

doi:10.15199/48.2022.11.61

Zastosowanie i wpływ koncentratora pola magnetycznego w procesie hartowania indukcyjnego kół zębatych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki sprzężonej symulacji modelu obwodowego przekształtnika rezonansowego z modelem MES układu grzejjego wzbudnik-wsad dla nagrzewania indukcyjnego wysoką (HF) częstotliwością wynoszącą 300 kHz. Ponadto, porównano otrzymane wyniki symulacji sprzężonej dla dwóch trybów pracy układu grzejjego: z koncentratorom pola magnetycznego i bez koncentratora. Wsad w postaci koła zębatego został zamodelowany ze stopu stali konstrukcyjnej (C45) używanej powszechnie do produkcji tego typu elementów mechanicznych. Przekształtnik energoelektroniczny o mocy 3 kW został zamodelowany w postaci mostkowego falownika rezonansowego zasilanego z sieci 3×400 V poprzez prostownik z filtrem RC i obciążonego szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym. W wyniku badań symulacyjnych sprzężonych modeli uzyskano rozkłady pola magnetycznego i gęstości energii na powierzchni wsadu, charakterystyki gęstości energii w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba oraz wartości temperatury zarejestrowanej na wierzchołku zęba (w połowie jego wysokości) dla dwóch trybów pracy układu grzejjego i częstotliwości pracy 300 kHz.

Abstract. This paper presents a co-simulation FEM of induction heating of gears. The co-simulation was made in ANSYS used a circuit model (resonant inverter with MOSFET SiC transistors) and FEM model (coil, magnetic field concentrator and gear). The circuit model was built in a bridge structure of inverter with a series-parallel resonant circuit. The output power of inverter was 3 kW and the drain efficiency was equal to 96%. The simulation of models was made for C45 alloy steel of gear, and two type of induction heating of gear (with magnetic field concentrator and without him) at operating frequency of 300 kHz. Additionally, in this paper presents a distribution of magnetic induction in the gear, energy density in the gear, the characteristics of energy density in a single tooth on the length 8 mm and the temperature of tooth tip for two type of induction heating. (The use and influence of a magnetic field concentrator in the induction hardening of gears)

Słowa kluczowe: koncentrator pola magnetycznego, koła zębate, analiza MES, nagrzewanie indukcyjne, falownik rezonansowy.

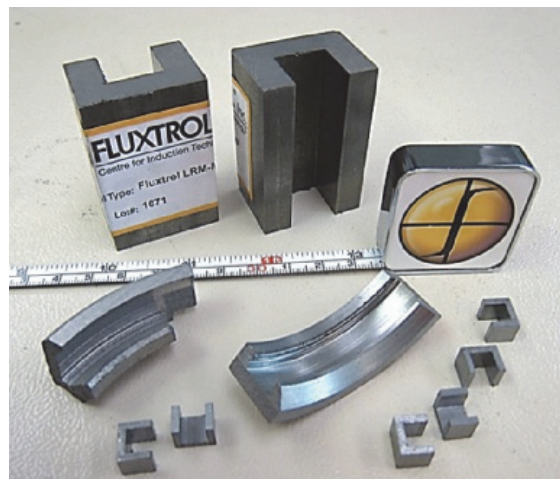
Keywords: magnetic field concentrator, gears, MES analysis, induction hardening, resonance inverter.

Wprowadzenie

Koncentratory pola magnetycznego stosowane są powszechnie w złożonych procesach nagrzewania indukcyjnego. Dzięki zastosowaniu koncentratora w układzie grzejjym wzbudnik-wsad można uzyskać znaczny wzrost produktywności procesu grzania poprzez kontrolę pola magnetycznego oraz znacznie zmniejszyć czas trwania procesu obróbki cieplnej [1-6]. Kontrola pola magnetycznego odbywa się poprzez skupienie wyindukowanych przepływem prądu przez wzbudnik linii pola magnetycznego na najbardziej istotnych obszarach lub elementach wsadu. Skupienie na małym obszarze linii pola magnetycznego (zamiast dużego rozproszenia ich w powietrzu) zwiększa natężenie tego pola w bliskiej odległości na materiale poddawany obróbce [1-6, 17]. Ponadto, dzięki zastosowaniu koncentratora pola z tej samej cewki przekazywane jest więcej mocy grzewczej (wzrasta siła nagrzewania) do wybranego obszaru elementu obrabianego w skutek czego, otrzymujemy optymalizację procesu polegającą na zmniejszeniu zużycia energii (mniejsza siła nagzewu w obszarach zbędnych - straty) oraz zwiększeniu prędkości procesu nagrzewania. Podsumowując, skupienie procesu grzewczego, w zawężonym obszarze powoduje poprawę pod względem jakości produkcji i wydajności procesu dla obrabianego elementu. Ze względu na właściwości magnetyczne koncentratorów uzyskuje się zmniejszenie zużycia energii, czego wynikiem jest mniejsza uciążliwość dla środowiska naturalnego.

