Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki (1)

Wpływ parametrów materiałowych stali stopowych na proces hartowania indukcyjnego kół zębatych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki sprzężonej symulacji modelu obwodowego przekształtnika rezonansowego z modelem MES układu grzejnego wzbudnik-wsad dla trzech wariantów nagrzewania indukcyjnego (niską-, wysoką- i podwójną-częstotliwością). Wsad w postaci koła zębatego został przesymulowany dla trzech różnych stopów stali konstrukcyjnej (C45, 41Cr4, 42CrMo4) używanej powszechnie do produkcji tego typu elementów mechanicznych. Przekształtnik energoelektroniczny o mocy 3 kW został zamodelowany w postaci mostkowego falownika rezonansowego 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 fragmencie wsadu w zależności od częstotliwości pracy układu i rodzaju stopu stali konstrukcyjnej, charakterystyki gęstości energii w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba oraz wartości temperatury zarejestrowane na wierzchołku zęba (w połowie jego wysokości) dla trzech różnych metod hartowania i trzech typowych stopów stali konstrukcyjnej.

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 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 co-simulation of models was made for three alloy steel of gear: C45, 41Cr4 and 42CrMo4, and three type of induction heating of gear: medium- (MF), high- (HF) and simultaneous dual-frequency (2F). 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 three type of induction heating. (Influence of material parameters of alloy steels used for gears production on induction hardening process)

Słowa kluczowe: koła zębate, analiza MES, nagrzewanie indukcyjne, falownik rezonansowy. **Keywords**: gears, MES analysis, induction hardening, resonance inverter.

Wprowadzenie

W wielu gałęziach przemysłu wykorzystuje się różnego rodzaju komponenty stalowe rozwiazujące niezliczoną ilość problemów inżynieryjnych. Jednymi z najczęściej spotykanych elementów mechanicznych są koła i przekładnie zębate. Na rynku istnieje bardzo duża różnorodność kształtów i wielkości tego typu podzespołów wchodzących w skład złożonych konstrukcji pojazdów mechanicznych. Aby spełnić wysokie wymagania jakościowe stawiane tego typu elementom stalowym oraz zapewnić odpowiednią twardość powierzchni w procesie hartowania poszukuje się wciąż nowych materiałów konstrukcyjnych i eksperymentuje się z odpowiednim doborem parametrów procesu nagrzewania. Parametry materiałowe stali stopowych z których wykonane są np. koła zębate odpowiadają w głównej mierze za [2, 7, 14, 15]:

- charakter pracy elementu mechanicznego,
- jego szybkość obrotowa,
- moc przenoszoną przez element,
- środowisko pracy np. korozję,
- wytrzymałość elementu,
- temperaturę pracy,
- sposób smarowania.

Dobrze przeprowadzony proces nagrzewania bądź hartowania indukcyjnego [1, 2, 5, 6, 9, 11, 12, 13, 15, 16] 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.

Stale stopowe z których wykonuje się koła zębate można podzielić np. w zależności od rodzaju stosowanej obróbki cieplnej. Wyróżnić można dwa podstawowe rodzaje obróbki: obróbkę cieplną po nacięciu zębów, oraz obróbkę cieplną przed nacięciem zębów tzw. obróbkę cieplną całościową. Pierwsza z wymienionych metod jest powszechnie nagrzewania stosowana w postaci indukcyjnego od kilkudziesięciu lat. Metoda ta charakteryzuje się:

- dużą szybkością nagrzewania, która w głównej mierze zależy od wydajności i mocy przekształtnika energoelektronicznego w postaci falownika rezonansowego;
- selektywnością obszaru poddawanego obróbce dzięki zapewnieniu odpowiedniego sterowania tranzystorami MOSFET i wyboru częstotliwości pracy falownika;
- powtarzalnością procesu zapewniającą stabilność i jakość otrzymanego produktu;
- wysoką sprawnością energetyczną mającą niewielki wpływ na środowisko naturalne [5, 6, 15].

Do produkcji kół zębatych używa się różnego rodzaju gatunków stali konstrukcyjnych, które w zależności od wymaganych właściwości i parametrów gotowego produktu podlegają nawęglaniu, cyjanowaniu, azotowaniu, hartowaniu powierzchniowemu oraz ulepszaniu cieplnemu.

Stale podlegające obróbce cieplnej po nacięciu zębów to najczęściej stale stopowe, których używa się do produkcji elementów zębatych o małych i średnich przekrojach. W produkcji małych kół zębatych pracujących w warunkach spokojných wykorzystuje się gatunki stáli do nawęglania 16HG, 20HG oraz 18HGT [7, 14]. Koła o średnich wymiarach produkowane są z materiałów do nawęglania w gatunkach 15HGM, 18HGM, 17HGN oraz 15HN [7, 14]. Wśród materiałów przeznaczonych do hartowania powierzchniowego wykorzystuje się stal 45/C45, 55/C55, 40H lub 50G dla produkcji kół zębatych o małych modułach. Dla produkcji przekładni szybkobieżnych o wytrzymałości rdzenia ok. 100kG/mm² coraz częściej dobierana jest stal o oznaczeniach 50HM, 45HM lub 35HM/34CrMo4 [7, 14].

