

## Badania zakresu głębokości warstwy zahartowanej metodą grzania indukcyjnego

*Research on the range of hardened layer depths that can be achieved using a prototype of a wide-frequency induction generator*

**Streszczenie.** Artykuł prezentuje badania związane z opracowaniem prototypu generatora indukcyjnego o szerokim zakresie zmian częstotliwości prądu wzbudnika (30-300 kHz) oraz prototypu uniwersalnego wielozadaniowego modułowego indukcyjnego pieca hartowniczego. Celem prototypu była możliwość uzyskania szerokiego zakresu głębokości warstwy zahartowanej na jednym urządzeniu. W tym celu przeprowadzono badania i opracowano technologie hartowania, wyniki tych badań przedstawiono w artykule.

**Abstract.** The article presents research related to the development of a prototype of an induction generator with a wide range of changes in the frequency of the inductor current (30-300 kHz) and a prototype of a universal multi-purpose modular induction hardening furnace. The aim of the prototype was to be able to obtain a wide range of hardened layer depths on a single device. For this purpose, research was carried out and hardening technologies were developed, the results of which are presented in the article.

**Słowa kluczowe:** hartowanie indukcyjne, piec hartowniczy, generator wysokiej częstotliwości, głębokość warstwy zahartowanej

**Keywords:** induction hardening, hardening furnace, high frequency generator, hardened layer depth

### Wstęp

Brakuje na rynku uniwersalnych urządzeń do powierzchniowego hartowania indukcyjnego, które dawałyby możliwość hartowania elementów o szerokim zakresie średnic lub uzyskania szerokiego zakresu głębokości hartowania. MSP działające w obszarach wytwarzania części mechanicznych dla przemysłu maszynowego, samochodowego, lotniczego, kolejowego, górniczego itp. zgłaszają potrzebę urządzeń uniwersalnych, które można dostosować do zmiany produkowanego asortymentu. Rynek odbiorców produkcji takich przedsiębiorstw wymaga możliwości częstych zmian produkowanego asortymentu i charakteryzuje się krótkimi seriami. Rozwiązania dostępne dedykowane są najczęściej do produkcji jednego typu i właściwości urządzenia takie jak moc i częstotliwość pracy optymalizowane są dla wąskiego zakresu, co ma uzasadnienie w przypadku długich serii produkcyjnych. W przypadku dużej różnorodności produkcji nie ma możliwości dostosowania urządzenia do nowego produktu, albo parametry pracy nie są optymalne. Generatory dostępne na polskim rynku [9,10,11] pracują w jednym wąskim zakresie częstotliwości  $\pm 15\%$  od bazowej. W przypadku badań hartowania dwuczęstotliwościowego, stosuje się dwa generatory, oddzielnie do średniej i wysokiej częstotliwości [12,13]

Potrzeba rynkowa powoduje wyzwanie technologiczne w postaci opracowania uniwersalnego urządzenia do hartowania indukcyjnego charakteryzującego się szerokim zakresem wielkości hartowanych elementów oraz szerokim zakresem możliwej do uzyskania głębokości hartowania. W oparciu o potrzeby rynku określono zakres głębokości warstwy zahartowanej od 0,5 mm do 6 mm, natomiast zakres średnic od 6 mm do 250 mm. Dla osiągnięcia takich zakresów parametrów potrzebny jest generator o szerokim zakresie częstotliwości pracy 30–300 kHz i mocy 100–50 kW. Istotnym problemem technologicznym jest uzyskanie pełnego zakresu częstotliwości i mocy w jednym urządzeniu.

Uzyskanie małej głębokości warstwy zahartowanej rzędu 0,5 mm wymaga zastosowania wysokiej częstotliwości i dużej mocy, co umożliwi nagrzanie cienkiej warstwy metalu w krótkim czasie, a następnie szybkiego schłodzenia cienkiej warstwy.

Uzyskanie dużej głębokości warstwy zahartowanej wymaga nagrzewania ze średnią lub niską częstotliwością, stosunkowo mniejszą mocą (w przeliczeniu na nagrzewaną masę), przez dłuższy czas. Po nagraniu istotne jest intensywne odbieranie dużej ilości ciepła, w celu uzyskania odpowiedniej stromości spadku temperatury.