Koncentratory pola magnetycznego (rys.1) wykonuje się z materiałów magnetycznie miękkich wśród których wyróżnić można np. stopy (żelazowo-niklowe, termokompensacyjne, żelazo-kobaltowe, żelazowo-krzemowe) [1-8, 17]. Ponadto, w skład miękkich magnetyków wchodzi sproszkowane materiały magnetyczne i dielektryczne spoiwa, sprasowane pod wysokim ciśnieniem i poddane obróbce termicznej. Zasadniczo koncentratory służą do kształtowania strumienia magnetycznego (koncentracji, ekranowania,

modyfikacji) w taki sposób, aby zmienne pole magnetyczne zostało skierowane do żądanej powierzchni elementu poddawanego obróbce (lub jego części) przy niewielkim strumieniu rozproszenia. Materiały magnetycznie miękkie charakteryzują się niskim przewodnictwem elektrycznym, wysoką przenikalnością i niskimi stratami magnetycznymi.



Rys.1. Przykładowe koncentratory pola magnetycznego [17]

Obecnie na rynku istnieje kilku wiodących producentów zajmujących się sprzedażą materiałów magnetycznie miękkich nadających się do wytwarzania różnego kształtu koncentratorów. W zależności od wykorzystywanej w procesie grzania indukcyjnego częstotliwości stosuje się trzy rodzaje materiałów do koncentracji pola (tabela 1). Dostępne są też gotowe rozwiązania koncentratorów w postaci materiałów kompozytowych, amorficznych na bazie kobaltu, które dzięki swojej plastyczności można łatwo formować nadając im odpowiedni kształt. Parametry materiałów amorficznych zestawiono w tabeli 2. Materiały te po wstępnym uformowaniu na powierzchni cewki utwardzane są poprzez wygrzanie w piecu przy

temperaturze 120°C przez godzinę, a następnie zwiększając temperaturę do 190°C na dodatkową godzinę [17]. Po wygrzaniu cewka z utwardzonym materiałem jest gotowa do użycia w nagrzewnicy. Ponadto, materiały amorficzne stosowane na koncentraty pola po wygrzaniu można jeszcze dodatkowo obrabiać lub szlifować w celu uzyskania pożądanego kształtu.

Tabela 1. Parametry stałych materiałów do koncentracji pola

Parametr	Jednostka	Zakres częstotliwości stosowania		
		1-50kHz	10-3000kHz	10-500kHz
Przykład materiału	-	Fluxtrol A	Ferrotron 559H	Fluxtrol LFM
Przenikalność początkowa $\mu_{ri \perp}$	-	80	16	63
Przenikalność maksymalna $\mu_{r \max \perp}$	-	142	18	120
Przenikalność początkowa $\mu_{ri \parallel}$	-	22	16	63
Przenikalność maksymalna $\mu_{r \max \parallel}$	-	28	18	120
Indukcja nasycenia B_s	T	1,5	0,9	1,6
Rezystywność ρ	Ωm	12,5	>15000	5
Przewodność cieplna $K \perp$	W/mK	19	0,04	27
Przewodność cieplna $K \parallel$	W/mK	5	0,04	27
Współczynnik rozszerzalności cieplnej CTE \perp	1/K	$1,3 \cdot 10^{-5}$	-	-
Współczynnik rozszerzalności cieplnej CTE \parallel	1/K	$1,3 \cdot 10^{-5}$	-	-
Ciepło właściwe C_p	J/g°C	0,48	-	-
Gęstość	g/cm ³	6,7	5,9	6,6
Twardość	D skala	88	90	-
Wytrzymałość na zginanie \perp	MPA	40	-	-
Wytrzymałość na zginanie \parallel	MPA	34	-	-

Tabela 2. Parametry amorficznych materiałów do koncentracji pola

Parametr	Jednostka	Zakres częstotliwości stosowania	
		10-1000kHz	1-80kHz
Przykład materiału	-	AlphaForm MF	AlphaForm LF
Przenikalność początkowa $\mu_{ri \perp}$	-	9,8	11
Przenikalność maksymalna $\mu_{r \max \perp}$	-	10	13
Przenikalność początkowa $\mu_{ri \parallel}$	-	9,8	11
Przenikalność maksymalna $\mu_{r \max \parallel}$	-	10	13
Indukcja nasycenia B_s	T	0,9	1
Rezystywność ρ	Ωm	>150	>150
Przewodność cieplna $K \perp$	W/mK	2	2
Przewodność cieplna $K \parallel$	W/mK	2	2
Gęstość	g/cm ³	4	4,1

Jak wynika z danych zestawionych w tabelach 1 i 2 zarówno materiały stałe, jak i amorficzne stosowane do koncentracji pola magnetycznego wytworzonego przez wzbudnik pokrywają cały zakres częstotliwości stosowanych powszechnie w nagrzewaniu indukcyjnym

elementów stalowych. Dobrze przeprowadzony proces nagrzewania indukcyjnego [8-12, 14, 15] z pełną kontrolą nad jego przebiegiem tj. z właściwie dobranymi parametrami obróbki, takimi jak np. czas ekspozycji, częstotliwość i wartość skuteczna prądu wzbudnika, pozwala uzyskać pożądane właściwości mechaniczne elementów stalowych.