Hartowanie indukcyjne, odbywające się po zgrubnej i kształtującej obróbce zębów, czyli ich wycięciu, jest zagadnieniem interdyscyplinarnym. Stanowi ono kombinację zjawisk elektromagnetycznych, cieplnych i metalurgicznych. Wymienione zjawiska zachodzą, gdy powierzchnia materiału poddawanego obróbce jest nagrzewana powyżej temperatury austenityzowania (tzn. temperatury wystąpienia dyfuzji węgla i pierwiastków stopowych stali), a następnie w kolejnym etapie procesu gwałtownie schładzana [1, 2, 5, 6, 8, 15, 16].

Ciągły rozwój różnych gałęzi przemysłu wykorzystującego elementy stalowe o nieregularnym kształcie np. w postaci kół zębatych, a także rozwój rynku nowych półprzewodników wpływa na udoskonalanie i rozwój przekształtników rezonansowych stosowanych do niezawodnego i precyzyjnego hartowania [4, 8, 9, 11, 12, 13]. Przekształtniki te realizowane są w wielu możliwych konfiguracjach szerzej opisanych m. in. w literaturze [5, 6, 8, 12, 13] często wykorzystujące w swej strukturze nowe rodzaje półprzewodników.

W dalszej części artykułu przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z hartowaniem indukcyjnym kół zębatych, szczegółowo omówiono model komputerowy przekształtnika rezonansowego oraz przedstawiono najciekawsze wyniki symulacji MES dla podstawowych wariantów hartowania różnego rodzaju stali stopowych.

Teoria indukcyjnego nagrzewania kół zębatych

Nagrzewanie indukcyjne to proces, który stosuje się do łaczenia, utwardzania lub zmiękczania metali bądź innych materiałów przewodzących. Proces ten, zaliczany jest do złożonych zagadnień interdyscyplinarnych, łączących ze sobą takie dziedziny nauki jak np. fizyka, mechanika i elektrotechnika. Opis uwzględniający wszystkie zjawiska zachodzące podczas procesu nagrzewania indukcyjnego jest dość złożony i trudny do całościowego oszacowania. Proces ten polega na umieszczeniu w układzie grzejnym (wzbudniku), zasilanym prądem przemiennym, elementu poddawanego obróbce termicznej (wsadu), w którym pod wpływem zmiennego w czasie pola magnetycznego o tej samej częstotliwości indukują się prądy wirowe. Częstotliwość prądów wirowych wsadu jest równa częstotliwości prądu wzbudnika, ale ich zwroty są przeciwne.



Rys.1. Przebieg procesu nagrzewania indukcyjnego

Przepływ prądów wirowych powoduje wydzielanie się ciepła Joule'a, a rozkład ich gęstości w układzie grzejnym wzbudnik-wsad jest nierównomierny. Nierównomierność ta, związana jest z występowaniem charakterystycznych dla nagrzewania indukcyjnego zjawisk elektromagnetycznych, do których zaliczyć należy zjawiska: naskórkowości, zbliżenia, wypierania i zakrzywienia [1, 2, 4, 9, 15].

W celu zapewnienia pełnej kontroli nad przebiegiem procesu nagrzewania indukcyjnego wsadu np. w postaci koła zębatego należy zapewnić odpowiedną wartość mocy układu grzejnego wzbudnik-wsad w jednostce czasu. Dodatkowo, dzięki odpowiednio dobranej częstotliwości prądu wzbudnika można sterować głębokością wnikania pola magnetycznego, która bezpośrednio przekłada się na rozkład prądów wirowych we wsadzie [1, 2, 4, 6, 11, 15]. Na rysunku 2 przedstawiono rozkład indukowanych prądów wirowych w kole zębatym w zależności od częstotliwości prądu wzbudnika.



Rys.2. Rozkład indukowanych prądów wirowych we wsadzie względem poszczególnych składowych częstotliwości prądu wzbudnika

Analizując rysunek 2 można wyróżnić trzy podstawowe metody nagrzewania indukcyjnego ze względu na częstotliwość prądu wzbudnika:

 nagrzewanie wysoką (HF) częstotliwością – powoduje nagrzewanie powierzchni wsadu leżących w bliskiej odległości od wzbudnika (rys.2a, b, c), czyli powierzchni bocznych i zębów;

 nagrzewanie niską (MF) częstotliwością – powoduje nagrzewanie powierzchni wsadu leżących głębiej (rys.2d, h), nagrzewane są głównie wręby i wnętrza kół zębatych;

 nagrzewanie dwuczęstotliwościowe (MF+HF, 2F) – powoduje nagrzewanie zarówno zębów i wrębów (rys.2e), jak również samego konturu (obwiedni) kół zębatych o profilu nierównomiernym (rys.2f) i równomiernym (rys.2g).

Należy zaznaczyć, że proces dwuczęstotliwościowego nagrzewania może być prowadzony w różny sposób, gdyż czasy włączenia i wyłączenia obydwu częstotliwości, a także ich moce mogą być niezależnie regulowane. Regulacja tymi parametrami może prowadzić do uzyskania całkowicie różnych profili twardości koła. Dla zahartowania tylko wierzchołków zębów potrzeba wielkiej częstotliwości i dużych gęstości mocy, do hartowania dna wrębów używane są najniższe częstotliwości, przy mniejszych wartościach mocy [6, 15]. Dzięki tej własności zastosowanie powyższej metody hartowania daje zadowalające efekty, zwłaszcza oczekiwany profil twardości przy stosunkowo małych deformacjach koła (rys.2g).

