

Analiza naprężeń w warstwie wierzchniej odlewów staliwnych

Stress analysis in the surface layer of steel castings

Adam Kokosza¹, Jerzy Pacyna¹

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

¹ AGH – University of Science and Technology, Faculty of Metals Engineering and Industrial Computer Science, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

E-mail: akokosza@agh.edu.pl

Received: 07.04.2015. Accepted in revised form: 31.03.2016.

© 2016 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/ioid.2016.03

Streszczenie

Abstract

W pracy przedstawiono analizę wyników pomiarów naprężeń na dostarczonych do badań trzech odlewach laboratoryjnych ze staliwa stopowego – ledeburyticznego, które wytworzono według różnych technologii. Odlew pierwszy został wykonany w sposób tradycyjny z wykorzystaniem metody odlewania przez nadlew do formy z masy bentonitowej. W trakcie wytwarzania drugiego odlewu, po zalaniu formy, zastosowano dodatkowo proces wibrowania, którego celem było zminimalizowanie naprężeń odlewniczych. Proces wytwarzania trzeciego odlewu został natomiast poszerzony o dodatkową obróbkę metalurgiczną ciekłego metalu, która polegała na jego odtlenianiu za pomocą CaSi (0,1% wag.), modyfikowaniu przy użyciu modyfikatora złożonego Reseed® (0,1% wag.) i argonowaniu. Do badań wykorzystano metodę pomiaru naprężeń, wykorzystującą tzw. efekt szumów magnetycznych Barkhausena. Stwierdzono, że zastosowanie procesu wibrowania formy bezpośrednio po jej zalaniu, nie przyniosło oczekiwanego rezultatu w postaci obniżenia poziomu naprężeń. Dopiero zastosowanie dodatkowej obróbki wibracyjnej oraz wyżarzania odprężającego na surowych odlewach pierwszym i drugim przyczyniło się do nieznacznego obniżenia naprężeń w ich warstwie wierzchniej. Bardzo korzystne okazało się natomiast zastosowanie dodatkowej obróbki metalurgicznej ciekłego metalu, które przyczyniło się do wyraźnego obniżenia poziomu naprężeń w warstwie wierzchniej odlewu.

Słowa kluczowe: stan naprężeń, metoda szumów Barkhausena, odprężanie, staliwo stopowe, warstwa wierzchnia

Stress measurements were taken on three castings made on the laboratory scale by different technologies from ledeburite alloy steel; the obtained results were subjected to a detailed analysis. The first casting was made by a conventional technique, i.e. by pouring metal through the riser into a bentonite sand mould. In the case of the second casting, the mould pouring process was additionally assisted by vibrations applied in order to reduce to a minimum the stresses formed in the casting. The process of making the third casting included a metallurgical treatment of molten metal, which comprised deoxidation using CaSi (0.1 wt. %), inoculation with a complex Reseed® inoculant (0.1 wt. %) and argon blowing of the melt. Stresses were measured by a magnetic method based on the Barkhausen noise effect. It has been found that mould vibrating immediately after pouring did not yield the expected result of stress level reduction. Only the additional vibration treatment and stress relief annealing conducted on raw castings 1 and 2 slightly reduced the stress level in the surface layer of these castings. On the other hand, very satisfactory results were obtained with the secondary metallurgical treatment of molten metal. This treatment has contributed to a very significant stress reduction in the surface layer of the examined castings.

Keywords: stress state, Barkhausen noise method, stress relief annealing, cast alloy steel, surface layer

1. Wprowadzenie

Ze względu na wysokie wymagania stawiane walcem hutniczym zarówno w zakresie ich jakości, jak i trwałości określonej ilości przewalcowanej stali, są one bardzo kosztowne. Nic więc dziwnego, że wciąż trwają poszukiwania materiału na walce, który umożliwiłby osiągnięcie kompromisu pomiędzy wymaganiami stawianymi takim narzędziom a ich ceną. Walory użytkowe staliwa sprawiają, że tworzywo to w wielu przypadkach może z powodzeniem sprostać takim oczekiwaniom [1–5].