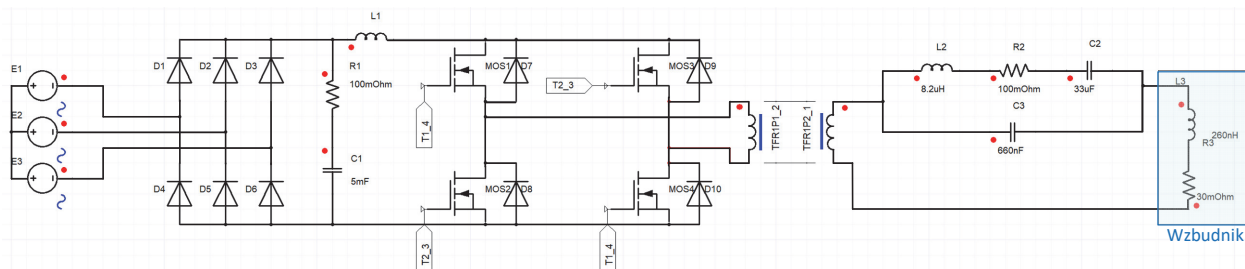
W dalszej części artykułu przedstawiony zostanie sprzężony model komputerowy przekształtnika rezonansowego z układem grzejnym wzbudnik-wsad. Model ten posłużył do przedstawienia wpływu koncentratora pola magnetycznego na proces nagrzewania wsadu w postaci np. koła zębatego. W ramach badań symulacyjnych wyznaczone zostaną charakterystyki natężenia pola magnetycznego i indukcji magnetycznej, gęstości energii i temperatury we wsadzie (wykonanym ze stali stopowej C45) dla dwóch typów nagrzewania indukcyjnego (z koncentratorami i bez) i stałej częstotliwości pracy wynoszącej 300 kHz.

Komputerowy model układu grzejnego

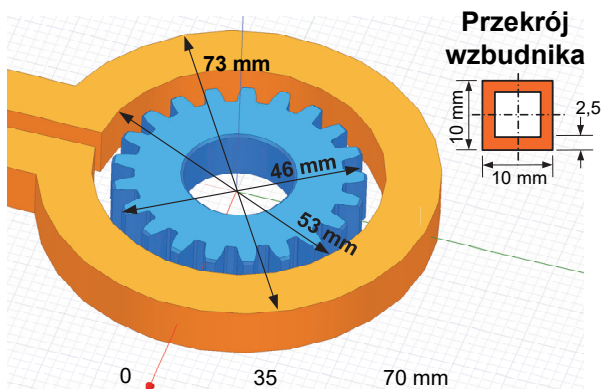
W celu zobrazowania wpływu koncentratora pola magnetycznego na proces nagrzewania indukcyjnego wsadu stworzono komputerowy (3D) model układu grzejnego wzbudnik-wsad, który został sprzęgnięty z modelem obwodowym przekształtnika (rys.2). Symulacja sprzężona (Co-Symulacja) pełnego modelu została przeprowadzona w oprogramowaniu ANSYS (Twin Builder + Maxwell 3D). Sprzężona symulacja komputerowa została przeprowadzona dla następujących warunków:

- Wsad w postaci koła zębatego: średnica 46 mm, liczba zębów 21, wysokość zęba 4,2 mm (rys.3).
- Wsad w całości wykonany ze stali stopowej C45, której parametry zestawiono w tabeli 3.
- Analizowane były dwa rodzaje nagrzewania indukcyjnego dla wysokiej (HF) częstotliwości wynoszącej 300 kHz:
 - z zastosowaniem dodatkowego koncentratora pola magnetycznego na wzbudniku,
 - bez dodatkowego koncentratora pola magnetycznego (sam wzbudnik).
- Falownik zasilony był z trójfazowej sieci o napięciu znamionowym 3×400 V.
- Moc wyjściowa falownika na poziomie 3 kW.
- Tranzystory MOSFET użyte w modelu zostały zamodelowane zgodnie z danymi katalogowymi [16] tranzystorów o oznaczeniu SCH2080KE.
- Wartości indukcyjności L_3 i rezystancji R_3 zostały wyznaczone laboratoryjnie i odpowiadają parametrom pasożytniczym miedzianego wzbudnika o wymiarach przedstawionych na rysunku 3.
- Koncentrator pola magnetycznego w całości wykonany z materiału Fluxtol LFM o parametrach zestawionych w tabeli 1 i wymiarach przedstawionych na rysunku 4.