W dalszej części artykułu przedstawione zostaną podstawowe właściwości wybranych stali stopowych, szczegółowo omówiony zostanie model komputerowy przekształtnika rezonansowego oraz przedstawione zostaną najciekawsze wyniki symulacji MES dla wytypowanych gatunków stali w trzech podstawowych wariantach hartowania.

Parametry materialowe wytypowanych stali stopowych

W ramach pracy wytypowano trzy rodzaje/gatunki stali stosowane powszechnie w różnego rodzaju gałęziach przemysłu mechanicznego. W skład wymienionej grupy wchodziły następujące rodzaje:

 Stal 42CrMo4 (40HM/1,7225) – nadaje się do ulepszania cieplnego i hartowania, jest łatwa w obróbce cieplnej i mechanicznej, odporna na ścieranie, nie spawalna. Stosowana głównie na większość elementów maszyn, pojazdów i konstrukcji o bardzo dużej wytrzymałości i ciągliwości, jak również na części narażone na zmienne obciążenia np. wały, osie, koła zębate, tarcze, korbowody, wirniki itp.

• Stal C45 (1,0503) - która jest stalą węglową, zwaną też

niestopową o wyższej jakości. Ze względu na swoje właściwości cieszy się ona dużą popularnością oraz jest chętnie wykorzystywana do produkcji części maszyn, ponieważ łatwo ulega obróbce. Jest to materiał trudny w spawaniu i nie nadający się do procesu azotowania. Pozostałe procesy technologiczne przeprowadza się w ściśle określonych warunkach temperaturowych, które ułatwiają uzyskanie pożądanych cech i właściwości stali. Główne zastosowania znajduje w średnio obciążanych elementach maszyn i urządzeń takich jak: wrzeciona, osie, wały, tarcze, śruby, dźwignie itp. Wyroby mogą być hartowane powierzchniowo uzyskując twardość do 50-60 HRC.

• Stal 41Cr4 (40H/1,7035) - to specjalny gatunek stali stopowej, konstrukcyjnej, chromowanej nadającej się do ulepszania cieplnego o średniej hartowności, do hartowania powierzchniowego, będący niezbędnym surowcem w nowoczesnym przemyśle. Szeroko stosowana w produkcji elementów maszyn, pojazdów, komponentów konstrukcyjnych. Ten gatunek stali jest stosunkowo łatwy w obróbce mechanicznej takiej jak: skrawanie, kucie, walcowanie, hartowanie, odpuszczanie, ale niestety trudno spawalny. Zastosowanie spawania wiąże sie z koniecznością podgrzania stali przed przeprowadzeniem działania, a następnie po zakończeniu wymagana jest następna obróbka cieplna. Główne zastosowanie to produkcja takich komponentów jak: wały korbowe, tuleje, osie, koła zębate, dźwignie, wirniki itp.

W tabelach 1 ÷ 3 przedstawiono zbiorcze zestawienie procesów technologicznych dla wymienionych gatunków stali wraz z podstawowymi parametrami.

| Tabela 1. Zestawienie proc | esów technologicznych dla stali C45 |
|----------------------------|-------------------------------------|
|----------------------------|-------------------------------------|

| Technologiczne procesy obróbki | Możliwość zastosowania | Temperatura |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------|
| Spawanie | Utrudnione | - |
| Kucie | + | 850 - 1100°C |
| Walcowanie | + | 850 - 1100°C |
| Hartowanie | + | 820 - 860°C |
| Azotowanie | - | - |
| Odpuszczanie | + | 550 - 660°C |
| Wyżarzanie zmiękczające | + | 650 - 700°C |

Tabela 2. Zestawienie procesów technologicznych dla stali 41Cr4

| Technologiczne procesy obróbki | Możliwość zastosowania | Temperatura |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------|
| Spawanie | - | - |
| Kucie | + | 850 - 1050°C |
| Walcowanie | + | 850 - 1050°C |
| Hartowanie | + | 820 - 860°C |
| Odpuszczanie | + | 540 - 680°C |
| Wyżarzanie zmiękczające | + | 680 - 720°C |
| Wyżarzanie normalizujące | + | 840 - 880°C |

Tabela 3. Zestawienie procesów technologicznych dla stali 42CrMo4

| Technologiczne procesy obróbki | Możliwość zastosowania | Temperatura |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------|
| Spawanie | niezalecane | - |
| Kucie | + | 850 - 1050°C |
| Walcowanie | + | 850 - 1180°C |
| Hartowanie | + | 820 - 870°C |
| Odpuszczanie | + | 500 - 670°C |
| Wyżarzanie zmiękczające | + | 680 - 720°C |
| Wyżarzanie normalizujące | + | 840 - 870°C |

W tabeli 4 zestawiono podstawowe parametry materiałowe wytypowanych stali.

