

Hartownia do badań precyzyjnego sterowania procesem hartowania indukcyjnego

Krzysztof Konopka

1. Wprowadzenie

Hartowanie jest popularną metodą zmiany mechanicznych właściwości stali. Proces hartowania składa się z dwóch etapów: nagrzewania powyżej temperatury przemiany austenitycznej, a następnie chłodzenia z odpowiednią szybkością. Zależnie od wymaganych parametrów hartowanego materiału stosuje się hartowanie skrośne lub powierzchniowe.

Rośnie na rynku zapotrzebowanie na produkty o ściśle zdefiniowanych parametrach mechanicznych, w tym o ściśle określonych strefach hartowania. Często wymagane jest utwardzenie tylko wybranych fragmentów powierzchni przedmiotu, dodatkowo określana jest też głębokość utwardzenia. Na przykład hartowane mają być tylko te odcinki wału, które współpracują z łożyskami ślizgowymi i głębokość hartowania ma wynosić 2 mm. Często istnieje również potrzeba utwardzania powierzchni o różnych, nieregularnych kształtach, przykładem wieloklinów, kół zębatach, wałków z wpustami, łopatek turbin itp. Wysoko stawiane wymagania w kwestii precyzji hartowania powodują, że konieczne jest stosowanie metod nagrzewania, które pozwalają na kontrolowanie temperatury i głębokości nagrzewania. Popularną metodą w takich przypadkach jest nagrzewanie indukcyjne. Polega ono na umieszczeniu grzanego elementu w zmiennym polu magnetycznym wytwarzanym przez cewkę nagrzewniczą (induktor). Zmienne pole magnetyczne indukuje w elemencie prądy wirowe, które na skutek rezystywności materiału powodują jego nagrzewanie. Zjawisko naskórkowości powoduje, że nagrzewana jest głównie powierzchnia elementu, co jest korzystne w przypadku hartowania powierzchniowego. Dobierając odpowiednio czas nagrzewania oraz częstotliwość prądu w induktorze, można sterować głębokością nagrzewania w procesie hartowania.

Proces hartowania jest trudny, a często obecnie niemożliwy do zasymulowania w całości. Występuje wiele czynników mających wpływ na proces i chociaż opis fizyczny czy chemiczny zachodzących procesów jest w zasadzie rozpoznany, to ilość danych koniecznych do uwzględnienia w modelu symulacyjnym bardzo komplikuje obliczenia i szacowany czas obliczeń jest na tyle długi, że praktycznie nierealizowalny. W praktyce dostępne na rynku programy symulacyjne są wyspecjalizowane do równoczesnych obliczeń jednego lub kilku wybranych pól. Z tego powodu parametry hartowania określa się najczęściej doświadczalnie, szczególnie jeśli hartowany element nie jest typowy.

Dla takich badań zaprojektowano i zbudowano omawianą hartownię badawczą. Powstała ona w ramach projektu „Innowacyjne rozwiązania urządzeń indukcyjnych firmy ELKON dzięki pracom badawczo-rozwojowym” nr

UDA-POIG.01.04.00-24-021/10, we współpracy z Politechniką Śląską w Gliwicach. Hartownia daje możliwość zainstalowania jednocześnie dwóch zasilaczy, które mogą być wykonane w różnych technologiach (tranzystorowe IGBT lub MOSFET, tyrystorowe). Zapewnia wspólne sterowanie tymi zasilaczami, posiada również szerokie możliwości ruchu w 3 osiach sprzężonych, co umożliwia dopasowanie się do skomplikowanych kształtów hartowanych elementów. Dzięki możliwości zainstalowania jednocześnie dwóch różnych nagrzewnic indukcyjnych można stosować dwie częstotliwości do hartowania elementów, co może być korzystne na przykład w hartowaniu powierzchniowym kół zębatach [1, 7]. Zastosowanie serwonapędów umożliwia precyzyjne sterowanie ruchem w trzech osiach: pionowej, poziomej oraz obrotowej, z możliwością sprzęgania osi. Umożliwia to hartowanie powierzchni o skomplikowanych kształtach w trzech wymiarach, na przykład łopatki turbin, hartowanie pojedynczo zębów dużych zębatek itp. Całość urządzenia sterowana jest przez sterownik PLC. Program umożliwia zadawanie parametrów ruchu, parametrów nagrzewania i chłodzenia.

Dzięki możliwości sterowania wieloma parametrami procesu hartowania omawiana hartownia służy do badań nad określaniem stref hartowania powierzchni, takich jak: sworznie, wewnętrzne powierzchnie tulei, powierzchnie płaskie, czasze, koła zębata metodą pojedynczych zębów, wielokliny, listwy zębata, wieńce kół zębatach. Stanowisko umożliwia dobór mocy, prędkości posuwu induktora, częstotliwości prądu induktora, geometrii induktora, intensywności schładzania oraz badanie wpływu tych parametrów na twardość i rozkład twardości na powierzchni hartowanego elementu.

2. Budowa hartowni

Podczas konstruowania przedstawianego stanowiska badawczego duży nacisk położono na umożliwienie szybkiego demontażu, transportu, montażu i uruchomienia. Jest to szczególnie istotne w przypadku urządzenia prototypowego, które wielokrotnie jest przewożone na różnego rodzaju wystawy i targi. Jednak równie istotna jest mobilność w przypadku urządzeń produkcyjnych. Pozwala na maksymalne skrócenie czasu uruchamiania urządzenia w miejscu docelowym oraz ułatwia ewentualne późniejsze przenoszenie urządzenia podczas reorganizacji produkcji.