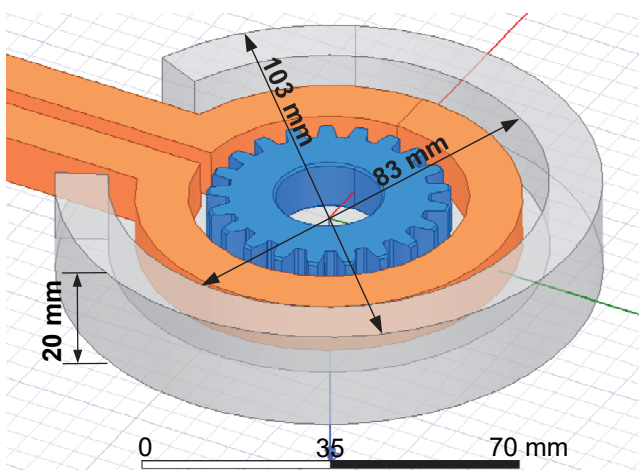
Rysunek 2 przedstawia model obwodowy przekształtnika energoelektronicznego, który posłużył do zadawania częstotliwości pracy układu i wymuszenia przepływu prądu wzbudnika. Jak wynika z tego rysunku model obwodowy składał się z: trójfazowej sieci zasilającej (3×400 V), 6-pulsowego prostownika diodowego z filtrem RC ($R=100 \text{ m}\Omega$, $C=5 \text{ mF}$), mostkowego falownika, szeregowo-równoległego obwodu rezonansowego z transformatorem separującym (15:1) i modelu układu wzbudnik-wsad. Energoelektroniczny przekształtnik zamodelowany w oprogramowaniu ANSYS charakteryzował się mocą znamionową na poziomie 3 kW, i został obciążony szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym o parametrach przedstawionych w tabeli 4.



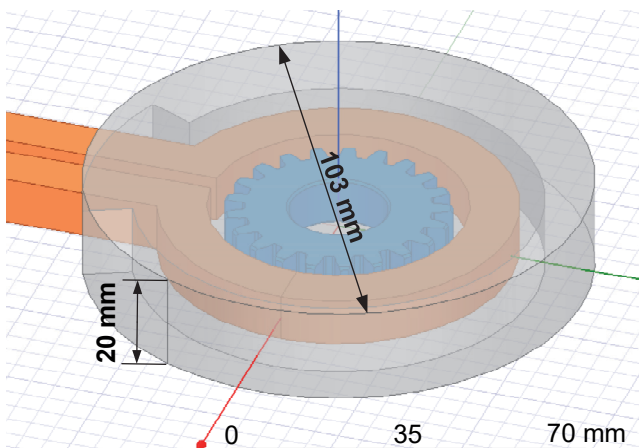
Rys.2. Model obwodowy przekształtnika wykonany w oprogramowaniu ANSYS Twin Builder



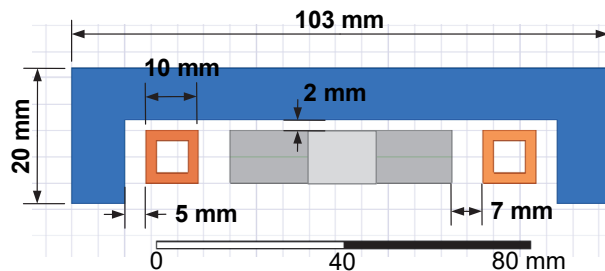
Rys.3. Model MES układu wzbudnik-wsad wykonany w oprogramowaniu ANSYS Maxwell 3D



Rys.4. Model MES układu grzejnego wraz z koncentratorem (widok od spodu)



Rys.5. Model MES układu grzejnego wraz z koncentratorem (widok od góry)



Rys.6. Model MES układu grzejnego wraz z koncentratorem (przekrój 2D)

Tabela 3. Zestawienie parametrów materiałowych stali C45

Parametr	Stop stali C45
ρ , Ωm	$16 \cdot 10^{-6}$
λ , W/mK	49
μ , H/m	600
α_k	15
ϵ	0,7

gdzie:

ρ – rezystywność, λ – przewodność cieplna, μ – przenikalność magnetyczna, α_k – współczynnik konwekcji, ϵ – emisyjność

Tabela 4. Zestawienie parametrów wyjściowego obwodu rezonansowego falownika

Parametr	Wartość
L_2	8,2 μH
L_3	260 nH
R_2	100 $\text{m}\Omega$
R_3	30 $\text{m}\Omega$
C_2	33 μF
C_3	660 nF