Należy zaznaczyć, że wytypowane gatunki stali (tabela 4) są typowymi, stosowanymi do wytwarzania kół zębatych i podlegającymi obróbce cieplnej po nacięciu zębów. Dodatkowo w tabeli 5 zestawiono procentowy skład chemiczny wybranych rodzajów stali. Tabela 4. Zestawienie parametrów materiałowych stopów stali stosowanych do produkcji kół zębatych

| Baramatr | Rodzaj stopu stali | | | | |
|---------------|---------------------|-----------------------|---------------------|--|--|
| Faramen | C45 | 42CrMo4 | | | |
| <i>ρ</i> , Ωm | 16·10 ⁻⁶ | 19,3·10 ⁻⁶ | 18·10 ⁻⁶ | | |
| λ, W/mK | 49 | 42 | | | |
| μ, H/m | 600 | | | | |
| ακ | 15 | | | | |
| 3 | 0,7 | | | | |

gdzie:

ρ – rezystywność, λ – przewodność cieplna, μ - przenikalność magnetyczna, $α_{\rm K}$ – współczynnik konwekcji, ε - emisyjność

| Tabela 5. Zestawienie składu chemicznego wybranych s | tali |
|--|------|
|--|------|

| Skład | Rodzaj stopu stali | | | |
|-----------|--------------------|-------|---------|--|
| chemiczny | C45 | 41Cr4 | 42CrMo4 | |
| С | 0,43 | 0,39 | 0,42 | |
| Mn | 0,61 | 0,65 | 0,64 | |
| Si | 0,19 | 0,26 | 0,23 | |
| Р | 0,019 | 0,016 | 0,012 | |
| S | 0,040 | 0,016 | 0,017 | |
| Cr | 0,07 | 0,88 | 0,98 | |
| Ni | 0,10 | 0,11 | 0,15 | |
| Mo | 0,02 | 0,04 | 0,15 | |

| Tabela 6. Zestawienie najczęście | j domieszkowanych pierwiastków |
|----------------------------------|--------------------------------|
| chemicznych w stali stopowej | |

| Własności mechaniozna | Pierwiastki | | | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------------------|--|--|---|----------------------------------|--|
| | Mn | Cr | Si | Р | Ni | Мо | W |
| Twardość | + | + | + | + | + | - | + |
| Wytrzymałość | + | - | + | + | + | + | + |
| Plastyczność | + | - | 1 | 1 | - | + | - |
| Sprężystość | - | - | + | - | - | - | + |
| Odporność na ścieranie | - | I | I | I | + | - | - |
| Hartowność | + | + | - | + | + | + | - |
| Odporność na korozję | - | + | - | + | + | + | - |
| Żaroodporność | - | + | - | - | - | - | - |
| Odporność na działanie kwasów | - | + | - | - | - | - | - |
| | | | | | | | |
| Własności mochaniczno | | | Pie | erwias | stki | | |
| Własności mechaniczne | v | Cu | Pie Ti | erwias Al | stki Co | Nb | С |
| Własności mechaniczne Twardość | V + | Cu + | Pie Ti - | erwias AI + | stki Co + | Nb - | C + |
| Własności mechaniczne Twardość Wytrzymałość | V + + | <i>Cu</i> + + | Pie Ti - + | erwias AI + - | stki Co + - | Nb - - | C + + |
| Własności mechaniczne Twardość Wytrzymałość Plastyczność | V + + | Cu + + | Pie Ti - + | erwias AI + - | stki Co + - | Nb - - | C + + + |
| Własności mechaniczne Twardość Wytrzymałość Plastyczność Sprężystość | V + + - | Cu + + - | Pie Ti - + - | erwias AI + - - | stki Co + - - | Nb - - - | C + + + |
| Własności mechaniczne Twardość Wytrzymałość Plastyczność Sprężystość Odporność na ścieranie | V + - + | Cu + + - - | Pie Ti - + - | erwias AI + - - - | stki Co + - - - | Nb - - - - | C + + + + |
| Własności mechaniczne Twardość Wytrzymałość Plastyczność Sprężystość Odporność na ścieranie Hartowność | V + + - + - - | Cu + - - + | Pie Ti - + - - - | erwias AI + - - - + | stki Co + - - - - - - | Nb - - - - + | C + + + + + + + + |
| Własności mechaniczne Twardość Wytrzymałość Plastyczność Sprężystość Odporność na ścieranie Hartowność Odporność na korozję | V + + + - - - | Cu + - - + + | Pie Ti - + - - - + + | erwias AI + - - - + + | stki Co + - - - - - - | Nb - - - - + + | C + + + + + + + + + |
| Własności mechaniczne Twardość Wytrzymałość Plastyczność Sprężystość Odporność na ścieranie Hartowność Odporność na korozję Żaroodporność | V + + - - - - | Cu + - - + + + - | Pie Ti - - - + + + + | erwias AI + - - + + + | stki Co + - - - - + | Nb - - - + + - | C + + + + + + + - - |

