

Krzysztof KUREK

Katedra Podstaw Procesów Metalurgicznych

Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej

Politechnika Śląska

HARTOWANIE INDUKCYJNE KÓŁ BIEGOWYCH DŹWIGNIC

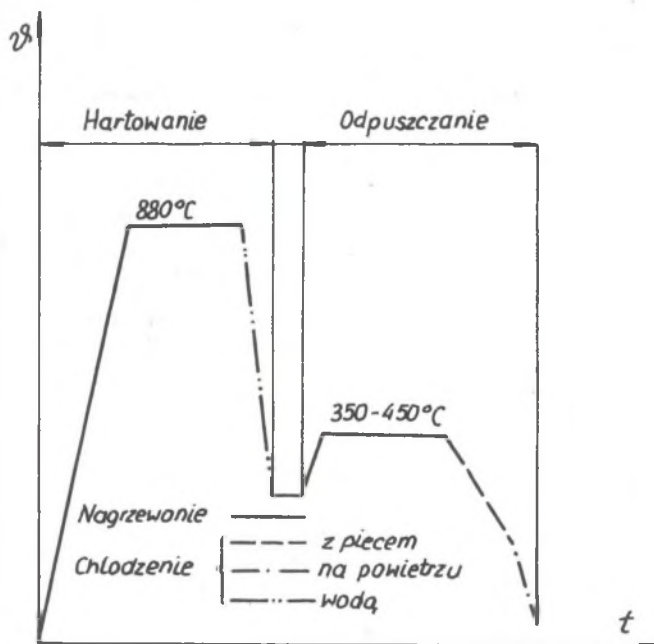
Streszczenie. Praca zawiera wyniki badań procesu hartowania indukcyjnego kół dźwigniowych. Opisano stanowisko doświadczalne. Przedstawiono rozkłady temperatur w nagrzewanych kołach oraz rozkłady twardości po hartowaniu. Omówiono wpływ obróbki cieplnej na rozkład naprężeń własnych w kołach. Przedstawiono wyniki badań eksploatacyjnych kół po hartowaniu indukcyjnym oraz porównanie energochłonności hartowania metodą tradycyjną i indukcyjną.

Summary. The paper includes the results of the induction hardening process of crane wheels. The experimental stand has been described. The deviation of temperatures in heated wheels and the spacing of hardness after hardening have been presented. This paper also discusses the influence of heat treatment upon the division of stresses in wheels. It presents the results of the exploitation investigations for the wheels after induction hardening and the comparison of energy-consuming hardening by traditional and induction method.

Резюме. Работа содержит итоги исследований процесса индукционной закалки крановых колес. Описан опытный стенд. Представлено распределение температур в нагреваемых колесах и распределения твердости после закалки. Рассмотрено влияние термообработки на распределение начальных напряжений в колесах. Представлены результаты эксплуатационных исследований колес после индукционной закалки а также сравнение энергоемкости закалки традиционным и идукционным методами.

1. WSTĘP

Produkowane w kraju koła biegowe dźwignic o średnicach 200-900 mm odlewane są ze staliw o gatunku L40G2M i L45G2, a następnie poddawane obróbce cieplnej. Technologia produkcji kół przewiduje utwardzenie bieżni i obrzeży kół do 280-360 HB, z łagodnym przejściem między warstwą utwardzoną i miękką częścią wewnętrzną wieńca. Przed hartowaniem koła nagrzewa się skrośnie w piecach płomiennych do temperatury 880 °C (rys.1) z szybkością 70-100 K/h. Po wyjęciu z pieca koła zakładane są do



Rys.1. Obróbka cieplna kół w trakcie utwardzania powierzchniowego metodą tradycyjną

Fig.1. Wheel heat treatment during the surface hardening by traditional method

urządzenia hartowniczego, w którym obracając się na rolkach zanurzane są do wody chłodzącej. Czas chłodzenia wynosi od 90 s (dla kół ϕ 230 mm) do 330 s (koła ϕ 900 mm). W celu usunięcia znacznych naprężeń własnych bezpośrednio po hartowaniu przeprowadza się odpuszczanie. Temperatura i czas odpuszczania zależą od średnicy kół - np. dla kół ϕ 280 mm proces trwa 5 h w temperaturze 440 °C, dla kół ϕ 900 mm - 9 h w temperaturze 360 °C. Stosowana technologia jest energochłonna, gdyż zamiast nagrzewać warstwy bieżni i obrzeży przeznaczone do utwardzenia, czyli na głębokość ok. 10 mm, nagrzewa całe koło, a przy tym jest mało wydajna i uciążliwa dla obsługi.