W prezentowanym projekcie mobilność urządzenia osiągnięto poprzez dążenie do maksymalnie kompaktowej, zwartej budowy oraz poprzez podział na moduły, które można szybko



Rys. 1. Badawcza hartownia indukcyjna

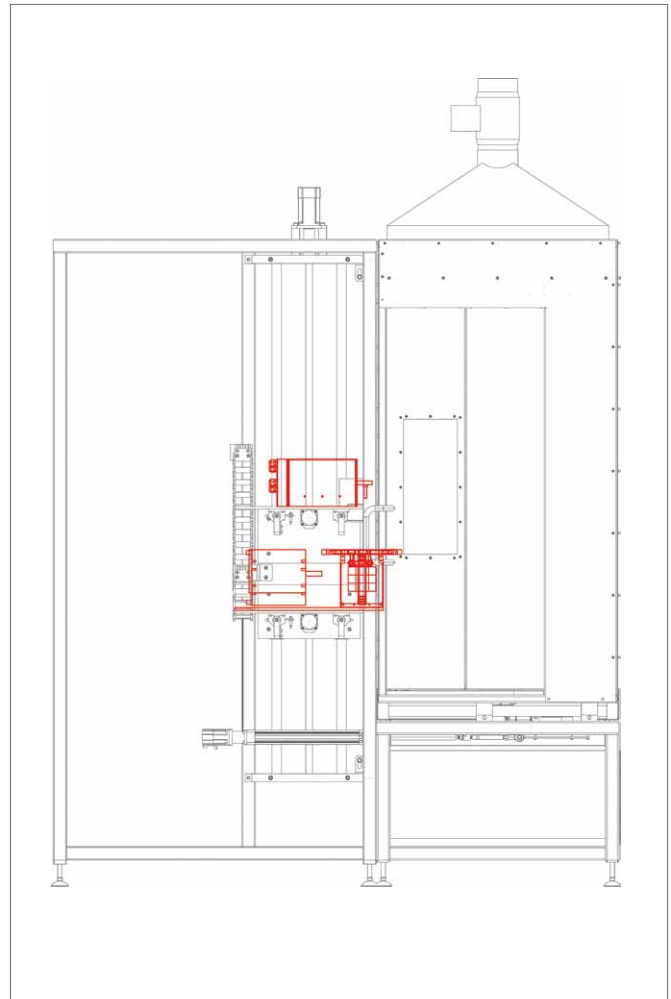
rozłączyć mechanicznie i elektrycznie, a później szybko zmontować bez ryzyka błędnych połączeń.

Prezentowane urządzenie z uwagi na przeznaczenie do badań jest wielofunkcyjne. Ma możliwość sterowania ruchem w trzech osiach związanych z położeniem induktora względem elementu, w szczególności ma możliwość sterowania kątem obrotu uchwytu trójszczękowego oraz prędkością obrotów. W prezentowanym rozwiązaniu istnieje możliwość programowania stref nagrzewania wzdłuż wałka, możliwość precyzyjnego przesuwania uchwytu w osi poziomej w celu właściwego ustawienia elementu w osi induktora oraz możliwość sterowania kątem obrotu uchwytu, w celu precyzyjnego ustawienia np. wieloklinu w induktorze z dopasowanym koncentratorem pola magnetycznego, bądź w celu hartowania kół zębatach lub łańcuchowych metodą pojedynczych zębów. Ruch elementu hartowanego względem induktora realizowany jest przez serwonapędy. Komora hartownicza połączona jest z szafą sterującą z generatorami tranzystorowymi. Pierścień zraszający jest zintegrowany z induktorem. Urządzenie jest wyposażone w trzy obwody chłodzenia wodnego w obiegu zamkniętym.

2.1. Nagrzewnice indukcyjne

Hartownia ma możliwość zainstalowania jednocześnie dwóch nagrzewnic indukcyjnych. W chwili obecnej są zainstalowane testowo: nagrzewnica tranzystorowa IGBT 50 kW, pracująca z częstotliwością 15–35 kHz, oraz nagrzewnica tranzystorowa IGBT 10 kW, pracująca z częstotliwością 110 kHz. Docelowo planowane jest zainstalowanie nagrzewnicy tranzystorowej MOSFET o częstotliwości do 500 kHz.

Zastosowanie dwóch nagrzewnic umożliwia badanie hartowania dwuczęstotliwościowego. Nagrzewanie dwuczęstotliwościowe może być przydatne, gdy istnieje potrzeba hartowania powierzchniowego na przykład kół zębatach [1–3, 5–7].



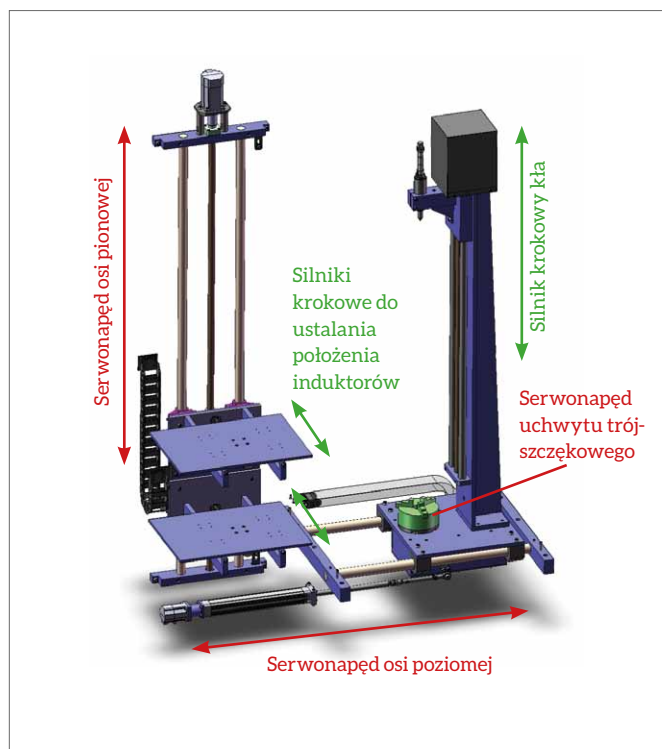
Rys. 2. Hartownia badawcza ma możliwość zainstalowania dwóch nagrzewnic indukcyjnych jednocześnie

2.2. Moduł ruchu

Hartowany element mocowany jest od dołu w samocentrującym uchwycie trójszczękowym. W przypadku długich elementów jest możliwość ustalenia pozycji od góry za pomocą kła, co zapewnia osiowość położenia elementu względem induktora. Z założenia hartownia jest stanowiskiem badawczym, które powinno mieć możliwość łatwego dostosowania do nowych zadań. Rośnie zainteresowanie precyzyjnym hartowaniem elementów nieregularnych, zatem w stanowisku zastosowano trzy podstawowe osie ruchu z możliwością ich sprzęgania. Dzięki temu możliwe jest zaprogramowanie złożonej trajektorii ruchu tak, aby induktor podążał za krzywizną hartowanego elementu.