Jak wynika z przedstawionego zestawienia danych (tabele 4 i 5), wytypowane stale stopowe charakteryzują się zbliżoną zawartością węgla (ok. 0,4%) i bardzo różną zawartością molibdenu i chromu, które są tzw. dodatkiem ferrytotwórczym. Te dwa pierwiastki w głównej mierze są odpowiedzialne za zwiekszenie hartowności wytypowanych stali oraz za zmniejszenie ilości austenitu szczątkowego po hartowaniu. Pozostałe pierwiastki wchodzące w skład wytypowanych stali, to najczęściej pierwiastki z przerobu hutniczego lub po prostu zanieczyszczenia. Skład chemiczny stali stopowych w głównej mierze odpowiada za właściwości mechaniczne, takie jak np. wytrzymałość, twardość, odporność na ścieranie lub pęknięcia, plastyczność itp. W tabeli 6 zestawiono typowe pierwiastki chemiczne domieszkowane do różnego rodzaju stopów stali celem osiągniecia konkretnych właściwości mechanicznych. Właściwości magnetyczne stali zależą od bardzo wielu czynników m. in. od: składu chemicznego, obróbki mechanicznej, obróbki cieplnej i temperatury. W pracach [1, 2, 3, 15] wykazano, że wraz ze wzrostem natężenia magnesującego pola magnetycznego różnice we właściwościach prezentowanych stali są coraz mniej widoczne i zacierają się, a jeżeli $H \ge 10^4$ A/m – praktycznie różnice nie występują. W przypadku stali o zbliżonych zawartościach węgla można stosować w nagrzewaniu indukcyjnym, jedną uśrednioną krzywą magnesowania B=f(H,T).

W dalszej części artykułu przedstawiono sprzężony model komputerowy przekształtnika rezonansowego z układem grzejnym wzbudnik-wsad, który posłużył do określenia wpływu rodzaju stali stopowej i jej składu chemicznego na proces nagrzewania indukcyjnego.

Model MES układu wzbudnik-wsad

W celu zobrazowania wpływu parametrów materiałowych wybranych gatunków stali stopowych stosowanych w produkcji różnego rodzaju części mechanicznych np. kół zębatych przeprowadzono symulację sprzężoną (Co-Symulację) w oprogramowaniu ANSYS (Twin Builder + Maxwell 3D) łączącą w sobie model obwodowy przekształtnika i model MES układu wzbudnikwsad. Sprzężona symulacja komputerowa została przeprowadzona dla następujących warunków:

- Wsad w postaci koła zębatego: średnica 46 mm, liczba zębów 21, wysokość zęba 4,2 mm.
- Analizowane były trzy rodzaje stali stopowej: C45, 41Cr4, 42CrMo4, których parametry zestawiono w tabelach 4 i 5.
- Analizowane były trzy rodzaje nagrzewania indukcyjnego:
 - o niską częstotliwością MF wynoszącą 8kHz,
 - o wysoką częstotliwością HF wynoszącą 267kHz,
 - jednoczesne, dwuczęstotliwościowe 2F (MF+HF) o głębokości modulacji 0,8.
- 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 [17] tranzystorów o oznaczeniu SCH2080KE.
- Wartości indukcyjności L₃ i rezystancji R₃ zostały wyznaczone laboratoryjnie i odpowiadają parametrom pasożytniczym miedzianego wzbudnika o wymiarach przedstawionych na rysunku 7.

Rysunek 3 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), 6pulsowego prostownika diodowego z filtrem RC (R=100 mΩ, C=5 mF), mostkowego falownika, szeregoworównoległego obwodu rezonansowego z transformatorem separującym (15:1) i modelu układu wzbudnik-wsad. Energoelektroniczny przekształtnik zamodelowany w oprogramowaniu ANSYS charakteryzował sie moca znamionową na poziomie 3 kW, i został obciążony szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym o parametrach przedstawionych w tabeli 7.

Tabela 7. Zestawienie parametrów wyjściowego obwodu rezonansowego falownika

| Parametr | Wartość |
|----------|---------|
| L_2 | 8,2 µH |
| L_3 | 260 nH |
| R_2 | 100 mΩ |
| R_3 | 30 mΩ |
| C_2 | 33 µF |
| C_3 | 660 nF |

Tranzystory MOSFET falownika z rysunku 3 zostały podstawie zamodelowane na kartv katalogowei tranzystorów wykonanych na bazie węglika-krzemu SiC o oznaczeniu SCH2080KE. Jak podaje producent [17], tranzystory te charakteryzują się rezystancją przewodzenia R_{DS(on)} na poziomie 80 mΩ, maksymalnym napięciem drenźródło U_{DSS} na poziomie 1200 V i maksymalna wartością prądu drenu I_D wynoszącą 40 A. Dodatkowo, na schemacie przekształtnika z rysunku 3 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, 13].



Rys.3. Model obwodowy przekształtnika wykonany w oprogramowaniu ANSYS Twin Builder



Rys.4. Model prostego modulatora MSI

Ponadto, na rysunku 4 przedstawiono prosty modulator MSI realizujący naturalną lub regularną metodę sterowania tranzystorów MOSFET falownika. Za pomocą tej metody możliwe jest wiekszościowe sterowanie moca poszczególnych składowych częstotliwościowych prądu wzbudnika. Zmiana głębokości modulacji wpływa na amplitudę składowej niskiej częstotliwości (MF), a zmiana częstotliwości nośnej wpływa na zmianę amplitudy składowej wysokoczęstotliwościowej (HF). Więcej informacji na temat realizacji układu i metody sterowania, jak i możliwych wariantów komutacji w prezentowanym falowniku można znaleźć m. in. w literaturze [12, 13].