Podobnie rozmiar hartowanego elementu, w szczególności średnica, determinuje zakres częstotliwości korzystny do nagrzewania takiego elementu. Jest to najczęściej powiązane z wymaganą głębokością warstwy zahartowanej. Dla małych średnic wymagana jest często niewielka głębokość warstwy zahartowanej, poniżej 1 mm, i dla takich elementów stosuje się urządzenia o wysokiej częstotliwości prądu we wzbudniku. Z kolei w elementach o większych średnicach wymagana jest najczęściej większa głębokość warstwy zahartowanej, z reguły 4 mm, a nawet 6 mm. [1]

Dostępne na rynku urządzenia hartujące oferowane są najczęściej jako urządzenia pracujące w niskiej, średniej lub wysokiej częstotliwości. Często oferowane są urządzenia dedykowane do określonego produktu lub procesu. Dostępne są np. urządzenia do hartowania zaworów, urządzenia do hartowania tulei itp. Powoduje to, że dane urządzenia umożliwiają hartowanie elementów w określonym zakresie średnic i w określonym zakresie głębokości warstwy zahartowanej. Przykładowo dla niskich częstotliwości, poniżej 10 kHz, minimalna średnica hartowanego elementu wynosi około 30 mm, można uzyskać głębokość hartowania od 6 mm do około 2 mm

Średnie częstotliwości umożliwiają hartowanie elementów o średnicach od 15 mm do 250 mm i uzyskanie głębokości od 1,5 mm do 6 mm.

Uzyskanie małej głębokości warstwy zahartowanej, rzędu 0,5 mm, wymaga zastosowania wysokiej częstotliwości, która jest jednak niekorzystna w przypadku konieczności uzyskania dużej głębokości hartowania. Wysoka częstotliwość nagrzewa cieńszą warstwę materiału, zatem moc przekazywana jest płycej. Powoduje to, że w jednostce czasu można przekazać mniej energii do wsadu bez przegrzania powierzchni niż przy niższych częstotliwościach. Konieczność ograniczania przekazywanej mocy prowadzi do nieuzyskania wymaganej do zahartowania temperatury (ciepło odbierane jest przez zimne wnętrza elementu). Wysokie częstotliwości

umożliwiają hartowanie elementów o średnicach 6 do 30 mm. [4,5]

Dla producenta korzystna jest możliwość hartowania jednym urządzeniem elementów o różnych średnicach i różnych wymaganych głębokościach warstwy zahartowanej, ponieważ zakup oddzielnego, dedykowanego urządzenia jest nieopłacalny przy krótkich seriach. Jeżeli jedno urządzenie obsługuje szeroki zakres produkcji, to koszty wdrażania produkcji krótkoseryjnych są zmniejszone. [2,3]

Biorąc pod uwagę przedstawione potrzeby, opracowano w firmie ELKON [8] w ramach projektu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju POIR.01.01.01-00-1768/20 [1]:

- prototyp generatora indukcyjnego o szerokim zakresie zmian częstotliwości prądu wzbudnika,
- prototyp uniwersalnego wielozadaniowego modułowego indukcyjnego pieca hartowniczego,
- przeprowadzono badania, mające na celu dobranie technologii hartowania, która umożliwi uzyskanie różnych głębokości warstwy zahartowanej dla elementów o różnych średnicach. Przyjęto, że technologia ma umożliwić uzyskanie głębokości hartowania 0,5 ... 6 mm.

### Prototyp generatora indukcyjnego (30-300 kHz)

W ramach prac związanych z budową generatora przeprowadzono obliczenia i symulacje [6], gdzie porównano struktury falowników klasy D w układzie mostka i półmostka w zakresie wartości prądów i mocy strat tranzystorów. Określono założenia odnośnie konstrukcji generatora o mocy do 100 kW. Obliczono parametry prostownika sieciowego dla mocy 50 kW i 100 kW. Opracowano modele MES płyt warstwowych obwodu DC: 2-, 3-, i 4-ro warstwowych. Opracowano modele MES i przeprowadzono symulacje MES dwóch rodzajów transformatorów:

- osiowy z rdzeniem toroidalnym i uzwojeniem typu lica,
- z ferrytowych kształtek typu I i uzwojeniem nawiniętym rurka chłodzoną wodą.

