

Zastosowanie indukcji elektromagnetycznej w przetwórstwie i obróbce termicznej metali – wdrożone, zautomatyzowane procesy technologiczne

Application of electromagnetic induction in processing and heat machining of metals – implemented automated technological processes

KRZYSZTOF KONOPKA
ZDZISŁAW KONOPKA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.11.165>

English version available on: www.mechanik.media.pl

Artykuł prezentuje 4 wdrożone zautomatyzowane systemy technologiczne dotyczące termicznej obróbki i przetwarzania metali z zastosowaniem nagrzewania indukcyjnego, w których istotną rolę odgrywa precyzyjne sterowanie licznymi parametrami procesu.

SŁOWA KLUCZOWE: nagrzewanie indukcyjne, hartowanie indukcyjne, lutowanie indukcyjne, odlewanie ciągłe, automatyzacja procesów grzania indukcyjnego

The paper presents four implemented automated systems for thermal machining and processing of metals using induction heating, where precise control of numerous process parameters plays an important role.

KEYWORDS: induction heating, induction hardening, induction brazing, continuous casting, automation of induction heating processes

W praktyce przemysłowej do kształtowania form oraz właściwości metali coraz częściej wykorzystuje się nagrzewanie indukcyjne, które wypiera nagrzewanie gazowe lub olejowe. Procesy hartowania, odpuszczania, wyżarzania, lutowania, zgrzewania, topienia i odlewania to obszary, w których zastosowanie grzejnictwa indukcyjnego wciąż wzrasta. Producentom stawiane są coraz wyższe wymagania dotyczące: precyzji kształtowania form, dokładnego zdefiniowania parametrów mechanicznych wyrobów (zwłaszcza tych przeznaczonych dla przemysłu motoryzacyjnego i lotniczego) oraz ich powtarzalności w produkcji masowej, a także kontroli i archiwizacji parametrów produkcyjnych – to pociąga za sobą konieczność stosowania systemów zautomatyzowanych i zrobotyzowanych. Podczas projektowania i wdrażania systemów obróbki cieplnej metali można się wspomagać programami symulacyjnymi w celu wstępnego dobrania parametrów urządzeń, jednak dopiero praktyczne badania weryfikują te parametry.

Autorzy artykułu postanowili podzielić się doświadczeniami z zastosowania grzejnictwa indukcyjnego na przykładzie wybranych, wdrożonych rozwiązań zautomatyzowanych systemów nagrzewania, hartowania, wyżarzania, odpuszczania, spawania, walcowania, topienia i odlewania. Dalej przedstawiono 4 zautomatyzowane systemy technologiczne dotyczące termicznej obróbki i przetwarzania metali z zastosowaniem nagrzewania indukcyjnego:

- zautomatyzowany proces nagrzewania indukcyjnego w operacjach hartowania, odpuszczania, spawania i wyżarzania – stosowany zwłaszcza w produkcji elementów przeniesienia napędu w samochodach;

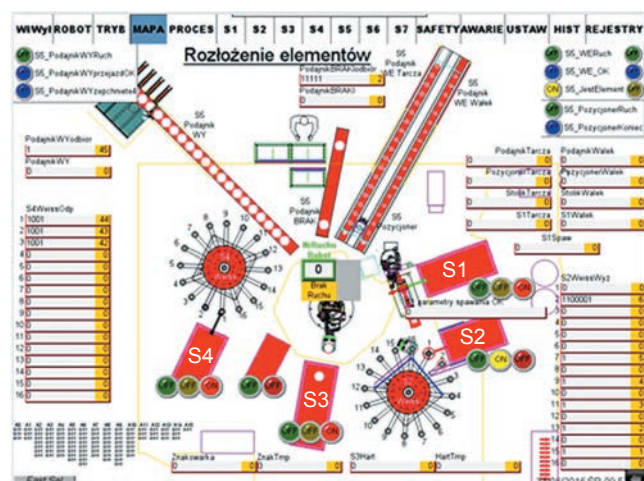
- automatyczną linię technologiczną do walcowania gwintów na gorąco;
- zautomatyzowany proces lutowania indukcyjnego;
- automatyczną linię topienia i odlewania ciąglego walców ze stopów miedzi.