W celu wyeliminowania tych wad w Zakładzie Elektrotermii Hutniczej Politechniki Śląskiej przeprowadzono badania, w wyniku których opracowano nową, konkurencyjną technologię hartowania indukcyjnego kół biegowych dźwignic.

2. STANOWISKO DOŚWIADCZALNE

2.1. Koncepcja. Podstawowe parametry

Rozważając różne koncepcje nagrzewania jedynie warstwy przeznaczonej do utwardzania, zdecydowano się na zastosowanie metody nagrzewania indukcyjnego. O wyborze metody nagrzewania indukcyjnego i podstawowych parametrów procesu zdecydowały w rozważanym przypadku trzy czynniki:

- wymagania technologiczne (powierzchniowy charakter utwardzania),
- asortyment kół (kilkadziesiąt rodzajów, różniących się znacznie średnicą ϕ 200 - 900 mm/, szerokością bieżni /50 - 140 mm/ i sposobem wykonania),
- dostępność krajowych źródeł zasilania i urządzeń elektrycznych średniej częstotliwości (kondensatory, transformatory itp.).

Czynniki te zostały uwzględnione przy opracowaniu koncepcji nagrzewania indukcyjnego i ulepszania cieplnego kół, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych.

2.2. Metoda nagrzewania i rodzaj wzbudnika

Ze względu na szeroki asortyment kół użycie wzbudników cylindrycznych, obejmujących całą bieżnię, jest nieuzasadnione technicznie i ekonomicznie. Znacznie korzystniejsze jest zastosowanie metody jednoobrotowej, w której

koło obraca się względem wzbudnika - bezpośrednio za nim umieszczony jest natryskiwacz. Kąt obrotu powinien być nieco mniejszy od kąta pełnego, gdyż po wykonaniu pełnego obrotu nastąpiłoby ponowne nagrzanie zahartowanej już warstwy (strefa przejściowa).

2.3. Częstotliwość zasilania

Częstotliwość zasilania można dobrać według kryteriów:

- wymaganej głębokości hartowania,
- dopuszczalnych strat mocy we wzbudniku,
- maksymalnej sprawności elektrycznej wzbudnika lub całego urządzenia hartowniczego.

Spełnienie wszystkich warunków [1,6] do osiągnięcia wymaganej technologia głębokości hartowania $\Delta \cong 0,01 \text{ m}$ można uzyskać w następującym zakresie częstotliwości $150 \text{ Hz} < f < 2500 \text{ Hz}$.

2.4. Wzbudnik

Wzbudnik skonstruowano obliczając jego parametry metodą oporów magnetycznych oraz metodą analityczną (potencjału wektorowego) [1,6] z uwzględnieniem dwuwarstwowego charakteru wsadu: zewnętrzna warstwa niemagnetyczna, nagrzana powyżej temperatury Curie i wewnętrzna warstwa ferromagnetyczna, nagrzana poniżej temperatury przemiany magnetycznej. W celu uproszczenia analizy, rzeczywisty układ grzejny zastąpiono modelem, w którym wsad jest rozległą płytą stalową.

Badania przeprowadzono dla kilku rodzajów wzbudników:

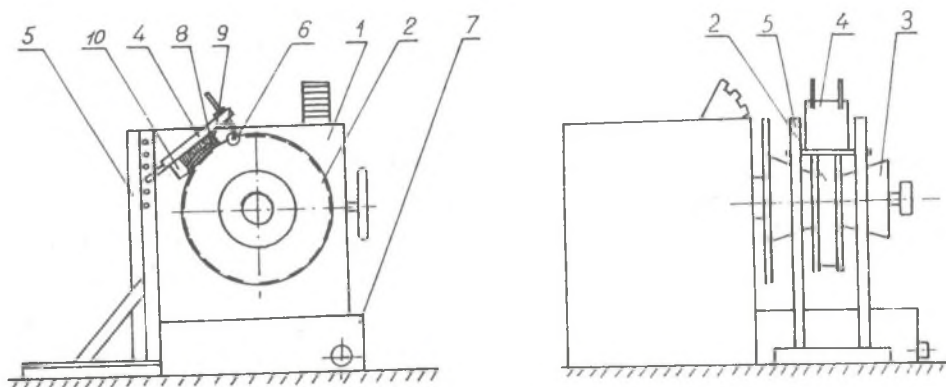
- meandrowego z rdzeniem magnetycznym o 6 prętach,
- pętlowych 3- i 5-zwojowych (ze zwojami leżącymi na bieżni koła oraz ze zwojami leżącymi na bieżni i obrzeżach) z rdzeniem magnetycznym i bez rdzenia.

Najkorzystniejsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu wzbudnika pętlowego 5-zwojowego z rdzeniem magnetycznym. Stosowanie tego wzbudnika zapewniało szybki przyrost temperatury przy stosunkowo dużej równomierności nagrzewania.

2.5. Budowa stanowiska

Budowę stanowiska doświadczalnego przedstawiono na rys. 2. Koło /2/ mocowane jest w stożkowym uchwycie samocentrującym /3/ obrotownika /1/. Wzбуд-

nik /8/ przytwierdzony jest do płyty /4/, połączonej przegubowo ze stojakiem /5/. Do płyty tej mocowane są również rdzeń oraz natryskiwacz /9/ i /10/. Utrzymanie stałej szczeliny między wzbudnikiem oraz bieżnią i obrzeżami koła zapewnia mechanizm prowadzący /6/, którego rolki obejmują powierzchnie czołowe i boczne obrzeży. Sposób mocowania mechanizmu prowadzącego /6/ do płyty /4/ oraz płyty do stojaka /5/ umożliwia regulację w szerokim zakresie odległości między bieżnią i wzbudnikiem oraz położenia wzbudnika i natryskiwacza względem koła. Pod kołem znajduje się zbiornik /7/ gromadzący i odprowadzający wodę ściekającą z hartowanej powierzchni.



Rys.2. Stanowisko doświadczalne

1-obrotownik, 2-koło, 3-uchwyt samocentrujący, 4-płyta, 5-stojak, 6-mechanizm prowadzący, 7-zbiornik wody, 8-wzbudnik, 9-rdzeń magnetyczny, 10-natryskiwacz

Fig.2. Experimental stand

1-positioner, 2-wheel, 3-selfcentring grip, 4-plate, 5-pillar, 6-leading mechanism, 7-water container, 8-inductor, 9-magnetic core, 10-sprayer

3. NAGRZEWANIE I HARTOWANIE KÓŁ

Szczegółowe wyniki i przebieg prób nagrzewania i hartowania kół z zastosowaniem metody indukcyjnej przedstawiono w pracach [1,2,3,5]. Próby nagrzewania prowadzono w stanie stacjonarnym, przy nieruchomym kole. Temperaturę mierzono za pomocą termoelementów NiCr-Ni. Wzbudniki zasilano z generatora średniej częstotliwości GT-200-4-900 o mocy 200 kW i częstotliwości 1-4 kHz. Na rys. 3 przedstawiono rozkłady temperatur przy

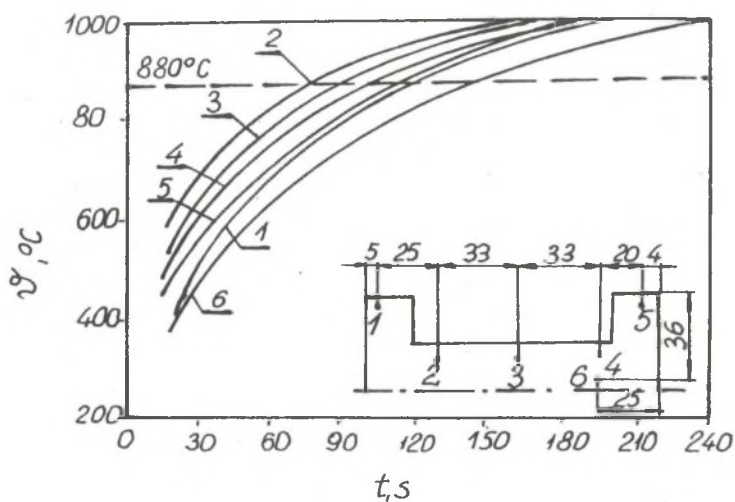
nagrzewaniu wzbudnikiem petlowym 5-zwojowym z rdzeniem magnetycznym. Cztery zwoje tego wzbudnika umieszczone były nad bieżnią, natomiast jeden zwój nad obrzeżami koła. Zastosowanie tego wzbudnika i w takiej konfiguracji pozwalało uzyskać największą równomierność nagrzewania bieżni i obrzeży. Odległość między wzbudnikiem i wsadem wynosiła ok. 3 mm. Moc pobierana ze źródła 35 kW. Rozmieszczenie termoelementów pokazano na rys. 3a. Mimo dużej nierównomierności nagrzewania w początkowym okresie (krzywe 2 i 4 na rys. 3a oraz krzywa dla $t = 90$ s na rys. 3b) po ok. 210 s uzyskano równomierne nagrzanie bieżni oraz powierzchni wewnętrznych obrzeży ($\Delta\theta < 40$ K). Znaczne zwiększenie prędkości nagrzewania stwierdzono po zastosowaniu we wzbudniku rdzenia magnetycznego ($\theta = 880^{\circ}\text{C}$ po $t = 78$ s).