Tranzystory MOSFET falownika z rysunku 2 zostały zamodelowane na podstawie karty katalogowej tranzystorów wykonanych na bazie węglika-krzemu SiC o oznaczeniu SCH2080KE. Jak podaje producent [16], tranzystory te charakteryzują się rezystancją przewodzenia $R_{DS(on)}$ na poziomie 80 m Ω , maksymalnym napięciem dren-źródło U_{DSS} na poziomie 1200 V i maksymalną wartością prądu drenu I_D wynoszącą 40 A. Dodatkowo, na schemacie przekształtnika z rysunku 2 wyróżnić można szybkie diody Schottky'ego, które stanowią wewnętrzną część budowy tranzystora SiC. Za wyborem tego typu tranzystorów MOSFET przemawiały głównie następujące argumenty: niskie straty mocy, szybkie wewnętrzne diody, krótkie czasy przełączeń. Prototyp laboratoryjny oraz wyniki badań tego przekształtnika zostały szczegółowo omówione m. in. w pracach [12, 15].

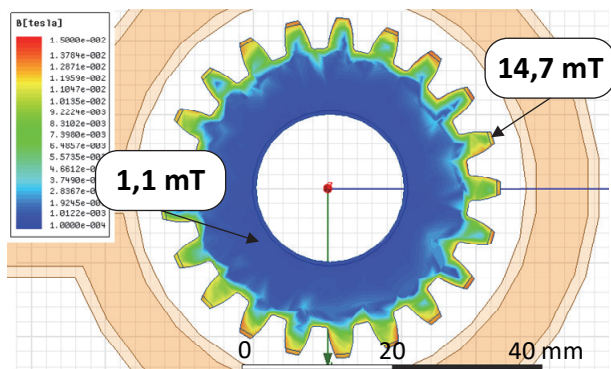
Jak wspomniano wcześniej, model obwodowy przekształtnika z rysunku 2 został sprzęgnięty z modelem MES układu grzejnego wzbudnik-wsad, który został przedstawiony na rysunkach 3 - 6. Połączenie tych dwóch modeli miało na celu wymuszenie przepływu prądu o częstotliwości 300 kHz z obwodu rezonansowego falownika poprzez wzbudnik. Zabieg ten jest niezbędny do

przeprowadzenia złożonej analizy MES układu wzбудnik-wsad w oprogramowaniu Maxwell 3D. Parametry materiałowe modelu MES z rysunków 4-6 zostały zaczerpnięte z bibliotek programu ANSYS oraz z literatury [1-8, 12-15, 17]. Aby uzyskać zadowalającą dokładność obliczeń i przyzwoity czas symulacji postanowiono zagęścić siatkę obliczeń na kole zębatym i koncentratorze. Liczba elementów siatki była zróżnicowana i wynosiła: dla koła zębatego 1 500 000 elementów, dla koncentratora 2 200 000 elementów, a dla wzbudnika 600 000 elementów.

Zaprezentowany model komputerowy został przesympulowany, jak wspomniano wcześniej, dla wsadu w postaci koła zębatego (średnica 46 mm, liczba zębów 21, wysokość zęba 4,2 mm) wykonanego ze stopu C45 stali konstrukcyjnej (tabela 3) dla dwóch trybów pracy: z dodatkowym koncentratorze pola magnetycznego i bez niego. Dla każdego z trybów pracy układu grzejnego przeprowadzono analizę MES uwzględniającą: rozkład indukcji magnetycznej B , rozkład gęstości prądu J w płaszczyźnie poziomej, rozkład gęstości energii E w płaszczyźnie poziomej i poprzecznej pojedynczego zęba oraz rozkład temperatury T w płaszczyźnie poziomej i poprzecznej pojedynczego zęba. W każdym przypadku częstotliwość prądu wzbudnika była taka sama i wynosiła 300 kHz.

Wyniki sprzężonej symulacji MES

Na rysunkach 7-10 przedstawiono wybrane wyniki symulacji sprzężonej MES uwzględniającej model obwodowy przekształtnika i model 3D układu grzejnego wzbudnik-wsad.

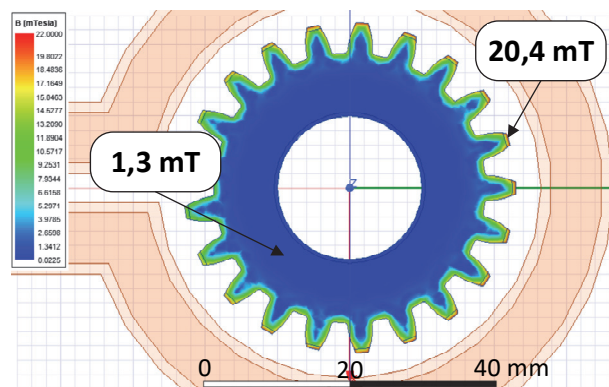


Rys.7. Rozkład indukcji magnetycznej B w płaszczyźnie poziomej koła zębatego wykonanego ze stali C45 dla częstotliwości prądu wzbudnika wynoszącej 300 kHz (układ grzejny bez koncentratora pola)