Podstawowe trzy osie napędzane są serwonapędami. Ruch w osi pionowej realizowany jest poprzez ruch pionowy induktorów; ruch obrotowy – serwonapęd obraca uchwyt trójszczękowy, w którym zamocowany jest hartowany element; ruch w osi poziomej to przesuwanie stołu z uchwycem wzdłuż osi hartowni.

Dodatkowo zastosowano trzy pomocnicze silniki krokowe: dwa do precyzyjnego ustawiania induktorów w osi poziomej poprzecznej do osi hartowni oraz jeden do przesuwania kła trzymającego hartowany element od góry.



Rys. 3. Przesuwanie hartowanego elementu względem induktora realizowane jest w trzech osiach za pomocą serwonapędów. Dodatkowe silniki krokowe służą do ustalania położenia induktorów względem osi oraz do przesuwania kła

2.3. Sterowanie

Wszystkie funkcje hartowni zarządzane są przez sterownik PLC Mitsubishi serii L z modułem ruchu Simple Motion [8]. Sterownik realizuje proces hartowania zgodnie z wybraną sekwencją działań, nadzoruje prawidłową realizację procesu, monitoruje parametry urządzenia i realizuje tryby awaryjne w razie nieprawidłowości.

Nagrzewanie może być realizowane przez układ sterowania na różne sposoby. Podstawowe tryby nagrzewania to:

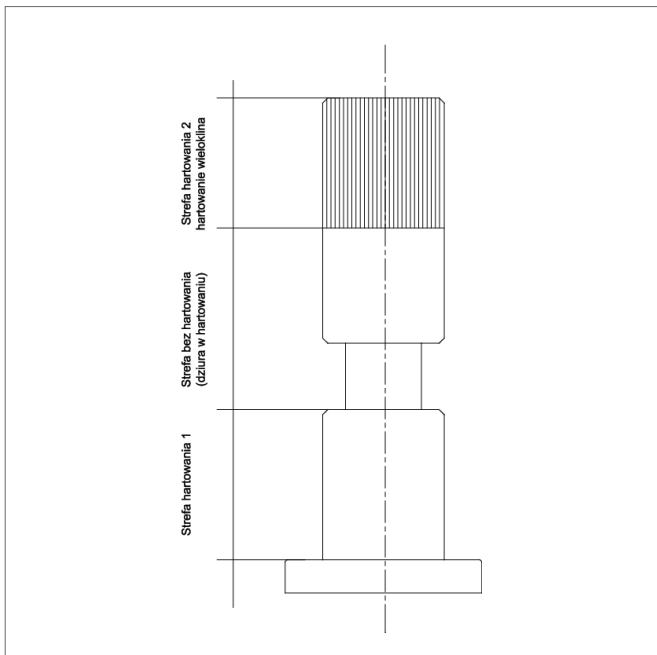
- tylko nagrzewnica 1;
- tylko nagrzewnica 2;
- nagrzewnica 1 oraz nagrzewnica 2.

Jeżeli wybrany jest tryb grzania dwiema nagrzewnicami, sposób realizacji tego nagrzewania może być różny i można go zmieniać zależnie od rodzaju prowadzonych badań. Można grzać z jednorazową sekwencją: najpierw nagrzewnicą 1, potem nagrzewnicą 2. Inny sposób to tryb szybkiego przełączania pomiędzy nagrzewnicą 1 i 2 z określonym wypełnieniem.

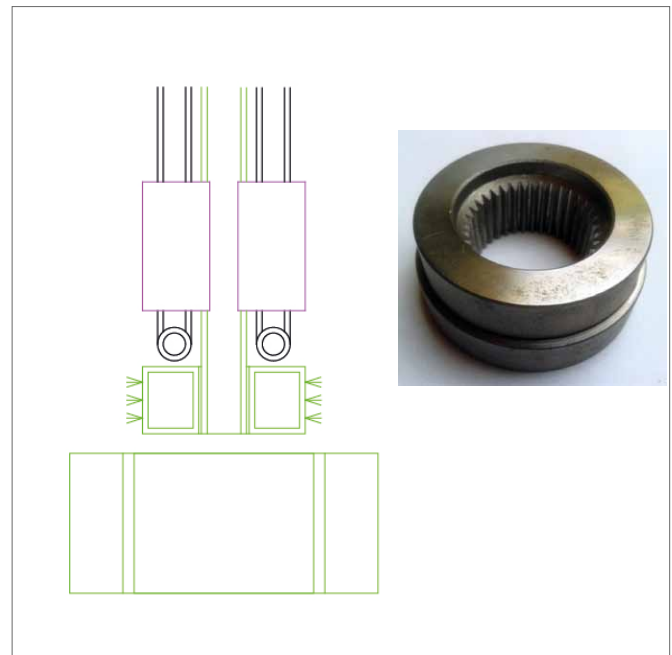
Struktura programu sterownika umożliwia szybkie dostosowanie programu hartowni do aktualnych potrzeb badawczych. Zawsze dostępne są standardowe tryby pracy, wystarczające w większości przypadków. W miarę postępu prac badawczych dodawane są nowe funkcjonalności w zależności od potrzeb.