Rys.5. Przykładowe przebiegi czasowe modelu komputerowego z rysunku 3: a) napięcie tranzystora T1, b) dwuczęstotliwościowy prąd wzbudnika



Rys.6. Przykładowe przebiegi modulatora MSI



Rys.7. Model MES układu wzbudnik-wsad wykonany w oprogramowaniu ANSYS Maxwell 3D

Na rysunkach 5 i 6 zamieszczono przykładowe przebiegi napięć i prądów falownika rezonansowego oraz prostego modulatora MSI. Jak wspomniano wcześniej,

model obwodowy przekształtnika z rysunku 3 został sprzęgnięty z modelem MES układu grzejnego wzbudnikwsad, który został przedstawiony na rysunku 7. Połączenie tych dwóch modeli miało na celu wymuszenie przepływu prądu z obwodu rezonansowego falownika poprzez wzbudnik o określonej częstotliwości. Zabieg ten jest niezbędny do przeprowadzenia złożonej analizy MES układu wzbudnik-wsad w oprogramowaniu Maxwell 3D. Parametry materiałowe modelu MES z rysunku 7 zostały zaczerpnięte z bibliotek programu ANSYS oraz z literatury [1, 2, 4, 5, 7, 14, 15]. Aby uzyskać zadowalającą dokładność obliczeń i znacznie skrócić czas symulacji postanowiono przesymulować jedynie fragment modelu 3D (rys.8) oraz zagęścić siatkę obliczeń na wycinku koła. Liczba elementów siatki była zróżnicowana i wynosiła: dla fragmentu koła zębatego 1 000 000 elementów, a dla fragmentu wzbudnika 300 000 elementów.



Rys.8. Fragment modelu MES układu wzbudnik-wsad





Zaprezentowany model komputerowy został przesymulowany dla wsadu w postaci koła zębatego (średnica 46 mm, liczba zębów 21, wysokość zęba 4,2 mm) wykonanego z trzech różnych stopów stali konstrukcyjnej (tabela 5). Dla każdego z wytypowanych stopów 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

sprawdzono trzy podstawowe rodzaje nagrzewania: niską częstotliwością (MF 8 kHz), wysoką częstotliwością (HF 267 kHz) i jednoczesną, dwuczęstotliwościową (MF+HF lub 2F).



Rys.10. Rozkład gęstości energii *E* w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba dla trzech różnych stopów stali wykorzystywanych w produkcji kół zębatych (nagrzewanie wysoką częstotliwością HF)

Otrzymane na drodze symulacji komputerowej wyniki analizy MES układu wzbudnik-wsad potwierdziły, że wraz ze wzrostem częstotliwości prądu wzbudnika zmienia się rozkład pola magnetycznego, energii i temperatury w kole zębatym. Rozkłady te ściśle zależą od rodzaju stopu stali konstrukcyjnej użytej do produkcji wsadu, jego składu chemicznego oraz częstotliwości pracy układu grzejnego. Poniżej przedstawiono najciekawsze wyniki analizy numerycznej modelu komputerowego dla trzech różnych gatunków stali i trzech różnych częstotliwości pracy układu przy zachowaniu stałej mocy wyjściowej falownika.

Na rysunkach 9 ÷ 11 przedstawiono charakterystyki gęstości energii *E* w płaszczyźnie poprzecznej zęba (dla głębokości 8 mm liczonej od czoła zęba) uzyskane dla trzech wytypowanych stopów stali konstrukcyjnej i trzech różnych częstotliwości prądu wzbudnika.



Rys.11. Rozkład gęstości energii *E* w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba dla trzech różnych stopów stali wykorzystywanych w produkcji kół zębatych (nagrzewanie jednoczesne, dwuczęstotliwościowe 2F)





Rys.12. Rozkład indukcji magnetycznej *B* w płaszczyźnie poziomej koła zębatego C45 dla niskiej częstotliwości MF prądu wzbudnika

Jak wnika z rysunku 12, dla niskiej częstotliwości prądu wzbudnika pole magnetyczne obejmuje cały wsad i przenika aż do wnętrza koła zębatego, co powoduje równomierne nagrzewanie całego elementu. Maksymalna wartość energii występuje na wierzchołku zęba (w połowie wysokości wsadu) i ma wartość ok. 24 J/mm³ (rys.13). Wraz ze wzrostem odległości od czoła zęba do wnętrza wsadu energia maleje liniowo (rys.9) aż do wartości ok. 2 J/mm³.



Rys.13. Rozkład gęstości energii *E* na wycinku (a) i na przekroju podłużnym (b) koła zębatego wykonanego ze stali C45 - częstotliwość MF prądu wzbudnika

W przypadku hartowania elementu stalowego wysoką częstotliwością (HF) wynoszącą 267 kHz następuje wzrost wartości indukcji magnetycznej *B* oraz gęstości energii *E* odpowiednio do wartości ok. 20 mT i ok. 34 J/mm³ (dla stali

C45). Pole magnetyczne wnika jedynie w niewielki kontur koła zębatego, co prowadzi do wzrostu energii i temperatury tylko na obwiedni koła, wnętrze koła pozostaje znacznie chłodniejsze (rys.10). Aby uzyskać znacznie korzystniejszy kontur hartowanego obszaru stosuje się nagrzewanie dwuczęstotliwościowym (MF+HF, 2F) prądem wzbudnika.