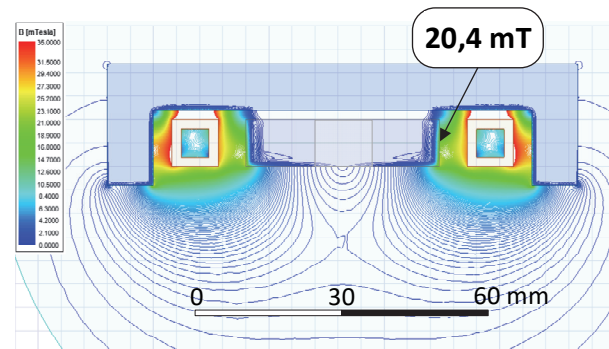
Analizując rysunki 7 i 8 można zauważyć, że zastosowanie koncentratora pola magnetycznego wykonanego z materiału Fluxtol LFM którego parametry materiałowe zestawiono w tabeli 1 skutkuje wzrostem natężenia indukcji magnetycznej z około 14,5 mT do około 20,5 mT. Zastosowanie dodatkowego koncentratora pola magnetycznego w układzie grzejnym powoduje znaczny wzrost wartości indukcji magnetycznej we wsadzie – dokładnie w okolicach wrębów i na wierzchołkach zębów. Występuje tzw. „obwiedniowy” rozkład indukcji magnetycznej na nagrzanym elemencie. Aby lepiej zobrazować ten efekt na rysunku 9 zamieszczono przekrój (2D) w płaszczyźnie poprzecznej modelu układu grzejnego ilustrujący rozkład indukcji magnetycznej.

Analizując rysunek 9 można zauważyć, że największa wartość indukcji magnetycznej w układzie grzejnym wzbudnik-wsad w przypadku zastosowania koncentratora pola magnetycznego występuje pomiędzy wzbudnikiem a koncentratorze. Efekt ten związany jest ze skupieniem,

nagromadzeniem i wypieraniem przez materiał koncentratora pola magnetycznego wyindukowanego przez wzbudnik na skutek przepływającego prądu. Dolna część układu grzejnego nie objęta koncentratorze charakteryzuje się naturalnym i zgodnym z teorią układem linii pola magnetycznego rozpraszanego w powietrzu.

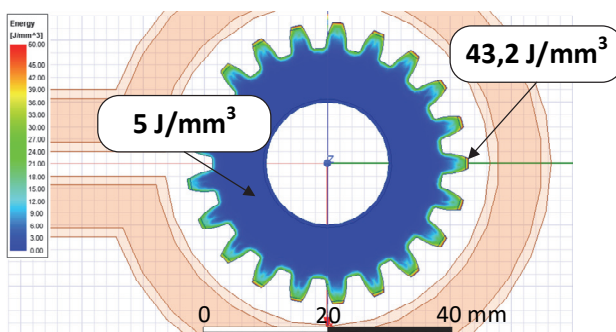


Rys.8. Rozkład indukcji magnetycznej B w płaszczyźnie poziomej koła zębatego wykonanego ze stali C45 dla częstotliwości prądu wzbudnika wynoszącej 300 kHz (układ grzejny z koncentratorze pola)



Rys.9. Rozkład indukcji magnetycznej B w płaszczyźnie poprzecznej modelu grzejnego dla częstotliwości prądu wzbudnika wynoszącej 300 kHz (układ grzejny z koncentratorze pola)

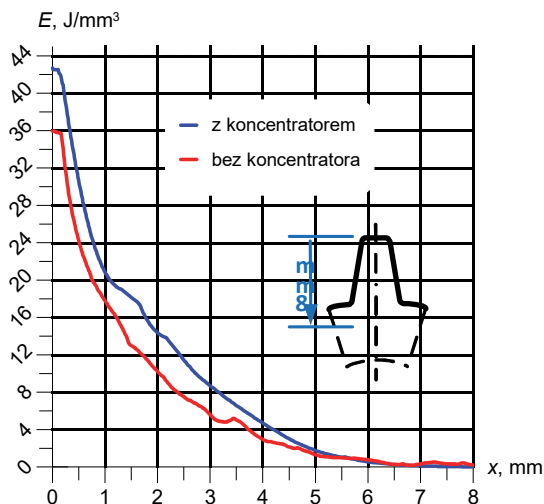
Ponadto, na rysunku 10 przedstawiono rozkład gęstości energii E zarejestrowany w płaszczyźnie poziomej koła zębatego z koncentratorze pola magnetycznego dla częstotliwości pracy wynoszącej 300 kHz.