Poniżej wymieniono podstawowe tryby pracy zaimplementowane na dzień dzisiejszy w oprogramowaniu sterownika. Tryby te wynikają z zapotrzebowania podczas dotychczasowych badań. Modułowa struktura oprogramowania umożliwia wprowadzanie w razie potrzeby nowych funkcjonalności.

1. Hartowanie elementów długich – np. wałki, tuleje, wielokliny.
 - 5 podstawowych stref hartowania wzdłuż osi pionowej.
 - Dla każdej strefy hartowania można zdefiniować prędkość ruchu i moc grzania.
 - Oś pozioma – ustalona pozycja na początku procesu, brak ruchu podczas hartowania.
 - Możliwa praca z obracaniem elementu (np. dla wałków) lub praca z nieruchomą osią obrotową (np. powierzchnie płaskie).
 - Nagrzewanie w trybie 1, 2 lub 3.
 - Możliwość nagrzewania powierzchni zewnętrznych (wałki) lub wewnętrznych (tuleje).
2. Hartowanie elementów krótkich – np. koła zębate o niewielkiej średnicy, krótkie tuleje itp.
 - 3 podstawowe strefy hartowania.
 - Dla każdej strefy hartowania można zdefiniować prędkość ruchu i moc grzania.
 - Oś pozioma – ustalona pozycja na początku procesu, brak ruchu podczas hartowania.
 - Możliwa praca z obracaniem elementu lub praca z nieruchomą osią obrotową (np. induktor dopasowany do obwiedni zębów).
 - Nagrzewanie w trybie 1, 2 lub 3. W trybie 3 – możliwe grzanie z jednorazową sekwencją: najpierw nagrzewnicą 1, potem nagrzewnicą 2, ewentualnie tryb szybkiego przełączania pomiędzy nagrzewnicą 1 i 2 z określonym wypełnieniem.
 - Możliwość nagrzewania powierzchni zewnętrznych lub wewnętrznych.
3. Hartowanie kół zębatach metodą pojedynczych zębów.
 - Stosowane dla kół zębatach o większej średnicy.
 - Jednorazowo hartowany jest jeden ząb lub inny powtarzalny element.
 - Induktor podczas nagrzewania może być nieruchomy lub przesuwany się w pionie z 3 strefami grzania.
 - Po zahartowaniu pojedynczego zęba induktor odjeżdża w pionie do pozycji neutralnej i koło zębate obracane jest do następnej pozycji pracy.
4. Hartowanie elementów zagłębionych.
 - Powierzchnia hartowana jest zagłębiona w stosunku do pozostałej powierzchni elementu.
 - 5 podstawowych stref hartowania wzdłuż osi pionowej jak w trybie 1.
 - Wprowadzony dodatkowy ruch w osi poziomej pozwalający na dosunięcie induktora do hartowanej powierzchni.
 - Możliwa praca z obracaniem elementu lub bez.
5. Hartowanie elementów zagłębionych o wielu ściankach lub wielu zębach.
 - Podobnie jak w trybie 4 realizowane jest przed nagrzewaniem dosunięcie elementu do induktora w osi poziomej.
 - Powierzchnia hartowana jest zagłębiona i ma kilka płaszczyzn hartowanych oddzielnie (np. rys. 10) lub kształt zębów w kole zębatach wymaga odsuwania induktora w osi poziomej (rys. 11).
6. Hartowanie elementów o nieregularnej powierzchni hartowania – np. łopatki turbin, śruby trapezowe.
 - Tryb wykorzystuje w pełni możliwości modułu Motion sterującego serwonapędami. Ruch wykonywany jest jed-



Rys. 4. Przykład wałka z dwiema oddzielnymi strefami hartowania



Rys. 5. Przykład tulei, gdzie hartowany był wewnętrzny wieloklin

nocześniej przez wybrane serwonapędy, pomiędzy zadanymi punktami w przestrzeni z zadaną interpolacją. Dzięki temu możliwe jest podążanie induktora za krzywizną elementu.

Wymienione tryby pracy hartowni badawczej mogą być z łatwością przekształcone w tryby pracy produkcyjnej (duże tablice receptur, uzależnienie dostępu do funkcjonalności od zalogowanego użytkownika, zautomatyzowany eksport danych produkcyjnych oraz informacji o awariach, zdalny dostęp do urządzenia poprzez internet itp.)

3. Przykładowe badania przeprowadzone na hartowni prototypowej

W dalszej części artykułu przedstawiono przykładowe badania elementy, które ilustrują możliwości przedstawianej hartowni prototypowej oraz możliwe zastosowanie standardowych trybów pracy.

3.1. Wałek z dwiema oddzielnymi strefami hartowania

Przykładem hartowania elementów długich może być wałek z wieloklinem przedstawiony na rysunku 4. Jak widać na rysunku, wymagane są dwie oddzielne strefy hartowania. Wykorzystano standardowy tryb 1 z pięcioma strefami grzania. W środkowej strefie 3 wyłączano grzanie całkowicie, co odpowiadało strefie bez hartowania. Skrajne strefy 1 i 5 wykorzystano do grzania z mniejszą mocą ze względu na mniejsze oddawanie ciepła na końcach. Element był obracany podczas grzania dla uzyskania jednolitej temperatury na obwodzie.

3.2. Tuleja z wieloklinem

Przedstawiona na rys. 5 tuleja z wewnętrznym wieloklinem hartowana była z użyciem standardowego trybu 2. W pierwszym kroku induktor nagrzewał powierzchnię wewnętrzną z zadaną mocą i przez zadany czas. W drugim kroku induktor

w krótkim czasie podejżdżał do góry i następowało chłodzenie poprzez pierścień zraszający. Element był obracany podczas grzania i chłodzenia dla uzyskania jednolitej temperatury na obwodzie.