Wadą aktualnie wykonywanych walców staliwnych bywa jednak ich niekorzystna mikrostruktura, która kształtuje się już na etapie ich odlewania [6,7]. Nie mniejszym problemem może okazać się niekorzystny stan naprężeń wewnętrznych w stygnącym po odlewaniu walcu, który w najgorszym przypadku może przyczynić się do jego rozzerwania jeszcze w trakcie jego wytwarzania. Dla wyeliminowania takich problemów wciąż doskonalą się procesy produkcji dużych walców staliwnych m.in. pod kątem minimalizowania stanu naprężeń, jaki może się w nich ukształtować. Zazwyczaj oceny takiej dokonuje się z użyciem programów, takich jak: ProCAST lub Magma. Można też dokonać jej w sposób doświadczalny – przez wykonanie bezpośrednich pomiarów w warstwie wierzchniej odlewów [8–9]. W niniejszej pracy przedstawione zostały wyniki takich badań, które wykonano na trzech odlewach laboratoryjnych, różniących się sposobem wytworzenia. Celem tych badań była ocena skuteczności zastosowania dodatkowych zabiegów: wibrowania, obróbki metalurgicznej ciekłego metalu i wyżarzania odprężającego dla osiągnięcia w warstwie wierzchniej badanych odlewów najkorzystniejszego (minimalnego) stanu naprężeń.

2. Materiał do badań

Badania zostały wykonane na trzech odlewach ze staliwa stopowego, ledeburycznego o składzie chemicznym pokazanym w tabeli 1. Odlewy te zostały wykonane i przygotowane do badań w wyspecjalizowanej jednostce zewnętrznej.

Tabela 1. Skład chemiczny staliwa zastosowanego na badane odlewy, % wag.

Table 1. Chemical composition of steel used for the test castings, wt. %

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
Staliwo bez modyfikacji (odlewy 1 i 2) / Cast steel before inoculation (castings 1 and 2)	2,10	0,48	0,61	0,024	0,058	1,24	0,75	0,34	0,10	0,14
Staliwo modyfikowane (odlew 3) / Cast steel after inoculation (casting 3)	2,00	0,46	0,61	0,025	0,067	1,23	0,76	0,35	0,10	0,09

1. Introduction

High demands imposed onto metallurgical rolls as regards both quality and long service life expressed in terms of the tons of rolled steel sheet make rolls a very expensive product. Therefore it seems quite natural that searches continue to find a material for metallurgical rolls that would make a compromise between the demands posed on such tools and their price. Functional properties of cast steel raise hope that this material can in many cases successfully meet such expectations [1–5].

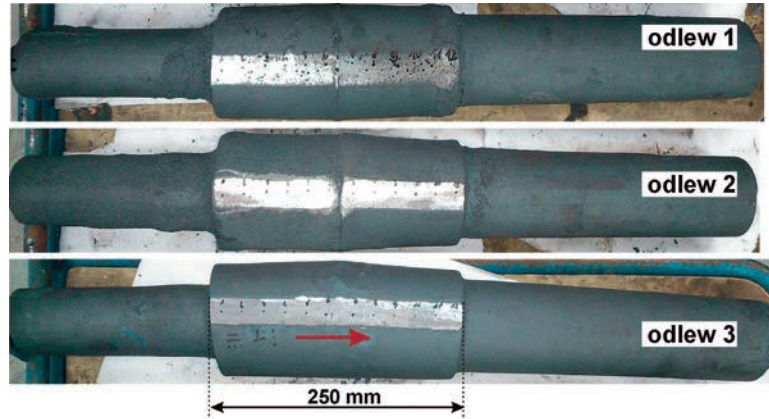
The drawback of the currently made cast steel rolls is in many cases their unfavourable microstructure, which is formed already at the stage of casting [6,7]. Another problem equally grave may be the undesired state of internal stress developed in a roll cooling down after the casting process, which in the worst case can lead to a fatal breakage even in the stage of the roll manufacture. To eliminate such problems, constant improvements are introduced to the manufacturing process of large steel rolls, including various measures taken in order to reduce to a minimum the stresses which may form during operation. Typically, in studies of this type, programs such as ProCAST or Magma are used. Some experimental means are also available, involving mainly direct measurements taken in the surface layer of castings [8–9]. This article discusses the results of various tests that were performed on three castings made in a laboratory by different manufacturing processes. The aim of the study was to evaluate the effectiveness of the use of additional means, like vibration, metallurgical treatment of molten metal and stress relief annealing, in achieving the most preferred (minimum) state of stress in the surface layer of castings.

2. Test material

Tests were performed on three castings made of ledeburite alloy steel with the chemical composition shown in Table 1. The castings were made and prepared for testing in a specialized outdoor unit.

Na [ryśunku 1](#) pokazano ogólny widok odlewów, dostarczonych do badań, z widocznymi miejscami pomiaru naprężeń. Zostały one wykonane w formie walca, którego beczka miała średnicę około 100 mm i długość 250 mm.