Rys.14. Rozkład indukcji magnetycznej *B* w płaszczyźnie poziomej koła zębatego C45 dla dwuczęstotliwościowego (MF+HF, 2F) prądu wzbudnika

Rozkład indukcji magnetycznej *B* i gęstości energii *E* w płaszczyźnie poziomej fragmentu koła dla nagrzewania dwuczęstotliwościowego (2F) przedstawiono odpowiednio na rysunkach 14 i 15.



Rys.15. Rozkład gęstości energii *E* w płaszczyźnie poziomej koła zębatego C45 dla dwuczęstotliwościowego (MF+HF, 2F) prądu wzbudnika

Ponadto, w tabeli 8 zestawiono zbiorcze wyniki pomiarów indukcji magnetycznej *B*, gęstości energii *E* oraz temperatury *T* zarejestrowane na wierzchołku zęba (w połowie jego wysokości) dla trzech różnych metod hartowania i trzech typowych stopów stali konstrukcyjnej. Przy wyznaczaniu rozkładu temperatury na fragmencie koła zębatego dodatkowo uwzględniono konwekcję powietrza na poziomie $5 \cdot 10^{-6}$ W/mm³K oraz temperaturę otoczenia wynoszącą 25° C.

Analizując dotychczasowe wyniki symulacji MES można zauważyć, że stopy stali zawierające w składzie większą ilość takich pierwiastków jak węgiel, chrom i molibden (stal

C45 i 42CrMo4) charakteryzują się lepszą hartownością. Dla wsadu wykonanego z wymienionych typów stali można osiągnąć wyższe gęstości energii oraz temperatury przy zachowaniu stałej mocy wyjściowej falownika. Z charakterystyk rozkładów gęstości energii (rys.9 ÷ 11) w płaszczyźnie poziomej pojedynczego zęba tzn. do głębokości 8 mm od czoła zęba można zauważyć, że największą średnią gęstość energii ma stop 41Cr4 (dla nagrzewania HF i 2F), który dzięki odpowiedniemu składowi chemicznemu charakteryzuje się najmniejszą wartością rezystywności o (tabela 4). Jak wynika z charakterystyki przedstawionej na rysunku 11, przy dwuczęstotliwościowym nagrzewaniu (2F) wsadu w postaci koła zębatego największa gęstość energii E jest nagromadzona na długości ok. 1 mm mniejszej niż promień koła zębatego (liczonej od czoła zęba). Średnia gęstość energii w tym obszarze wynosi ok. 30 J/mm³. Największą wartością gęstości energii E wynoszącą 36,2 J/mm³ (rys.15) charakteryzuje się stop C45 zawierający następujący skład chemiczny: węgiel 0,43%, molibden 0,02% i chrom 0,07% (tabela 5). Najmniejszą wartością gęstości energii (34,4 J/mm³) charakteryzuje się stop 41Cr4 mający następujący skład chemiczny: węgiel 0,39%, molibden 0,04% i chrom 0,88% (tabela 5). Ponadto, dla wymienionego obszaru zauważyć można największe natężenie indukcji magnetycznej B (rys.14), która wynosi ok. 25 mT dla wartości skutecznei dwuczęstotliwościowego prądu wzbudnika wynoszącej ok. 300 A.

Tabela 8. Zestawienie podstawowych parametrów procesu hartowania dla trzech różnych stopów stali

| Baramatr | Metoda | Rodzaj stopu stali | | | |
|------------------------------|------------|--------------------|-------|---------|--|
| Farameu | hartowania | C45 | 41Cr4 | 42CrMo4 | |
| | MF | 10,7 | 10,2 | 10,4 | |
| B , mT | HF | 19,9 | 16,8 | 18,1 | |
| | MF+HF, 2F | 24,4 | 21,2 | 23,3 | |
| | MF | 23,9 | 22,4 | 23,5 | |
| E , J/mm ³ | HF | 34,1 | 33,5 | 33,4 | |
| | MF+HF, 2F | 36,2 | 34,7 | 35,8 | |
| | MF | 350 | 326 | 339 | |
| <i>T</i> , °C | HF | 791 | 776 | 782 | |
| | MF+HF, 2F | 863 | 849 | 855 | |

Analizując zbiorcze dane indukcji magnetycznej B, gęstości energii E i temperatury T zarejestrowane na wierzchołku pojedynczego zęba (tabela 8) można zauważyć, że stosując nagrzewanie dwuczęstotliwościowe można osiągnąć znacznie wyższe wartości tych wielkości. Dodatkowo odpowiednio stop dobierając stali konstrukcyjnej (charakteryzujący się np. większą zawartością węgla) nagrzewanego elementu można też wpływać Stosując na wartości tych wielkości. dwuczęstotliwościowe nagrzewanie indukcyjne można dowolnie sterować procesem wnikania pola magnetycznego. Dobierając odpowiednio częstotliwości składowe MF i HF prądu wzbudnika, możliwe jest sterowanie procesem nagrzewania dowolnego elementu o dość złożonym i nieregularnym kształcie, jak również o dowolnym składzie chemicznym.

