotyka się w odniesieniu do materiałów na magnesy trwałe, w tym przypadku Alliance N-33 Neodymium Iron Boron. Producenci silników z magnesami trwałymi nie publikują takich informacji, a ich precyzyjna znajomość jest nieodzowna do uzyskania realnych wartości temperatury.

Tablica 1. Moce źródeł ciepła przyjęte do badań symulacyjnych

Prędkość obrotowa wrzeciona	Straty w silniku	Podpora przednia (straty w łożysku)	Podpora tylna (straty w łożysku)
obr/min	W	W	W
1000	21,0	16,4	5,7
7000	1126,0	114,9	40,4
9000	1701,0	147,7	51,8
10000	1935,0	164,1	57,5
12000	2274,0	196,9	69,0

Na rys. 6a przedstawiono przykładowo powierzchnie konwekcyjne zdefiniowane dla potrzeb symulacji, a na rys. 6b strumienie ciepła w kanałach chłodzących. W silniku zastosowano wymuszony układ chłodzenia za pomocą pompy i chłodnicy. Dla celów badań symulacyjnych elektrowrzeciona przyjęto, że temperatura cieczy chłodzącej na wejściu do elektrowrzeciona jest stała (22°C), a ilość odprowadzanego ciepła przez ciecz chłodzącą jest proporcjonalna do natężenia przepływu cieczy (dla zastosowanej pompy $7\text{ dm}^3/\text{min}$), ciepła właściwego cieczy (glikol 75%) i różnicy temperatur na wyjściu i wejściu do elektrowrzeciona. Tę ilość ciepła w postaci strumieni cieplnych przypisano do kanałów chłodzących, proporcjonalnie do ich powierzchni.

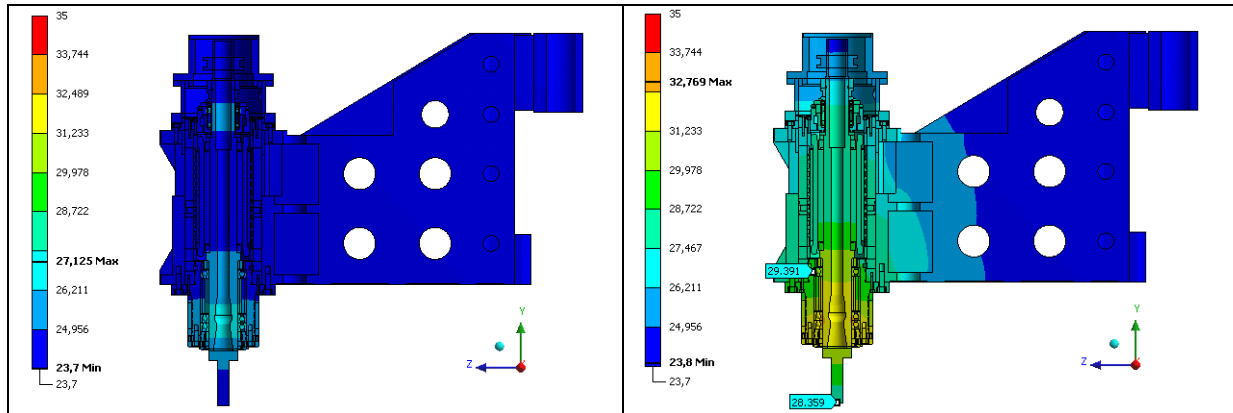


Rys. 6. Definicja warunków cieplnych a) zdefiniowane powierzchnie konwekcyjne, b) strumienie ciepłe w kanałach chłodzących