Rys.10. Rozkład gęstości energii E w płaszczyźnie poziomej koła zębatego wykonanego ze stali C45 dla częstotliwości prądu wzbudnika wynoszącej 300 kHz (układ grzejny z koncentratorze pola)

Analizując ten rysunek można zauważyć, że rozkład gęstości energii nie różni się zbyt wiele od rozkładu indukcji magnetycznej B . Największa wartość energii E wynosi w tym przypadku ok. 43 J/mm³ i została zarejestrowana na

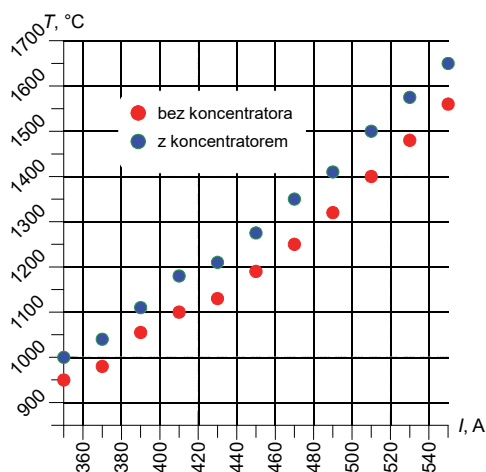
wierzchołkach zębów. Dla porównania dwóch trybów pracy układu grzejnego (z koncentratorem pola magnetycznego i bez niego) postanowiono wyznaczyć charakterystyki gęstości energii E w funkcji odległości x od wierzchołka pojedynczego zęba i w jego płaszczyźnie poziomej. Charakterystyki te przedstawiono na rysunku 11.



Rys.11. Charakterystyki rozkładu gęstości energii E w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba wykonanego ze stali C45 dla dwóch trybów pracy i częstotliwości nagrzewania 300 kHz

Analizując charakterystyki gęstości energii na pojedynczym zębie z rysunku 11 można zauważyć, że wpływ zastosowania w układzie grzejnym koncentratora pola magnetycznego zauważalny jest na długości o ok. 6 mm mniejszej, niż promień koła zębatego (liczonej od czoła zęba). Średni wzrost energii w rozpatrywanym obszarze wynosi ok. $4,5 \text{ J/mm}^3$. Dalszy wzrost długości liczonej od czoła zęba ($x > 6 \text{ mm}$) skutkuje zanikiem różnic w zastosowaniu w układzie grzejnym koncentratora – jego wpływ jest niezauważalny, a różnica w gęstości energii jest bliska zero. Należy zaznaczyć, że duży wpływ na taki stan rzeczy ma częstotliwość pracy układu. W przypadku nagrzewania wsadu z niską częstotliwością wpływ koncentratora pola będzie widoczny w całym rozpatrywanym obszarze.

Dodatkowo w ramach pracy postanowiono wyznaczyć charakterystyki zmian wartości temperatur osiąganych na wierzchołkach zębów wykonanych ze stali C45 dla dwóch trybów pracy w funkcji przepływającego prądu wzbudnika (rys.12).



Rys.12. Wykres zmian temperatury na wierzchołku zęba wykonanego ze stali C45 w funkcji natężenia prądu wzbudnika dla dwóch trybów pracy i częstotliwości nagrzewania 300 kHz

Analizując zbiorcze dane indukcji magnetycznej B , gęstości energii E i temperatury T zarejestrowane na wierzchołku pojedynczego zęba można zauważyć, że stosując metodę nagrzewania wsadu wysoką HF częstotliwością (np. 300 kHz) z zastosowaniem koncentratora pola magnetycznego można osiągnąć znacznie wyższe wartości tych wielkości. Dodatkowo dobierając odpowiednio stop stali konstrukcyjnej (charakteryzujący się np. większą zawartością węgla) nagrzewanego elementu można też wpływać na wartości tych wielkości.

Stosując koncentrator pola magnetycznego można sterować procesem wnikania pola magnetycznego w nagrzewany element np. o dość złożonym i nieregularnym kształcie, jak również o dowolnym składzie chemicznym.

Ponadto, zastosowanie koncentratora pola pozwala przyspieszyć proces nagrzewania, zwiększyć jego efektywność energetyczną oraz zmniejszyć koszty zużycia energii elektrycznej.