Wyznaczono rozkład indukcji w rdzeniu, straty mocy uzwojeniach, parametry zastępcze. Przeanalizowano możliwości zastosowania kilku modułów tranzystorowych analizując wartość mocy strat w nich występujących. Ostatecznie przyjęto, że zastosowany zostanie moduł tranzystorowy SIC Mosfet 300A/1200V typu CAS300M12BM2.

Opracowano układ sterowania generatora [7]. Sterownik wykonano na bazie procesora sygnałowego TMS320F283. Sterownik realizuje metody sterowania FM w zastosowaniu do półmostka lub mostka albo metodę synchronizowaną PWM-FM w zastosowaniu do mostka (rys.1).

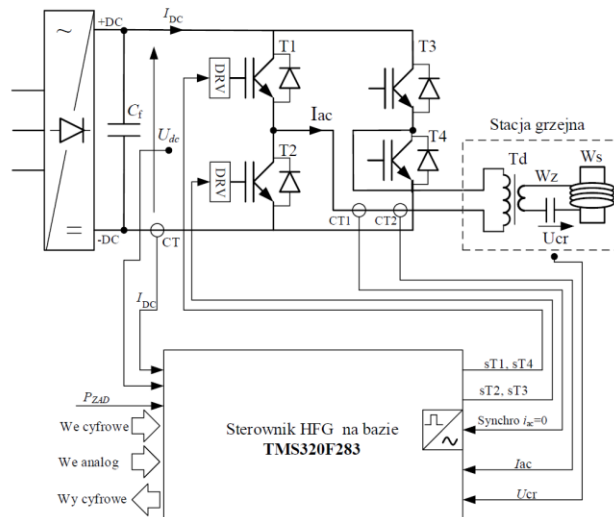
W oparciu o analizy przedstawione w raportach [6] i [7] zaprojektowano prototyp generatora (rys. 2) oraz typoszereg transformatorów prototypowych (rys. 3,4). Kluczowe było opracowanie uniwersalnej miedzianej warstwowej płyty obwodu DC z tranzystorami i kondensatorami w taki sposób, aby miała niewielkie indukcyjności pasożytnicze i nie występowały rezonanse własne dla całego założonego zakresu mocy i częstotliwości.

### Prototyp indukcyjnego pieca hartowniczego

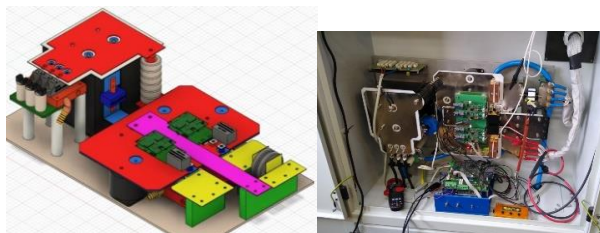
Kolejnym etapem prac było opracowanie prototypu uniwersalnego wielozadaniowego modułowego indukcyjnego pieca hartowniczego do hartowania powierzchniowego [1]. Przyjęto, że jedno urządzenie ma umożliwiać hartowanie elementów o zakresie średnic 6 ... 250 mm, o głębokości warstwy zahartowanej 0.5 ... 6 mm. W prototypie zaimplementowano opracowany wcześniej generator. Prototyp ma budowę modułową, umożliwiającą

dostosowanie urządzenia do zmiennego asortymentu hartowanych elementów.

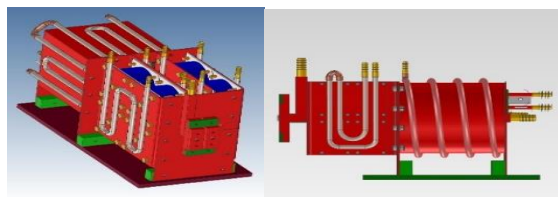
Modułowa konstrukcja mechaniczna pieca, ułatwia późniejszą rozbudowę oraz rekonfigurację urządzenia. Dzięki temu dostosowanie do profilu produkcji jest łatwe. Modułowy jest również program sterujący piecem, który umożliwia szybkie dostosowanie do wybranej konfiguracji urządzenia. Rysunek 5 przedstawia zdjęcia prototypu.