Zautomatyzowany proces nagrzewania indukcyjnego w operacjach hartowania, odpuszczania, spawania i wyżarzania

Zautomatyzowaną linię technologiczną, obejmującą 4 gniazda obróbki termicznej – spawanie, wyżarzanie spawów, hartowanie i odpuszczanie po spawaniu – pokazano schematycznie na rys. 1. Rysunek przedstawia jeden z ekranów sterownika zarządzającego, na którym wyświetlany jest m.in. rzut linii technologicznej.

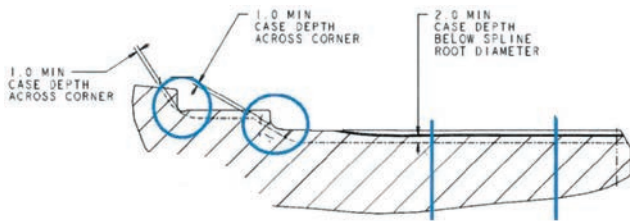
Elementy składowe przeznaczone do obróbki są dostarczane za pomocą podajników wejściowych, a następnie umieszczane w przyrządzie spawalniczym S1. Spawanie elementów jest zrobotyzowane, a proces jest poprzedzony nagrzewaniem indukcyjnym spawanych miejsc. Parametry procesu spawania dobrano metodą wielokrotnych prób.

Kolejnym etapem jest wyżarzanie indukcyjne spawów realizowane na stanowisku S2. Następnie robot przemysłowy przenosi element do urządzenia do hartowania indukcyjnego S3. Profil hartowania, głębokość hartowania i rozkład twardości w strefie zahartowanej są ściśle określone i narzucone przez konstruktora – przykładowe wymagania pokazano na rys. 2. Taki profil możliwa uzyskać jedynie za pomocą urządzenia zautomatyzowanego, które zapewnia sterowanie prędkością, a ponadto umożliwia przesuwanie wzbudnika w 2 osiach w trakcie hartowania oraz strefowe programowanie parametrów hartowania. Uzyskaną strefę zahartowaną przedstawiono na rys. 3a.



Rys. 1. Rzut ekranu głównego sterownika linii technologicznej z widocznym rozmieszczeniem modułów linii

* Dr inż. Krzysztof Konopka (krzysztof.konopka@polsl.pl) – Politechnika Śląska, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki; dr inż. Zdzisław Konopka (z.konopka@elkon.com.pl) – Zakład Elektroniki i Automatyki Przemysłowej „ELKON” Sp. z o.o.



Rys. 2. Wymagany przebieg strefy zahartowanej wzdłuż wałka



Rys. 3. Przykładowe kształty profilu zahartowanego

Po zahartowaniu robot przenosi element do urządzenia, w którym następuje indukcyjne odpuszczanie, a po tej operacji – do znakowania i na taśmociąg wyjściowy.

Procesy nagrzewania indukcyjnego przed spawaniem, wyżarzania spawów czy odpuszczania indukcyjnego nie są skomplikowane, a ich automatyzacja wiąże się głównie z utrzymywaniem w określonym czasie zadanej wartości temperatury. Znacznie trudniejszy do automatyzacji jest proces hartowania indukcyjnego powierzchniowego o skomplikowanym przebiegu strefy zahartowanej. Jak widać na rys. 2, element hartowany ma różne średnice, a wymagana strefa utwardzenia obejmuje zarówno średnice, jak i powierzchnie przejścia między nimi. Należy pamiętać, że nie każdy kształt strefy zahartowania jest możliwy do uzyskania w efekcie hartowania indukcyjnego, co wynika z charakteru zjawisk fizycznych wykorzystywanych w tym procesie. Szczególną rolę odgrywa tu zjawisko naskórkowości, które powoduje, że indukowany prąd płynie po najbardziej zewnętrznej średnicy. Skutkuje to m.in. tym, że przy zmianie średnicy zewnętrzna krawędź uskoku ma tendencję do przegrzewania się, podczas gdy wgłębienie jest niedogrzone. Podobne zjawiska zachodzą w przypadku różnego rodzaju rowków w hartowanej powierzchni.