Otrzymane na drodze sprzężonej symulacji modelu obwodowego i modelu MES wartości indukcji magnetycznej B , rozkład gęstości energii E i wartości temperatury T mogą wynikać z:

- ze słabego sprzężenia między wzbudnikiem a wsadem (odległość ok. 4 mm);
- błędów modelowania, gdyż model matematyczny nie odzwierciedla dokładnie rzeczywistości;
- błędów wartości współczynników równań różniczkowych – przyjęte wartości współczynników równań różniczkowych jak i warunków brzegowych np. dane materiałowe obciążone są błędem;
- błędów zaokrągleń, czyli błędów wynikającego z wielokrotności przybliżeń powtarzanych wartości modelu.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono komputerowy model mostkowego falownika rezonansowego zbudowanego w oparciu o tranzystory SiC MOSFET. Prezentowany model obwodowy falownika charakteryzował się częstotliwością pracy wynoszącą 300 kHz, mocą znamionową na poziomie 3 kW i został sprzęgnięty z modelem 3D układu grzejnego w postaci wzbudnika i wsadu. W wyniku sprzężonej symulacji MES wykonanej w oprogramowaniu ANSYS uzyskano rozkłady indukcji magnetycznej B oraz gęstości energii E dla wsadu w postaci koła zębatego o średnicy 46 mm wykonanego z typowej stali stopowej C45 dla dwóch rodzajów nagrzewania indukcyjnego – z zastosowaniem koncentratora pola magnetycznego i bez jego zastosowania. Dodatkowo, w wyniku co-symulacji uzyskano charakterystyki zmian rozkładu gęstości energii (rys.11) w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba oraz zmian temperatury na wierzchołku zęba w funkcji natężenia przepływającego prądu.

Przedstawione w niniejszym artykule badania symulacyjne stanowią kontynuację podjętej tematyki badawczej i uzupełnienie wcześniejszych badań laboratoryjnych, które potwierdziły przydatność i możliwość szerokiego zastosowania falowników rezonansowych w nagrzewaniu indukcyjnym.

Autor: dr inż. Piotr Legutko, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: piotr.legutko@polsl.pl

LITERATURA

- [1] S. Maikut, Y. Bashkatov, L. Tsybulsky and A. Kuzmichev, "Simulation of induction evaporator with magnetic field concentrator," 2014 International Conference on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications (NEMO), 2014, pp. 1-4,

- [2] T. Zhu, P. Feng, X. Li, F. Li and Y. Rong, "The Study of the Effect of Magnetic Flux Concentrator to the Induction Heating System Using Coupled Electromagnetic-Thermal Simulation Model," 2013 International Conference on Mechanical and Automation Engineering, 2013, pp. 123-127,
- [3] I. Balabozov, H. Brauer and I. Yatchev, "Modelling of magnetic concentrators in induction heating systems," 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 2017, pp. 453-456,
- [4] Bokota A., Parkitny R., Modelowanie zjawisk cieplnych, strukturalnych i mechanicznych procesów hartowania elementów stalowych. Informatyka w technologii metali. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003
- [5] M. Baldan, M. Cetin, A. Nikanorov and B. Nacke, "Optimal Design of Magnetic Flux Concentrators in Induction Heating," 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), 2019, pp. 203-207,
- [6] Davies E.J., Induction Heating handbook, Mc-Graw-Hill, New York 1979
- [7] Dobrzański L. A., Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002 r.
- [8] Barglik J., Nagrzewanie indukcyjne wsadów płaskich w polu poprzecznym. Symulacja komputerowa i weryfikacja doświadczalna. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Hutnictwo z.65, Gliwice 2002
- [9] Frączyk A., Jaworski T., Urbanek P., Kucharski J., The design for a smart high frequency generator for induction heating of Leeds, Przegląd Elektrotechniczny nr 90 (2), 2014, ISSN: 0033-2097, p.20-23
- [10] Barglik J., Induction hardening of steel elements with complex shapes, Przegląd Elektrotechniczny nr 4/2018, ISSN: 0033-2097, str.51-54
- [11] Barglik, J., Smalcerz, A.: Influence of the magnetic permeability on modeling of induction surface hardening, COMPEL, 2017, 36, (2), pp. 555–564
- [12] Legutko P., Wpływ parametrów materiałowych stali stosowanych w produkcji kół zębatych na proces hartowania indukcyjnego, Przegląd Elektrotechniczny nr 5/2021, ISSN: 0033-2097, str.20-27
- [13] Skoć A., Świtoński E., Przekładnie zębate. Zasada działania. Obliczenia geometryczne i wytrzymałościowe., Wydawnictwo Naukowe PWN 2016r., ISBN: 9788301189006
- [14] Smalcerz A., Modelowanie zjawisk zachodzących podczas procesu hartowania indukcyjnego kół zębatych, Monografia Habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN 978-83-7880-341-6, Gliwice 2015
- [15] Legutko P., Symulacje MES procesu nagrzewania koła zębatego dla jednoczesnego, dwuczęstotliwościowego falownika rezonansowego, Przegląd Elektrotechniczny nr 10/2020, ISSN: 0033-2097, str.1-8
- [16] Dokumentacja techniczna tranzystora SCH2080KE dostępna pod adresem: www.rohm.com
- [17] Dokumentacja techniczna koncentratorów pola magnetycznego dostępna pod adresem: www.fluxtrol.com