3. PRZYKŁADOWE WYNIKI SYMULACJI

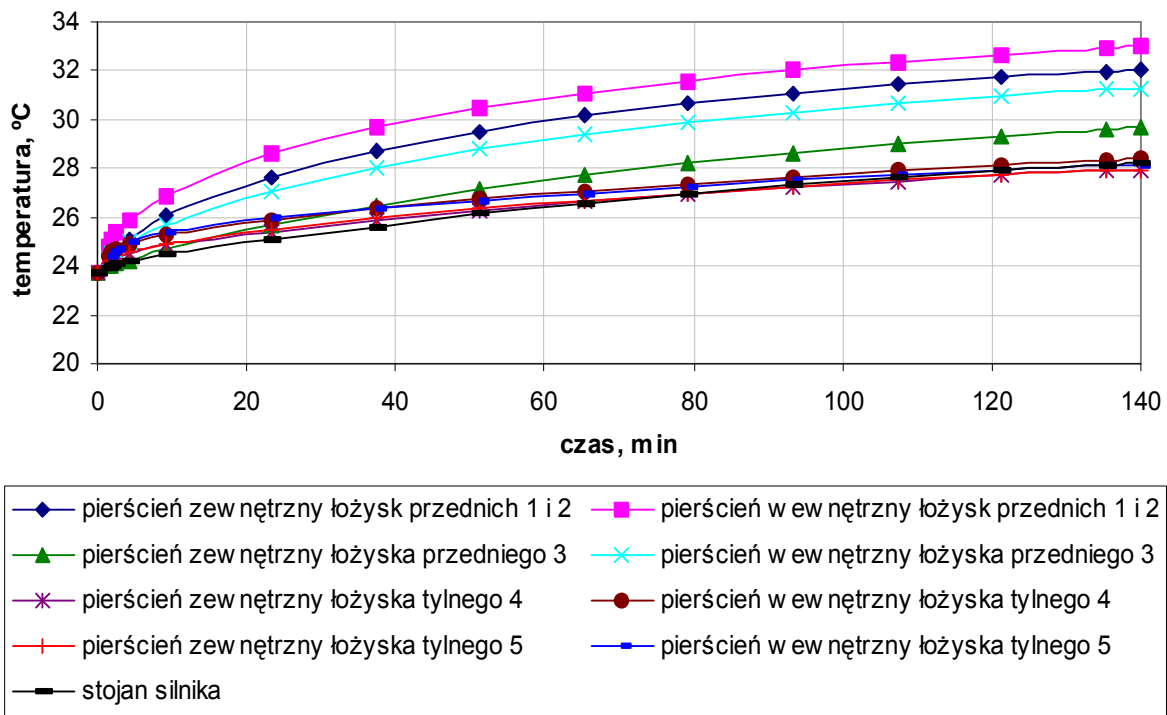
Dla zdefiniowanego modelu cieplnego elektrowrzeciona przeprowadzono badania symulacyjne rozprzysu ciepła i rozkładu temperatury. Badano przebieg temperatury w funkcji czasu dla wybranych 5 prędkości obrotowych.

Na rys. 7 przedstawiono przykładowy stan cieplny wrzeciennika dla $n_{WR} = 1000\text{ obr/min}$ po 10 i 120 minutach, natomiast na rys. 8 zbiorcze zestawienie przebiegu temperatury w wybranych punktach wrzeciennika.



Rys. 7. Przykładowe obrazy cieplne dla $n_{WR} = 1000$ obr/min po 10 min (a) i 120 min (b)

Z rys. 8 wynika, że dla prędkości obrotowej $n_{WR} = 1000$ obr/min temperatury nie przekraczają 35°C , natomiast na rys. 9 przedstawiono taki sam przebieg temperatury jak na rys. 8, ale dla prędkości $n_{WR} = 12.000$ obr/min.