Generalnie rosną wymagania wobec utwardzania indukcyjnego powierzchni o różnych, nieregularnych kształtach, które wcześniej były utwardzane metodą klasyczną – przez nawęglanie. Hartowanie indukcyjne jest tańsze, a dzięki odpowiedniemu sterowaniu umożliwia kontrolowanie temperatury i głębokości nagrzewania oraz utrzymywanie tych parametrów w wieloseryjnym procesie hartowania.

Proces hartowania indukcyjnego jest trudny, a często niemożliwy do zasymulowania w całości, ponieważ ma na niego wpływ wiele czynników. I chociaż opis fizyczny czy chemiczny zachodzących zjawisk w zasadzie jest rozpoznany, to ilość danych, które trzeba uwzględnić w modelu symulacyjnym, bardzo komplikuje obliczenia [1, 5]. W praktyce dostępne na rynku programy symulacyjne są wyspecjalizowane do równoczesnych obliczeń 2 wybranych parametrów. Z tego powodu w praktyce parametry hartowania indukcyjnego określa się zazwyczaj doświadczalnie.

Uzyskanie złożonych przebiegów strefy zahartowanej jest możliwe w urządzeniach o szerokim zakresie regulacji położenia wzbudnika względem hartowanego elementu (dzięki serwonapędowi), pozwalających na programowanie parametrów ruchu oraz mocy nagrzewania, a w szczególnych przypadkach – dzięki zainstalowaniu generatorów o szerokim zakresie częstotliwości prądu wzbudnika. Pozwala to na hartowanie powierzchni o skomplikowanych kształtach w 3 wymiarach (np. czaszy, kół zębatych

– metodą pojedynczych zębów, wieloklinów, listew zębatych, wieńców kół zębatych [2, 3]). Często konieczne jest też odpowiednie wymodelowanie wzbudnika i stosowanie koncentratorów magnetycznych. Przykłady uzyskanych kształtów strefy zahartowanej pokazano na rys. 3.

Automatyczna linia technologiczna do walcowania gwintów na gorąco

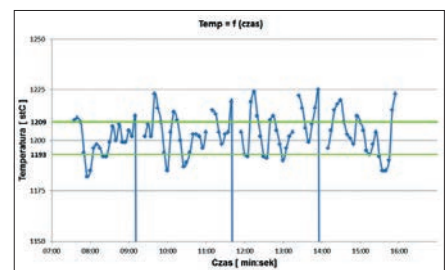
Prezentowana linia technologiczna została zbudowana na potrzeby walcowania gwintów na prętach stalowych o średnicy $\varnothing 20\div 30$ mm. W skład linii wchodzi: nagrzewnica indukcyjna, walcarka, podajnik prętów i transporter odbiorczy prętów nagwintowanych. Widok linii technologicznej przedstawiono na rys. 4a, a gotowy wyrób – na rys. 4b.

Rys. 4. Automatyczna linia technologiczna do walcowania gwintów na gorąco (a) i gotowy wyrób (b)



Regulacja temperatury musi uwzględniać: zmienność warunków nagrzewania – wynikającą z nierównomiernego wypełnienia wzbudnika na początku i na końcu walcowania, zmiany prędkości przesuwania się elementu oraz przemianę magnetyczną materiału podczas nagrzewania. Istotny wpływ na pracę układu ma temperatura pręta podczas walcowania, ponieważ plastyczność nagrzanej stali powoduje wydłużanie się elementu podczas walcowania i tym samym zmianę prędkości liniowej walcowanego pręta, podczas gdy mierzona prędkość obrotowa walców pozostaje stała, co z kolei wpływa zwrótnie na temperaturę pręta (zmiana czasu przebywania pręta we wzbudniku). To dodatkowo sprzężenie zwrotne musi zniwelować regulator. Zasadniczym problemem w pracy układu regulacji temperatury pręta jest duża inercja cieplna obiektu, a także fakt, że efekt regulacji jest mierzony dopiero na wyjściu nagrzewanego pręta ze wzbudnika. Pomimo dynamiki zmian parametrów zakłóceń i inercji obiektu regulacji przy zadanej temperaturze 1200°C uzyskano dokładność regulacji na poziomie 2% dla odchyłki maksymalnej i 0,7% dla odchyłki średniej. Temperaturę pręta na wejściu do walcarki mierzono pirometrem. Przebieg czasowy temperatury pręta przed walcowaniem przedstawiono na rys. 5.