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);
- błędu modelowania, gdyż model matematyczny nie odzwierciedla dokładnie rzeczywistości;
- błędu wartości współczynników równań różniczkowych przyjęte wartości współczynników równań różniczkowych

jak i warunków brzegowych np. dane materiałowe obarczone są błędem;

 błędu zaokrągleń, czyli błędu wynikającego z wielokrotności przybliżeń powtarzanych wartości modelu.

Podsumowanie

przedstawiono komputerowy W artykule model mostkowego falownika rezonansowego zbudowanego w oparciu o tranzystory MOSFET z węglika-krzemu SiC. Prezentowany model obwodowy falownika charakteryzował się mocą znamionową na poziomie 3 kW i został sprzęgnięty z modelem 3D układu grzejnego w postaci wzbudnika i wsadu. W wyniku 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 trzech typowych stopów stali dla trzech podstawowych rodzajów nagrzewania indukcyjnego. Dodatkowo, w wyniku symulacji uzyskano charakterystyki zmian rozkładu gęstości energii (rys.9 ÷ 11) w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba dla wytypowanych gatunków stali stopowych i metod nagrzewania.

Przedstawione w niniejszym artykule badania symulacyjne stanowią uzupełnienie wcześniejszych badań laboratoryjnych, które potwierdziły przydatność i możliwość szerokiego zastosowania falowników rezonansowych w jednoczesnym, dwuczęstotliwościowym nagrzewaniu indukcyjnym. Ten szczególny rodzaj nagrzewania indukcyjnego elementów metalowych o nieregularnym kształcie np. kół zebatych daje najwieksze możliwości, gdyż poprzez odpowiedni dobór częstotliwości składowych MF i HF prądu wzbudnika, możliwe jest pełne sterowanie procesem nagrzewania.

Publikacja wspierana w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza realizowanego na Politechnice Śląskiej w latach 2020 – 2021

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

LITERATURA

- Barglik J., Induction hardening of steel elements with complex shapes, Przegląd Elektrotechniczny nr 4/2018, ISSN: 0033-2097, str.51-54
- [2] Barglik J., Smagór A., Smalcerz A., Induction hardening of gear wheels of steel 41Cr4, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2018 vol. 57 suppl.1, str.3-12

- [3] Barglik, J., Smalcerz, A.: Influence of the magnetic permeability on modeling of induction surface hardening, COMPEL, 2017, 36, (2), pp. 555–564
- [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] Candeo A., Ducassy C., Bocher P., Dughiero F., Multiphysics Modeling of Induction Hardening of Ring Gears for the Aerospace Industry, IEEE Transactions on Magnetics 47 (5), 2011, p.918-921
- [6] Davies E.J., Induction Heating handbook, Mc-Graw-Hill, New York 1979
- [7] Dobrzański L. A., Podstawy nauki o materiałach i materiałoznawstwo, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002 r.
- [8] Esteve V., Jordan J., Dede E.J., Sanchis-Kilders E., Maset E., Induction Heating Inverter with Simultaneous Dual-Frequency Output, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 2006. APEC '06
- [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]Kasprzak M., Falowniki rezonansowe klasy D i DE o częstotliwościach pracy do 13,56 MHz, Monografia Habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN 978-83-7880-037-8, Gliwice 2013
- [11]Kasprzak M., Legutko P., Kierepka K., Przybyła K., Zimoch P., Falowniki dwuczęstotliwościowe do nagrzewania indukcyjnego, Śląskie Wiadomości Elektryczne nr 5/2019, ISSN: 1506-5758, str. 22-26
- [12] Kierepka K., Jednoczesny, dwuczęstotliwościowy falownik do nagrzewania indukcyjnego o strukturze półmostka SiC MOSFET, Przegląd Elektrotechniczny nr 9/2018, ISSN: 0033-2097, str.95-98

 [13] Kierepka K., Legutko P., Szeregowy, dwuczęstotliwościowy falownik do nagrzewania indukcyjnego z pojedynczym tranzystorowym typu H - problemy komutacji Przegląd Elektrotechniczny nr 5/2018, ISSN: 0033-2097, str.169-172

- [14] Skoć A., Świtoński E., Przekładnie zębate. Zasada działania. Obliczenia geometryczne i wytrzymałościowe., Wydawnictwo Naukowe PWN 2016r., ISBN: 9788301189006
- [15] Smalcerz A., Modelowanie zjawisk zachodzących podczas procesu hartowania indukcyjnego kół zębatych, Monografia Habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN 978-83-7880-341-6, Gliwice 2015
- [16] Legutko P., Symulacje MES procesu nagrzewania koła zębatego dla jednoczesnego, dwuczęstotliwościowego falownika rezonansowego, Przegląd Elektrotechniczny nr 10/2020, ISSN: 0033-2097, str.1-8
- [17] Dokumentacja techniczna tranzystora SCH2080KE dostępna pod adresem: www.rohm.com