Rys. 1. Struktura układu sterowania i regulacji



Rys. 2. Prototyp generatora



Rys. 3. Projekty prototypów transformatorów w.cz.



Rys.4. Prototypy transformatorów 100kW/50kHz i 50kW/300kHz



Rys. 5 Prototyp pieca



Rys. 6. Hartowanie indukcyjne próbek podczas badań

### Badania zakresu głębokości warstwy zahartowanej

Opisane w artykule badania miały na celu sprawdzenie możliwości uzyskania granicznych głębokości określonych w projekcie, oraz optymalnych parametrów hartowania.

Do badań przyjęto wałek ze stali 40H (materiał najczęściej stosowany do budowy elementów maszyn), o średnicy 30 mm. Średnica ta umożliwiła hartowanie zarówno niższymi jak i wysokimi częstotliwościami. Dla elementów o zbliżonych średnicach spotyka się największy rozrzut wymagań dotyczących głębokości warstwy zahartowanej.

Wykonano próby przy różnych mocach nagrzewania i różnych prędkościach przesuwania wzbudnika, w celu sprawdzenia głębokości strefy utwardzonej w zależności od mocy, powierzchni nagrzewanej i czasu nagrzewania. Badania wykonano dla procesu hartowania bez nagrzewania wstępnego i z nagrzewaniem wstępnym.

Najpierw wykonano serię badań przy zamocowaniu wałka hartowanego w uchwycie obrotowym, bez podtrzymania górnej części wałka konikiem. W ten sposób obserwowano wpływ położenia wałka względem wzbudnika na nierównomierność strefy zahartowanej. Kolejne serie badań (2-4) wykonano przy zamocowaniu wałka hartowanego w uchwycie obrotowym oraz podtrzymania górnej części wałka konikiem.

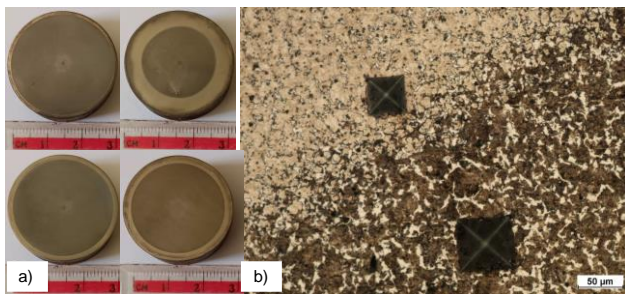
Zbadano twardość powierzchniową oraz rozkład twardości na średnicy elementu w funkcji odległości od powierzchni wałka.

Rysunek 6 przedstawia zdjęcie procesu hartowania powierzchniowego za pomocą pieca. Rysunek 7 przedstawia przykładowe przekroje wałka na których widać różne głębokości warstwy zahartowanej oraz jedno zdjęcie mikrostruktury próbki z widocznymi odciskami po pomiarze twardości.

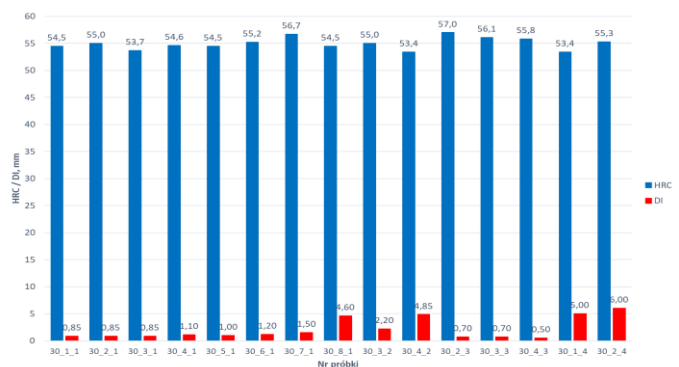
Tablica 1 i rysunek 8 przedstawiają wyniki badań zakresu głębokości warstwy zahartowanej. Uzyskano zakres głębokości warstwy od 0,5 mm do 6 mm. Dla wałka o średnicy 30 mm nie wymagało to zmian częstotliwości. Wałek o takiej średnicy można zahartować zarówno polem o niskiej jak i wysokiej częstotliwości. Hartowanie elementów o średnicach w zakresie 6 ... 250 mm będzie wymagało zmian częstotliwości dla uzyskania wymaganych parametrów. Zostało to sprawdzone także w innych badaniach nie prezentowanych w tym artykule.