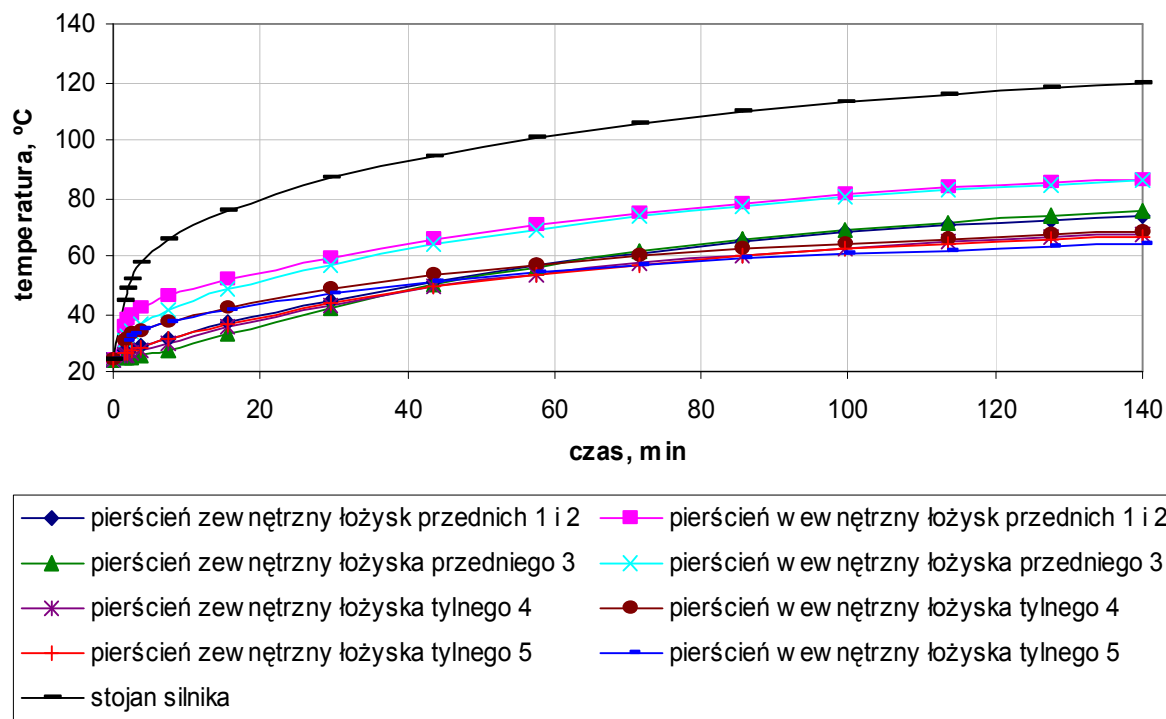
Rys. 8. Przebiegi temperatury w wybranych punktach dla $n_{WR} = 1000$ obr/min

Z rys. 12 wynika, że przy prędkości $n = 12.000$ obr/min stan cieplny wrzeciennika można uznać za niebezpieczny. Temperatura w łożyskach przekracza 80°C , a w silniku sięga 120°C . Można się więc spodziewać, że przy prędkościach zbliżonych do maksymalnych warunki pracy elektrowrzecionka mogą być niezadowalające (niebezpieczeństwo zatarcia łożysk lub demagnetyzacji wirnika silnika).

4. PODSUMOWANIE

Wzrost parametrów kinematycznych w zespołach obrabiarkowych może wymagać badań symulacyjnych poprzedzających wytwarzanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Warunkiem uzyskania wiarygodnych wyników symulacji jest w pierwszym rzędzie precyzyjne zdefiniowanie mocy źródeł ciepła, zwłaszcza związanych z przepływem prądu w

silniku oraz precyzyjne zidentyfikowanie parametrów cieplnych, zwłaszcza dotyczących tych grup materiałowych, z których wykonuje się magnesy trwałe.



Rys. 9. Przebiegi temperatury w wybranych punktach dla $n = 12.000$ obr/min

Model cieplny elektrowrzeciona musi uwzględnić model układu chłodzącego, bowiem nawet przy niskich prędkościach obrotowych temperatura we wrzecienniku przekroczy wartości dopuszczalne, jeżeli wyłączony zostanie układ chłodzący (w artykule nie przytoczono tych wyników badań symulacyjnych).

LITERATURA

1. Kosmol J.: Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie. Warszawa: WNT, 1998
2. Dokumentacja konstrukcyjna centrum frezarskiego FV-2. Pruszków: CBKO, 2008.
3. Jędrzejewski J.: Thermal problem in machine tools design and operation. In: Introduction to Precision Machine Design and Error Assessment. CRC Press, Taylor&Francis Group, London, 2009, p. 75-128
4. Jędrzejewski J., Modrzycki W.: High-speed machining centre modeling and simulation problems. Open and global manufacturing design. "Machine Engineering" 2005, No 2, p. 205 – 211.

THERMAL MODEL OF ELECTROSPINDEL

Summary. The paper presents an numerical model of electrospindel using finite elements method. Some results of simulation are shown. The flux of warmth and temperature distribution as a function of rotational speed of spindle are shown.