Hartowanie indukcyjne przeprowadzono używając wody oraz mieszanki wodno-powietrznej jako czynnika chłodzącego, przy czym lepsze wyniki z punktu widzenia wymagań technologicznych uzyskano używając tego ostatniego [1,2,3,5]. Najkorzystniejsze rozkłady twardości uzyskano (rys.4a) przy zastosowaniu chłodzenia wodno-powietrznego (przy natężeniu przepływu wody ok. 25 l/h i ciśnieniu powietrza $2 \cdot 10^5$ Pa). Wówczas twardość powierzchni i obrzeży wynosi ok. 350 HB, a więc jest najbardziej zbliżona do wymagań technologicznych. Nierównomierność hartowania wzdłuż osi symetrii bieżni mieści się w granicach 10 - 15 HB. Charakterystyczna dla metody jednoobrotowej miękka strefa przejściowa, związana z ponownym nagrzaniem zahartowanej części bieżni i obrzeży po wykonaniu przez koło pełnego obrotu, wynosi ok. 30 mm (czyli ok. 2% obwodu koła przy spadku twardości o ok. 40%).

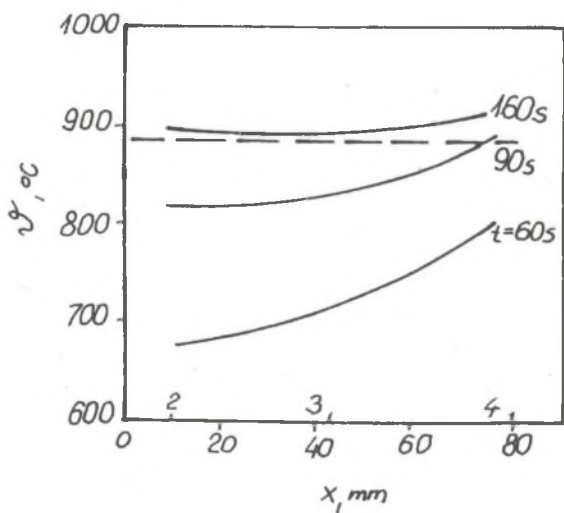
4. NAPRĘŻENIA WŁASNE W KOŁACH PO HARTOWANIU INDUKCYJNYM

Proces hartowania indukcyjnego powoduje powstanie w kole dodatkowych naprężeń własnych, których wielkość zależy od sposobu prowadzenia obróbki cieplnej. W pracach [4,5] przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań, które umożliwiły ocenę tych naprężeń. Porównując wpływ różnych sposobów obróbki cieplnej można stwierdzić, że po hartowaniu indukcyjnym powierzchni bieżni i obrzeży występują wyższe wartości naprężeń własnych niż w przypadku obecnie stosowanej technologii. Pomimo wyższych wartości naprężenia na bieżni mają charakter ściskający, jedynie w niektórych miejscach na obrzeżach występują mniej korzystne, z punktu widzenia

a)



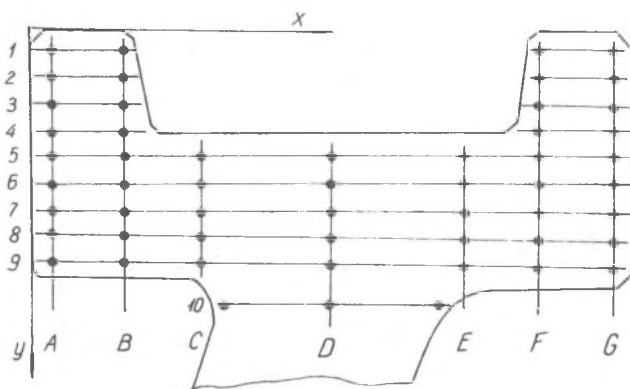
b)