Tab. 1. Badania zakresu głębokości warstwy zahartowanej w próbkach f30 ze stali 41Cr4 hartowanych powierzchniowo indukcyjnie

Seria	nr	Średn. wałka [mm]	Stal	Wzbu-dnik [mm]	Moc [kW]	f [kHz]	Prędkość skanowania [mm/s]	Temperatura polimeru [C]	Gęstość polimeru [%]	Twardość na powierzchni bocznej [HRC]	Głębokość warstwy DI [mm]	Twardość max na Di [HRC]
1	1	30	40H	fi 35	25	154,0	5,0	20,0	15	54,5	0,9	61,6
1	2	30	40H	fi 35	30	154,0	7,0	21,0	15	55,0	0,9	60,3
1	3	30	40H	fi 35	40	151,0	10,0	22,0	15	53,7	0,9	61,4
1	4	30	40H	fi 35	20	156,0	3,0	25,0	15	54,6	1,1	61,5
1	5	30	40H	fi 35	15	158,0	2,0	26,0	15	54,5	1,0	59,5
1	6	30	40H	fi 35	18	158,0	2,0	26,5	15	55,2	1,2	61,2
1	7	30	40H	fi 35	22	155,4	2,0	26,5	15	56,7	1,5	60,5
1	8	30	40H	fi 35	15/18	156,4	2,0	26,6	15	54,5	4,6	61,0
2	3	30	40H	fi 35	22	154,0	2,0	25,0	15	55,0	2,2	60,9
2	4	30	40H	fi 35	20	155,0	2,0	25,0	15	53,4	4,9	59,7
3	2	30	40H	fi 35	45	151,0	12,0	25,0	15	57,0	0,7	62,4
3	3	30	40H	fi 35	45	151,0	12,0	25,0	15	56,1	0,7	60,7
3	4	30	40H	fi 35	45	151,0	15,0	25,0	15	55,8	0,5	60,3
4	1	30	40H	fi 35	18/18	157,0	2,0	26,6	15	53,4	5,0	60,2
4	2	30	40H	fi 35	18/20	157,0	2,0	26,6	15	55,3	6,0	61,1



Rys. 7. Makrostruktura (a) i mikrostruktura (b) próbki



Rys. 8. Twardość na powierzchni HRC i głębokość utwardzenia (hartowania) DI w próbkach f30 ze stali 41Cr4 hartowanych powierzchniowo indukcyjnie

## Podsumowanie

Opracowany uniwersalny modułowy piec do hartowania powierzchniowego umożliwia dzięki szerokiemu zakresowi parametrów pracy hartowanie jednym urządzeniem elementów o różnych głębokościach warstwy zahartowanej. Taka cecha urządzenia predestynuje go do rozwiązań krótkoseryjnych. Piec jest uniwersalny, elastyczny, rekonfigurowalny. Nadaje się dla producentów maszyn, którzy często decydują się na samodzielne utwardzanie produkowanych przez siebie części, przemysłu remontowego, małych zakładów produkcyjnych będących podwykonawcami części dla dużych koncernów oraz innych firm, których produkcja charakteryzuje się dużą zmiennością. Dzięki możliwości uzyskania szerokiego zakresu parametrów hartowania jednym urządzeniem obniżone zostaną koszty wdrożenia procesu hartowania.