3.3. Koło zębate hartowane w całości

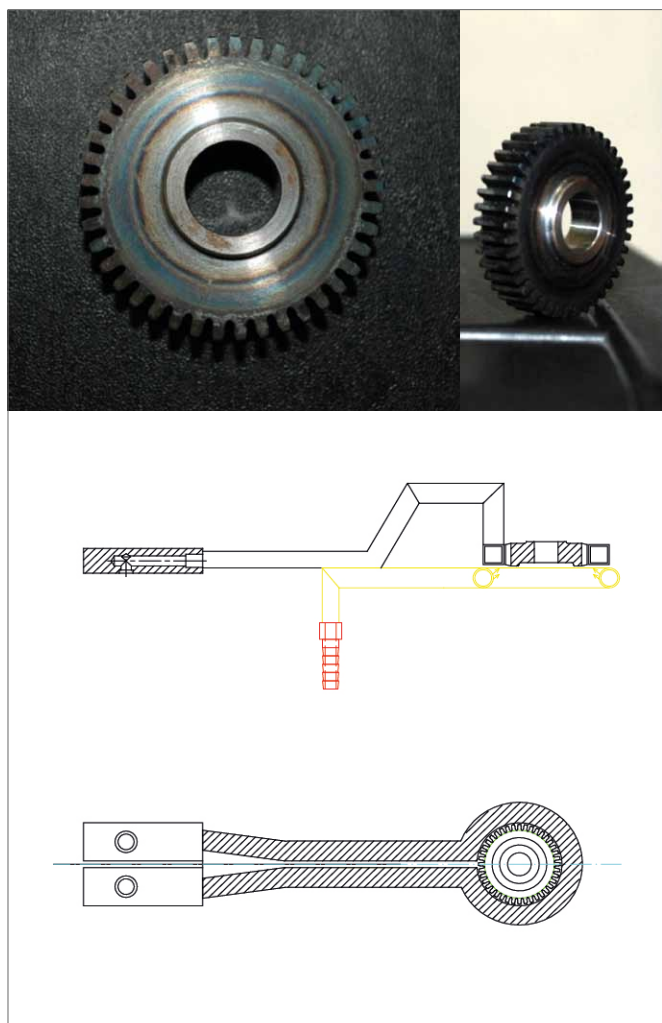
Przykład koła zębatego nagrzewanego w całości przedstawia rys. 6. Podstawowa sekwencja hartowania w przypadku takiego koła polega na nagrzewaniu całości koła bez ruchu w osi pionowej, a następnie szybkim przesunięciu induktora w górę i zraszaniu nagrzanego elementu [4].

Prowadzone są również badania nad hartowaniem dwuczęstotliwościowym takich elementów z zastosowaniem dwóch nagrzewnic. Możliwe są dwie konfiguracje induktorów: dwa induktory o różnych średnicach umieszczone na tej samej wysokości (rys. 7 a) lub dwa induktory o identycznych średnicach wewnętrznych umieszczone jeden nad drugim (rys. 7 b).

Pierwsza konfiguracja umożliwia szybsze przełączenie grzania oraz więcej możliwości modyfikowania sekwencji grzania. Niekorzystne jest natomiast oddalenie zewnętrznego induktora od nagrzewanego elementu. Druga konfiguracja wymusza prostą sekwencję: grzanie nagrzewnicą 1 – grzanie nagrzewnicą 2 – chłodzenie. Umożliwia natomiast dobre dopasowanie obu induktorów do grzanego elementu [7]. W toku są badania, które pozwolą określić zakres przydatności obu metod hartowania dwuczęstotliwościowego.

3.4. Koło zębate – hartowane pojedyncze zęby

Koła zębate o większej średnicy nie są hartowane w jednym cyklu, jak małe koło w poprzednim przykładzie. Po pierwsze, wymagałoby to nagrzewnic o dużej mocy. Po drugie, odległość między szczytem zęba a dnem wrębu jest duża i okrągły induktor nagrzewałby dużo mocniej szczyty zębów, a induktor dopasowany do obwiedni koła zębatego byłby skomplikowany