[Figure 1](#) shows a general view of castings which were delivered for testing with marked places where the stress measurements were performed. All castings were of a cylindrical shape with the barrel 250 mm long and of 100 mm diameter.



Rys. 1. Ogólny widok odlewów dostarczonych do badań z zaznaczonymi miejscami, w których wykonywano pomiary naprężeń

Fig. 1. General view of castings delivered for testing with marked places where the stress measurements were performed

Dla wszystkich trzech odlewów zastosowano tradycyjnie odlewanie przez nadlew do formy z masy bentonitowej, przy czym:

- **odlew pierwszy** po procesie zalewania do formy pozostawiono aż do ostygnięcia bez żadnych dodatkowych zabiegów,
- **odlew drugi** bezpośrednio po zakończeniu procesu zalewania do formy został poddany działaniu wibracji o częstotliwości 7,16 Hz,
- **odlew trzeci** zalewano po przeprowadzeniu wcześniejszej obróbki metalurgicznej ciekłego metalu. Polegała ona na odtlenieniu ciekłego metalu za pomocą FeCaSi (0,1% wag.), argonowaniu przez 1 minutę oraz zastosowaniu modyfikatora złożonego Reseed® (0,1% wag.).

All three castings were poured in a traditional mode through the riser into a bentonite sand mould, and:

- after pouring **the first casting** was allowed to cool down in the mould without any additional treatment,
- **the second casting** was immediately subjected after pouring to the effect of vibrations at a frequency of 7.16 Hz,
- **the third casting** was poured from a melt after the secondary metallurgical treatment, which consisted in deoxidizing using FeCaSi (0.1 wt. %), argon blowing for 1 minute and inoculation carried out with a complex Reseed® inoculant (0.1 wt. %).

Ze surowych odlewów, wzdłuż tworzącej beczki każdego z nich, usunięto warstwę materiału o grubości około 0,5 mm, która została zanieczyszczona w trakcie procesu wytwarzania. Zabieg ten wykonano przez szlifowanie mechaniczne, a następnie szlifowanie ręczne – papierami ściernymi o malejącej gradacji. Podczas przygotowania powierzchni do dalszych badań zachowano wymaganą staranność, aby proces szlifowania każdego odlewu odbywał się w porównywalnych warunkach.

W kolejnych etapach surowe odlewy ponownie poddano obróbce wibracyjnej, a następnie wyżarzaniu odprężającemu. Wyżarzanie wykonywano w piecu z atmosferą azotu (15 Pa). Odlewy nagrzewano do 1000°C, wytrzymywano przez 16,5 godz., następnie chłodzono

From each raw casting, along a generating line on the roll barrel, a layer of material of approx. 0.5 mm thickness, contaminated during the manufacturing process, was removed. This procedure was performed by mechanical grinding, followed by manual grinding with abrasive papers of decreasing gradation. Due care was taken during surface preparation for further studies to carry out the grinding process of each casting under comparable conditions.

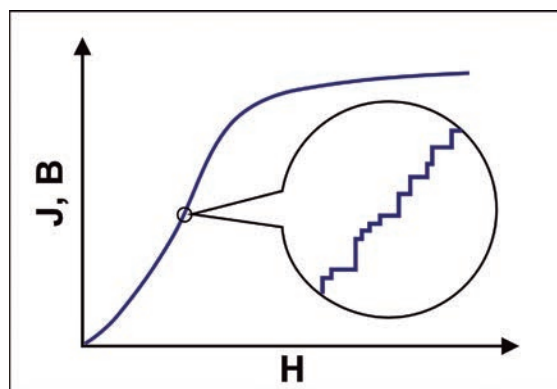
In subsequent stages of the tests and studies, raw castings were again subjected to the vibration treatment, this time combined with stress relief annealing. The annealing treatment was performed in a furnace in an atmosphere of nitrogen (15 Pa). Castings were

z piecem do 140°C i przy tej temperaturze następował ich wyładunek.

3. Metodyka badań

3.1. Metoda Barkhausena

Do analizy naprężeń w warstwie wierzchniej odlewów zastosowano metodę Barkhausena, która wykorzystuje efekt tzw. szumów magnetycznych. Efekt taki, nazywany również *zjawiskiem Barkhausena*, polega na skokowych zmianach namagnesowania materiału ferromagnetycznego (J , B) pod wpływem zmiany natężenia zewnętrznego pola magnetycznego (H), tak jak pokazano to na rysunku 2. Taki charakter zmian namagnesowania jest skutkiem skokowego przesuwania się granic domen magnetycznych (tzw. ścianek Blocha), ustawiających się zgodnie z kierunkiem zewnętrznego pola magnetycznego [8,10].