Rys. 5. Przebieg czasowy temperatury pręta przed walcowaniem

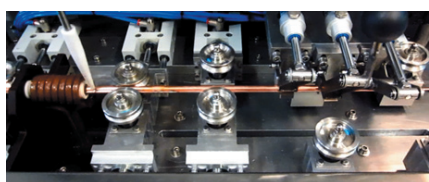


Zautomatyzowany proces lutowania indukcyjnego

Lutowanie indukcyjne jest coraz chętniej wprowadzane w zautomatyzowanej produkcji masowej, gdzie – o ile jest możliwe do zastosowania – wypiera lutowanie płomieniowe.

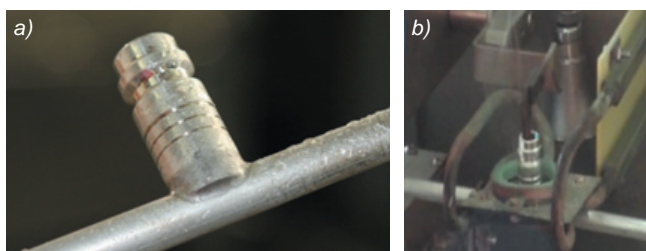
Prędkość nagrzewania indukcyjnego jest parametrem decydującym o wydajności operacji i minimalizacji kosztów. Różnorodność zastosowań lutowania indukcyjnego jest bardzo duża, ale autorzy ograniczyli się do przedstawienia 2 procesów lutowania w wersji automatycznej.

■ **Lutowanie wzdłużne rurek miedzianych.** Tę metodę szeroko wykorzystuje się w procesie produkcji układów chłodzenia lodówek i zamrażarek. Rurka miedziana, najczęściej o średnicy $\varnothing 6$ lub $\varnothing 8$ mm, jest lutowana wzdłużnie z rurką o średnicy $\varnothing 1,8$ mm – na długości 4÷6 m. Przykładowe rozwiązanie zaprezentowano na rys. 6. Poszczególne etapy lutowania są automatyczne, zgodne z programem procesu, tj. z zadaną prędkością lutowania i mocą nagrzewnicy. Po nagraniu rurek i nałożeniu lutu przez podajnik rurki są ściskane rolkami aż do momentu skrzepnięcia stopu. Wszystkie operacje technologiczne są realizowane według opracowanego programu.



Rys. 6. Fragment urządzenia do lutowania wzdłużnego rurek miedzianych. Widoczne są: część grzewcza, podajnik lutu, rolki ściskające i chwytak ciągnący rurki

■ **Lutowanie elementów aluminiowych.** Ten proces również jest zautomatyzowany (z uwagi na produkcję masową) i pozwala na lutowanie zaworków aluminiowych do aluminiowych rurek pod kątem prostym. Problem z nagrzewaniem wynika z nierównomierności kształtu i masy zaworka w stosunku do kształtu i masy rurki. Lutowanie jest wykonywane za pomocą lutu AlSi12 o temperaturze topnienia mniejszej zaledwie o 30°C od temperatury topnienia aluminium. Widok elementu zlutowanego indukcyjnie przedstawiono na rys. 7a. W projektowaniu urządzenia do lutowania indukcyjnego najistotniejszy jest dobór kształtu wzbudnika (rys. 7b), zapewniający taki rozkład temperatury, że lut będzie wciągany w wymagane miejsce połączenia (miejsce o wyższej temperaturze).