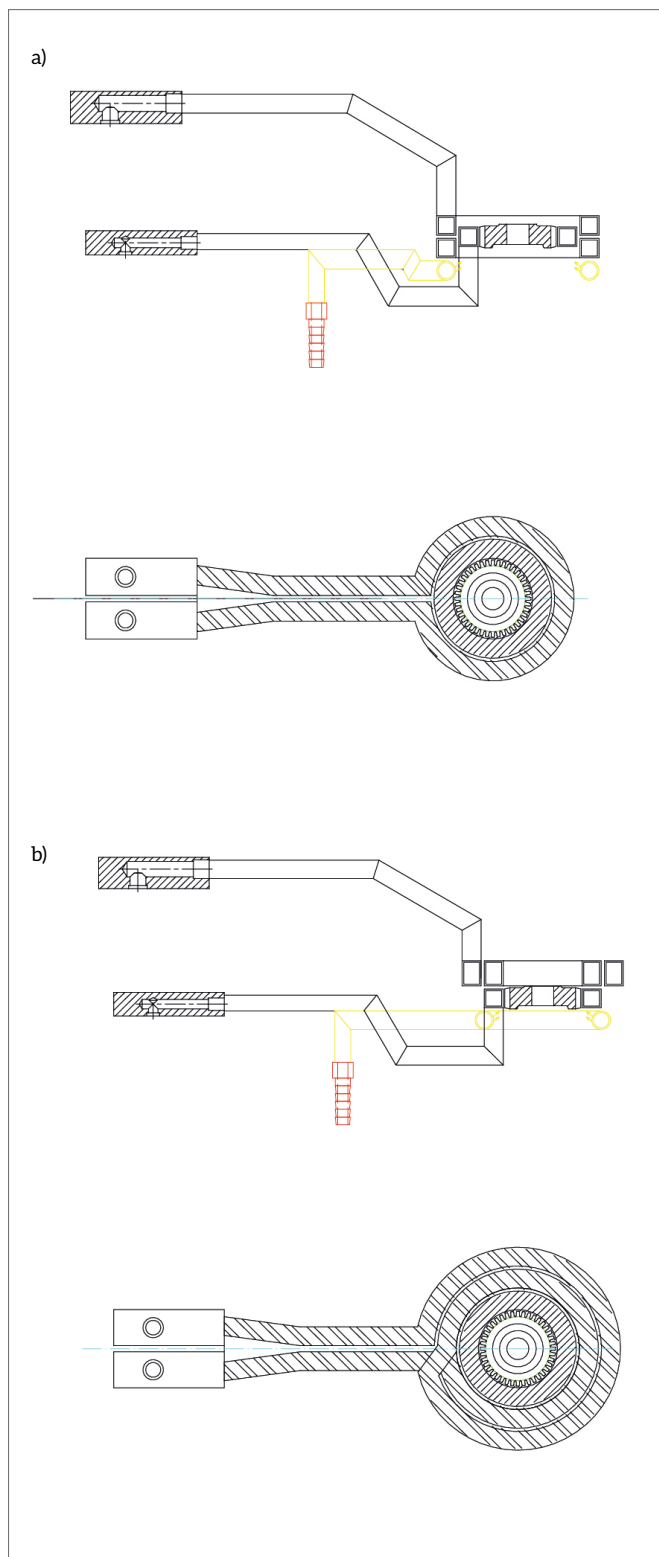


Rys. 6. Przykład koła zębatego hartowanego w całości. Grzanie jedną częstotliwością

i przez to drogi. Dodatkowo trudne do uniknięcia byłoby nierównomierne nagrzewanie związane z trudnościami z zachowaniem jednakowej odległości induktora od koła zębatego na całym obwodzie. W takich przypadkach stosuje się hartowanie po kolei pojedynczych zębów. Przykład takiego rozwiązania pokazuje rysunek 8. Zastosowano standardowy tryb 3 z trzema strefami grzania. Środkowa strefa przebiegała wzdłuż całej wysokości koła, strefy 1 i 3 obejmowały krawędzie górną i dolną, gdzie zmniejszono moc z uwagi na mniejszy odbiór ciepła. Po zahartowaniu pojedynczego zęba induktor odjeżdżał w pionie do pozycji nad kołem i koło obracane było o 45° do następnego zęba.

3.5. Element z zagłębioną strefą hartowania

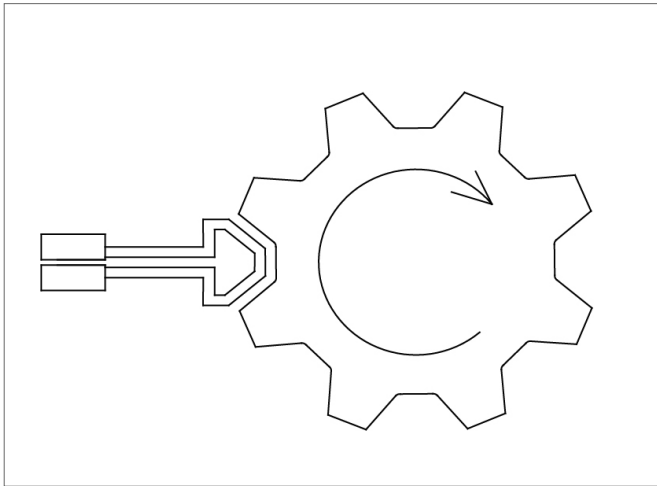
Hartowany był wałek widoczny na rysunku 9, w którym zahartowana miała być wytoczona powierzchnia o mniejszej średnicy. W tym przypadku induktor po dojechaniu do pozycji pracy na osi pionowej musiał zostać przybliżony do elementu wzdłuż osi poziomej. Po nagraniu induktor oddalał się od elementu, podjeżdżał do góry i następowało chłodzenie. Element podczas nagrzewania i chłodzenia był obracany.



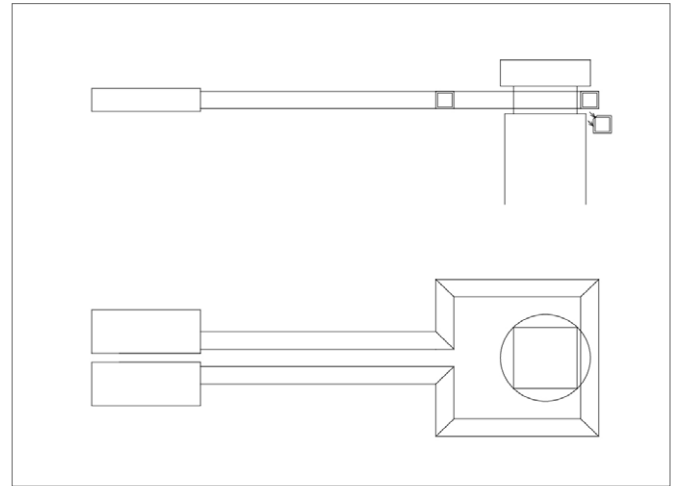
Rys. 7. Hartowanie dwuczęstotliwościowe z zastosowaniem dwóch oddzielnych nagrzewnic