W praktyce dla niskich częstotliwości (poniżej 10 kHz) można uzyskać głębokość hartowania od 6 mm do około 2 mm, dla średnich częstotliwości można uzyskać głębokości

od 1,5 mm do 6 mm, dla wysokich częstotliwości można hartować elementy do głębokości 0,5 mm, jednak górna granica wynosi około 2 mm. Urządzenie znacznie poszerza możliwości hartowania elementów przy różnych nietypowych wymaganiach. W mniejszych zakładach, przy krótkich seriach daje to możliwość poszerzenia zakresu produkcji lub usług.

Opracowany prototyp stanowi podstawę do wdrożenia produkcji seryjnej pieców. W oparciu o przedstawione rozwiązanie został dotychczas zbudowany i uruchomiony jeden piec hartowniczy, drugi jest w trakcie budowy, sam generator został też wdrożony w piecu do odlewania ciąglego.

**Autor:** Krzysztof Konopka, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki  
krzysztof.konopka@polsl.pl

## LITERATURA

- [1] Raport końcowy z realizacji projektu POIR.01.01.01-00-1768/20-00
- [2] Konopka K., Konopka Z., Perspektywy grzejnictwa indukcyjnego w elektrotechnologiach i elektrociepłownictwie - dwóch dziedzinowych rynkach elektroprzemysłu, *Przegląd Elektrotechniczny*, 100 (2024), nr 8, 120-124
- [3] Konopka K., Konopka Z., Elektrotechnologie, przemysł 4.0 i elektrociepłownictwo w aspekcie Transformacji Energetycznej w Trybie Innowacji Przelomowej do Elektroprzemysłu, *Energetyka, problemy energetyki i gospodarki paliwowo-energetycznej*, 2023, nr 4, s.289-307
- [4] Konopka K., Konopka Z., Piece indukcyjne w aspekcie wymagań Przemysłu 4.0, *Przegląd Odlewnictwa*, 2020, vol. 70, nr 1/2, s.14-21
- [5] Konopka K., Sterowanie parametrami hartowania indukcyjnego w praktyce przemysłowej, W: *Pomiary w nauce i technice / Rząsa M. (red.), Studia i Monografie. Politechnika Opolska*, 2019, vol. 514, Politechnika Opolska, s.191-200, ISBN 978-83-66033-51-1
- [6] Raport z realizacji umowy warunkowej nr 1/poir/1.1.1/2020 o wykonanie pracy badawczo – rozwojowej w zakresie 1. Opracowanie szczegółowych założeń generatora o szerokim zakresie częstotliwości prądu wzbudnika od 30 do 300 kHz, 2. Badania laboratoryjne generatora o szerokim zakresie częstotliwości prądu wzbudnika od 30 do 300 kHz, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki (KENER), Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej Gliwice 2022
- [7] Raport z realizacji umowy warunkowej nr 2/poir/1.1.1/2020 o wykonanie pracy badawczo – rozwojowej pt. Usługa badawcza w zakresie opracowania układu sterowania i projekt układu laboratoryjnego generatora oraz nadzór nad wykonaniem generatora, EME – Electro & Metallurgical Engineering Ruda Śląska 2022
- [8] <https://elkon.com.pl/>
- [9] <https://www.enrx.com/pl-PL/>
- [10] <https://termetal.com.pl/>
- [11] <https://is.gliwice.pl/strona-cms/tranzystorowe-urządzenia-do-nagrzewania-indukcyjnego>
- [12] Barglik J., *Nagrzewanie indukcyjne w procesach technologicznych : Obróbka cieplna, modelowanie matematyczne i weryfikacja doświadczalna*, vol. 579. in Monografia, [Politechnika Śląska], vol. 579. Politechnika Śląska, 2015.
- [13] Barglik J., Wieczorek T., Przyłucki R., Smalcerz A., "Nagrzewanie indukcyjne w procesach obróbki cieplnej i plastycznej metali," in *Technologie materiałowe : Praca zbiorowa. [Dokument elektroniczny]*, vol. 828, D. Kuc and P. Gradoń, Eds., in Monografia, [Politechnika Śląska], vol. 828. , 2020, p. dysk optyczny (CD-ROM) 29–57.