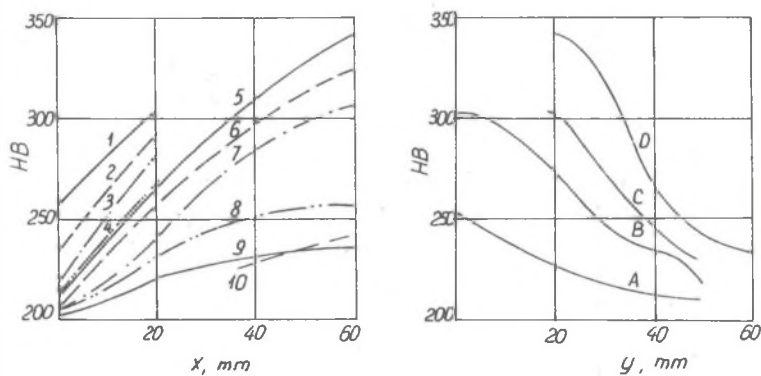
Rys.3. Rozkłady temperatur w kole nagrzewanym wzbudnikiem pętlowym z rdzeniem magnetycznym

Fig.3. Temperature distribution in the wheels heated by loop inductor with a magnetic core

a)



b)



Rys.4. Wyniki badań twardości w przekroju poprzecznym koła:

a - rozmieszczenie punktów pomiarowych twardości w przekroju poprzecznym koła, b - rozkłady twardości

Fig.4. The results of hardness investigations in the wheel cross-section:

a - spacing the hardness measuring points in the wheel cross-section, b - distributions of hardness

trwałości zmęczeniowej, naprężenia rozciągające. Nie zauważono wyraźnego zmniejszenia naprężeń po zastosowaniu odpuszczania, a więc stosowanie tego typu zabiegów wydaje się niecelowe.

5. PRZEBIEG PRÓBNEJ EKSPLOATACJI KÓŁ HARTOWANYCH INDUKCYJNIE

Do próbnej eksploatacji wytypowano dźwignice w hutach: "MAŁA PANEW" (koła o średnicy ϕ 500 mm) oraz "BOBREK" (koła o średnicy ϕ 800 mm). W trakcie półrocznej eksploatacji dźwignic koła były poddawane okresowym oględzinom przez zespół wytypowany przez użytkowników do oceny zużycia kół. Stwierdzono normalne i jednorodne zużycie kół na całej powierzchni pracującej. Nie stwierdzono pęknięć na obwodzie bieżni, a jej trwałość jest podobna do trwałości bieżni uzyskiwanej poprzednio.

6. ENERGOCHŁONNOŚĆ PROCESU HARTOWANIA KÓŁ

Porównano energochłonność procesu hartowania prowadzonego metodą tradycyjną oraz indukcyjną. Porównanie przeprowadzono dla kół ϕ 500 mm i ϕ 800 mm, tzn. dla kół, które były hartowane indukcyjnie. Ponieważ przy hartowaniu metodą tradycyjną używane są aż trzy nośniki energii (gaz czadnicowy, koksowniczy, energia elektryczna), porównanie przeprowadzono (tab.1) w przeliczeniu na paliwo umowne wg przeliczników OIGE:

- gaz czadnicowy	0,34 kg pu/m ³	
- gaz koksowniczy	0,59 kg pu/m ³	
- energia elektryczna	0,41 kg pu/kWh	z uwzględnieniem współczynnika przemiany i strat przesyłu* 0,30.

W przypadku koła ϕ 500 mm występuje prawie dziesięciokrotne obniżenie wielkości zużytej energii, natomiast dla koła ϕ 800 mm ponad dwudziestokrotne. Przy szacowanym rocznym zużyciu gazu czadnicowego ok. 150 tys. m³, koksowniczego 350 tys. m³ i energii elektrycznej 20 tys. kWh, wprowadzenie nowej technologii hartowania kół może w sposób istotny obniżyć energochłonność produkcji kół dźwignicowych.