3.6. Element o wielu ściankach z zagłębioną strefą hartowania

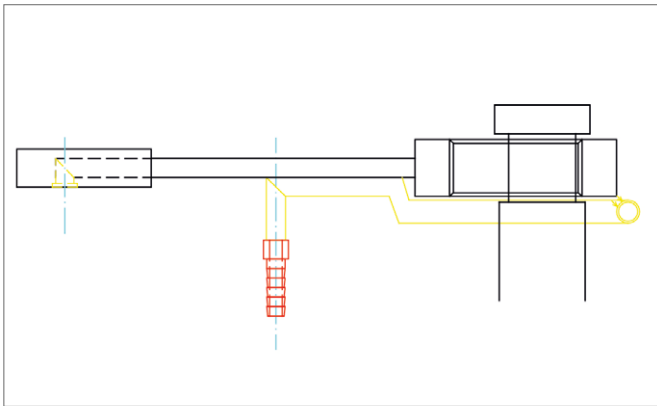
Elementy, w których hartowane mają być powierzchnie płaskie zagłębione względem reszty, nagrzewa się tak jak duże zębatki – niezależnie każdą ściankę, przy czym ruch indukto-



Rys. 8. Hartowanie pojedynczych zębów większych kół zębatych



Rys. 10. Hartowanie powierzchni płaskich zagłębionych



Rys. 9. Wałek z zagłębioną strefą hartowania

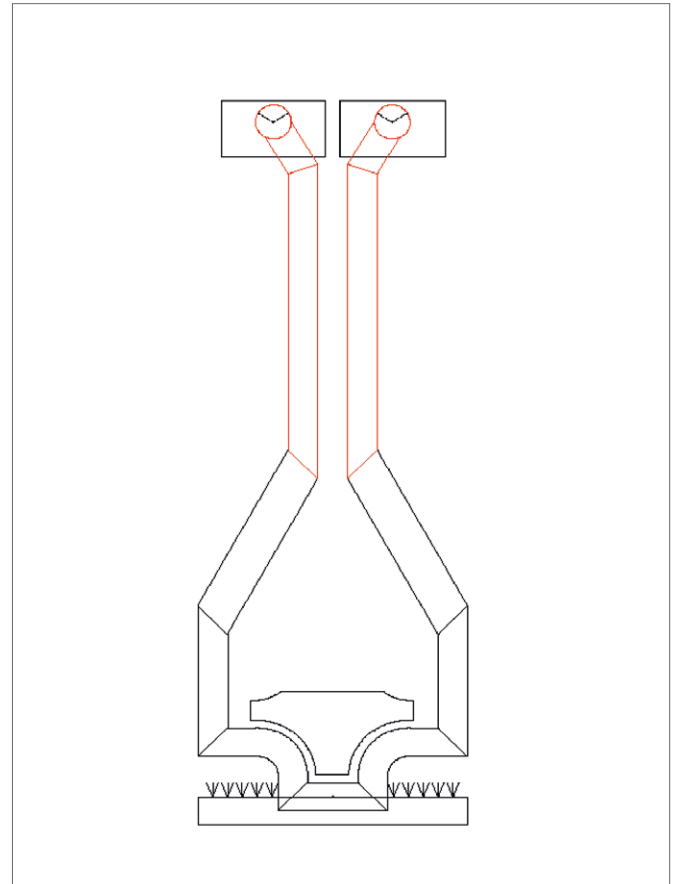
ra musi uwzględniać też ruch w poziomie, jak w elementach z zagłębioną strefą hartowania o przekroju okrągłym. Przykład takiego elementu przedstawia rysunek 10. W przedstawionym tam przypadku hartowane mają być cztery ścianki wyfrezowane w wałku. Induktor zjeżdża do pozycji roboczej, przysuwa się do hartowanej ścianki, następuje cykl grzania, następnie induktor szybko odsuwa się i podjeżdża do góry i następuje chłodzenie przez listwę zraszającą zintegrowaną z induktorem. Następnie element obracany jest o 90° i cykl powtarza się (tryb pracy nr 5).

Identyczna sekwencja hartowania wykorzystana była dla koła zębatego, którego zęby miały kształt przedstawiony na rys. 11, przy czym sekwencja powtarzana była dwunastokrotnie i kąt obrotu wynosił 30° .

Taki sam tryb pracy wykorzystano do hartowania wpustu w wałku przedstawionym na rysunku 12, przy czym tutaj sekwencja wykonywana była jednokrotnie.