Rys. 7. Lutowanie elementów aluminiowych: a) gotowy wyrób, b) wzbudnik podczas lutowania

Automatyczna linia topienia i odlewania ciągłego wałków ze stopów metali nieżelaznych

Odlewanie ciągle metali to już klasyka. Godne uwagi są natomiast innowacyjne rozwiązania techniczne prezentowanego urządzenia, które powstało z myślą o odlewnictwie rozproszonym produktów wytwarzanych metodą odlewania ciągłego, jako wyższym stopniu przetwarzania metali pozyskiwanych w przetwórstwie wtórnym (zdominowanym przez małe i średnie firmy). Cechy takiego systemu to: niskie koszty inwestycyjne, krótki okres zwrotu nakładów, łatwość eksploatacji i przeprowadzania remontów, łatwość zmiany profilu produkcji i podejmowania produkcji małoseryjnej, ekologiczność, komfort pracy, zwartość przestrzenna.

Należy podkreślić, że dla firm recyklingowych odlewanie ciągle stanowi wyzwanie. Proces ten wymaga szczególnej wiedzy inżynierskiej z zakresu odlewnictwa i mechatroniki.

W prezentowanej linii – zgodnie z klasyką odlewania ciągłego – w piecu indukcyjnym topliowym przygotowany jest roztopiony metal lub stop o zadanym składzie chemicznym i odpowiedniej temperaturze [4]. Roztopiony metal przelewany jest do pieca odlewniczego, w którego tygłu są zabudowane 2 krystalizatory, tworzące 2 niezależne tory wyciągania odlewów (rys. 8). Wydajność każdego toru wynosi ok. 100 kg/h wałka o średnicy $\varnothing 30$ mm. Po schłodzeniu odlewu (w układzie chłodzenia wtórnego) przechodzi on przez układ wyciągania do układu cięcia odlewu na wymaganą handlowo długość, a następnie jest odkładany w magazynku odlewów. Każdy tor odlewania ma swój system sterowania procesem z programowanymi parametrami: temperaturą metalu w piecu odlewniczym, prędkością wyciągania oraz czasami taktów wyciągania, zatrzymania i cofania wałka. Programowane są również: temperatura wody chłodzącej krystalizatory, intensywność chłodzenia wtórnego oraz temperatura tygla pieca topliowego i pieca odlewniczego. Automatyka procesu odlewania ciągłego umożliwia programowanie tego procesu dla różnych technologii odlewania (zależnych od rodzaju metalu i składu chemicznego jego stopów), a ponadto (jak w prezentowanym rozwiązaniu) – cięcie na zadane odcinki oraz magazynowanie.



Rys. 8. Linia odlewania ciągłego

Podsumowanie

Cechą wspólną przedstawionych układów automatyki przemysłowej w zastosowaniu do urządzeń bazujących na zjawisku indukcji elektromagnetycznej jest to, że nie są to koncepcje, lecz rozwiązania wdrożone, działające w realiach przemysłowych. Proces wdrażania każdego takiego układu wymaga rozwiązywania na bieżąco wielu problemów inżynierskich i naukowych.

LITERATURA

- Smalcerz A., Przyłucki R., Konopka K., Fornalczyk A., Śleszak M. „Multi-variant calculations of induction heating process”. *Archives of Materials Science and Engineering*. 58, 2 (2012): s. 177–181.
- Konopka K. „Hartownia do badań precyzyjnego sterowania procesem hartowania indukcyjnego”. *Napędy i Sterowanie*. 16, 1 (2014): s. 86–92.
- Konopka K. „Hartowanie z precyzyjnym sterowaniem procesem hartowania indukcyjnego”. *Stal Metale & Nowe Technologie*. 9/10 (2014): s. 140–142.
- Konopka K. „Układ pomiarowy do badania zależności dynamiki mieszania płynnego metalu od pola magnetycznego” *PAK 60*, 2 (2014): s. 87–89.
- Barglik J., Smalcerz A., Wieczorek T. „Modelowanie matematyczne procesu nagrzewania indukcyjnego powierzchniowego”. *Zeszyty Naukowe. Elektryka*. Politechnika Łódzka. 125 (2013): s. 185–192. ■