Tablica 1

Porównanie zużycia energii przy hartowaniu kół dźwignicowych
w przeliczeniu na paliwo umowne (dla jednego koła)

Koło mm	Metoda	Gaz czadnic.		Gaz koksown.		Energia elektr.		Łącznie kg pu
		m ³	kg pu	m ³	kg pu	kWh	kg pu	
φ 500	1 *	38,69	13,15	90,27	53,26	5	2,05	68,46
	2 **	-	-	-	-	18	7,38	7,38
φ 800	1 *	128,97	43,85	300,92	177,54	16,67	6,83	228,22
	2 **	-	-	-	-	25	10,25	10,25

* - opracowano na podstawie danych uzyskanych od producenta kół

** - wyniki uzyskane w trakcie badań nad nową technologią

7. PODSUMOWANIE

W ramach przeprowadzonych studiów i badań przy opracowaniu technologii hartowania indukcyjnego kół dźwignicowych:

- przygotowano koncepcję metody i urządzenia do hartowania indukcyjnego bieżni i obrzeży kół, wykonano obliczenia parametrów wzbudników, zbudowano stanowisko doświadczalne,
- przeprowadzono badania nagrzewania indukcyjnego bieżni i obrzeży kół wzbudnikami: meandrowym i pętlowymi, w wyniku których dobrano parametry konstrukcyjne i zasilania wzbudników,
- przeprowadzono hartowanie kół stosując jako czynniki chłodzące wodę oraz mieszaninę wodno-powietrzna. Na podstawie pomiarów rozkładów twardości kół, uzyskanych w różnych warunkach nagrzewania i chłodzenia, ustalono podstawowe parametry procesu hartowania,
- przeprowadzono badania naprężeń własnych w kołach po hartowaniu indukcyjnym, które wskazują na możliwość takiego doboru parametrów hartowania, aby powstałe naprężenia nie zwiększały w istotny sposób prawdopodobieństwa pęknięcia kół,

- wykonane badania eksploatacyjne kół w trudnych warunkach pracy wykazały normalne i jednorodne zużycie kół na całej powierzchni pracującej, potwierdzając przydatność nowej technologii w produkcji kół dźwignicowych,
- przeprowadzone porównanie energochłonności obydwu technologii wskazuje na możliwość istotnego obniżenia zużycia energii.

LITERATURA

- [1] Sajdak Cz., Kurek K.: Opracowanie technologii hartowania indukcyjnego bieżni wybranych kół jezdnych do dźwignic. Sprawozdanie Instytutu Metalurgii Pol. Śl., Katowice 1987.
- [2] Sajdak Cz., Kurek K.: Utwardzanie powierzchniowe bieżni i obrzeży kół dźwignicowych. Materiały II Konf. "Badania naukowe w elektrotermii". Wiśła 1987.
- [3] Dytkowicz A.: Badania efektywności hartowania indukcyjnego kół biegowych suwnic. Opracowanie ZUT nr U-323A/86. Katowice 1987.
- [4] Chladek W.: Pomiary naprężeń własnych kół jezdnych. Ekspertyza SITPH nr 275/87. Katowice 1987.
- [5] Kurek K., Sajdak Cz.: Nagrzewanie indukcyjne w procesie obróbki cieplnej kół dźwignicowych. Materiały III Konf. "Badania naukowe w elektrotermii". Wiśła 1988.
- [6] Sajdak Cz., Samek E.: Nagrzewanie indukcyjne - Podstawy teoretyczne i zastosowanie. Wyd.Ślask, Katowice 1987.

INDUCTION HARDENING OF WHEEL CRANES

Abstract

The technology of production of road wheel cranes used in Poland provides hardening of race and rims of wheels to 280-360 HB. It is acquired by heating of the wheels to the temperature 880⁰C in a gas stove with the temperature gradient 70-100 K/h. After taking out from the stove the wheels are the water-hardened and then placed in the stove again where they are tempered (fig.1).

The results of the research works on the new induction technology of

hardening of wheels have been presented in the paper. Taking into consideration the technological requirements, an assortment of produced wheels as well as accessibility of sources of energy supply, the one-rotary method of induction heating has been applied, in which the wheel rotates under a fixed inductor.

A stand of induction hardening consists of the following elements (fig.2): a manipulator, in which a wheel is fixed and rotated, an inductor as well as a sprayer. The inductor is supplied from a controlled thyristor frequency converter (2,5 kHz, 100 kW).

Several kinds of inductors have been tested. The most advantageous temperature distribution on the surface of the race has been achieved using the loop five-coil inductor with the magnetic core (fig.3). The closest to the assumed distributions of hardness have been reached applying water-air cooling system (fig.4).

Carried out testings of internal stresses in wheels after hardening showed that there is a possibility of such a selection of parameters in order that rising stresses might not increase probability of cracking of wheels.

A comparison of energy consumption has been realized after the experimental exploitation of the stand of induction hardening (tab.1). It proves that an application of the new technology will make possible a considerable economy of energy.