3.7. Hartowanie śruby trapezowej

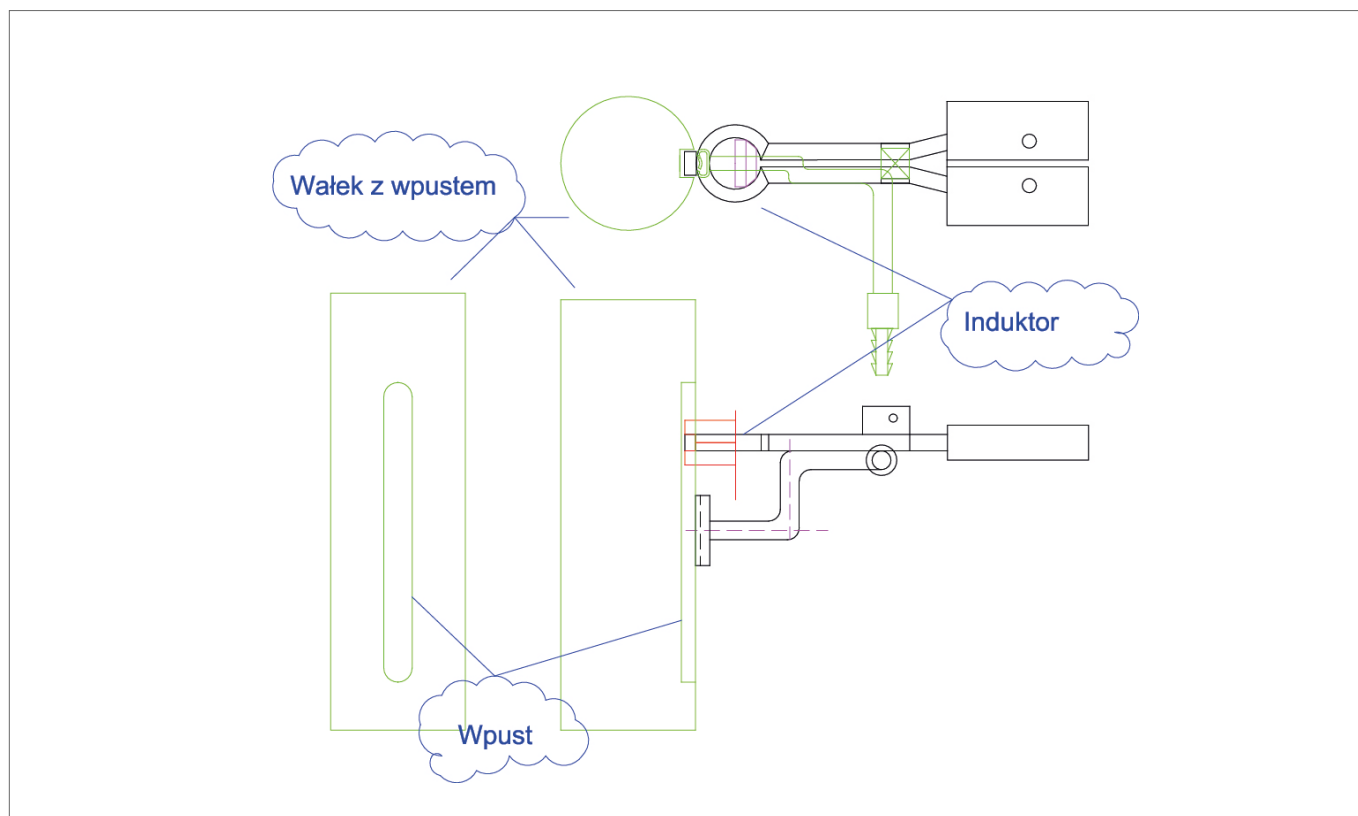
Śruba trapezowa jest przykładem elementu, dla którego w procesie hartowania konieczny jest jednoczesny ruch w dwóch osiach – pionowej i obrotowej. W takim przypadku ruch obu osi musi być sprzężony, co zapewnia specjalistyczny moduł sterownika Simple Motion.



Rys. 11. Hartowanie kół zębatych o skomplikowanym kształcie zębów

4. Podsumowanie

Projektując przedstawione urządzenie, duży nacisk położono na jego uniwersalność oraz mobilność, oczywiście w zakresie możliwym do zrealizowania w tego typu urządzeniu. Uniwersalność potrzebna była ze względu na przeznaczenie zbudowanego prototypu. Ma on służyć przede wszystkim badaniom różnego rodzaju zagadnień związanych z indukcyjnym hartowaniem powierzchniowym różnorodnych elementów. Z tego



Rys. 12. Hartowanie wpustów w wałkach


powodu duży nacisk położono na szerokie możliwości sterowania ruchem hartowanego elementu oraz induktora nagrzewającego tak, aby można było zrealizować jak najszerszy wachlarz badań zgodnie z potrzebami, które mogą się pojawić w przyszłości. Z tego powodu ruch w trzech osiach realizowany jest przez serwonapędy, a moduł sterujący napędami ma możliwość sprzęgania osi. Również z uwagi na rozwój i uniwersalność zaprojektowano możliwość zainstalowania jednocześnie dwóch różnych nagrzewnic ze wspólnym sterowaniem. Daje to możliwość prób hartowania jedną z dwu częstotliwości bez pracochłonnego przebudowywania stanowiska, a także rozwijanego współcześnie hartowania dwuczęstotliwościowego [1–7].

Budowa przedstawionego stanowiska badawczego jest szczególnie istotna ze względu na fakt, że zjawiska zachodzące podczas hartowania są złożone i ma na nie wpływ wiele czynników. Z tego powodu są one trudne do symulowania i w praktyce przed podjęciem decyzji produkcyjnych zawsze przeprowadzane są próby na rzeczywistym elemencie. Drugim obszarem zastosowania jest właśnie weryfikacja praktyczna założeń przyjętych przy tworzeniu modelu symulacyjnego [1–4]. W obu przypadkach właściciele stanowiska są otwarci na współpracę badawczą z jednostkami naukowymi i przemysłowymi.

Literatura

- [1] PRZYŁUCKI R., SMALCERZ A.: *Induction heating of gears – pulsing dual-frequency concept*. *Metalurgija* 52(2)/2013, pp. 235–238.
- [2] NIKLEWICZ M., SMALCERZ A.: *Application of three-coil cylindrical inductor in induction heating of gears*. „Przegląd Elektrotechniczny” 86(5)/2010, pp. 333–335.

- [3] NIKLEWICZ M., SMALCERZ A., KUREK A.: *Estimation of system geometry and inductor frequency importance in induction hardening process of gears*. „Przegląd Elektrotechniczny” 84(11)/2008, pp. 219–224.
- [4] SMALCERZ A., PRZYŁUCKI R., KONOPKA K., FORNALCZYK A., ŚLEZOK M.: *Multi-variant calculations of induction heating process*. *Archives of Materials Science and Engineering*, 58(2)/2012, pp. 177–181.
- [5] MIYAMAE M., ITO T., MATSUSE K., TSUKAHARA M.: *Performance of a High Frequency Quasi-Resonant Inverter with Variable-Frequency Output for Induction Heating*. IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference – ECCE Asia, Harbin, China, 2012.
- [6] OKUDAIRA S., MATSUSE K.: *Adjustable Frequency Quasi-Resonant Inverter Circuits Having Short-Circuit Switch Across Resonant Capacitor*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 4, 2008.
- [7] MUCHA G., NOVORSKY D., PFAFFMANN G.: *Method for Hardening Gears by Induction Heating*, United States Patent Number: 4,675,488, 1987.
- [8] <http://www.mitsubishielectric.com>.

 dr inż. Krzysztof Konopka – Politechnika Śląska,
Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki
e-mail: krzysztof.konopka@polsl.pl

artykuł recenzowany