Rys. 2. Krzywa namagnesowania (J) lub indukcji (B) ferromagnetyka w funkcji natężenia zewnętrznego pola magnetycznego (H). Powiększony fragment ukazuje nieregularny, skokowy charakter tej zależności (schemat)

Fig. 2. Curves of magnetization (J) or induction (B) of ferromagnetic material as a function of the external magnetic field intensity (H). Enlarged detail shows irregular, erratic nature of this relationship (diagram)

Jeśli dany materiał ferromagnetyczny wystawiony jest na działanie czynników generujących zmiany jego składu chemicznego, mikrostruktury lub stanu naprężeń, to wówczas intensywność zjawiska Barkhausena zmienia się [10]. Stosunkowo łatwo to wykryć, porównując stan badanego elementu, w którym zadziałały te czynniki, ze stanem wzorca wykonanego z tego samego materiału. Dlatego też zjawisko Barkhausena z powodzeniem można wykorzystać przy badaniach nieniszczących materiałów ferromagnetycznych, w tym stalowych, stalowych i żeliwnych walców hutniczych [8–12]. Badania takie polegają na lokalnym namagnesowaniu warstwy wierzchniej badanego materiału i jednoczesnym pomiarze wyindukowanego napięcia, którego wielkość zależy od poziomu wygenerowanych w tej warstwie szumów magnetycznych [8,10].

Urządzenie STRESSCAN 500C, przy użyciu którego wykonano badania opisane w niniejszej pracy, umożli-

preheated to 1000°C, held at that temperature for 16.5 hours, and then furnace cooled to 140°C and unloaded at this temperature.

3. Methodology

3.1. Barkhausen method

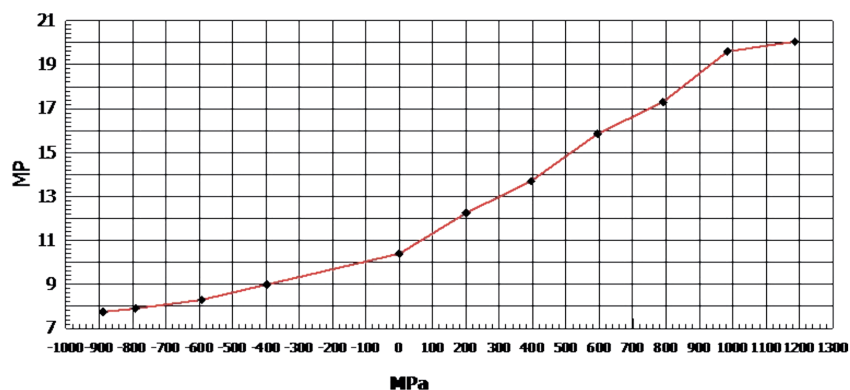
Stresses were examined in the surface layer of castings by the Barkhausen method, based on the magnetic noise effect. The nature of this effect, also known as *the Barkhausen phenomenon*, consists in surges of the ferromagnetic material magnetization (J , B) due to changes in the external magnetic field intensity (H), as shown in Figure 2. These types of changes in magnetization are caused by snaps of the magnetic domain boundaries (i.e. the Bloch walls), lining up in the direction of an external magnetizing field [8,10].

If a ferromagnetic material is exposed to the effect of agents that generate changes in its chemical composition, microstructure or state of stress, this induces changes in the intensity of Barkhausen noise [10]. The resulting effect is relatively easy to detect by comparing the sample in which these phenomena have taken place with a reference sample made of the same material. Due to this, the Barkhausen effect can be successfully used in non-destructive testing of ferromagnetic materials, including metallurgical rolls made from steel, cast steel and cast iron [8–12]. Studies consist in local magnetization of the surface layer of the test material, combined with simultaneous measurement of the induced voltage, which depends on the level of magnetic noise generated in that layer [8,10].

The STRESSCAN 500C device, which was used in the tests described in this article, allows measurements of the noise level, expressed as a **magnetoelastic**

wia wykonanie pomiaru poziomu szumów wyrażonego jako wartość tzw. **parametru magnetosprężystego MP** w dowolnym miejscu na powierzchni badanego elementu. Wyniki tych pomiarów umożliwiają wskazanie obszarów, w których w warstwie wierzchniej mogą występować różnice w poziomie naprężeń. Generowany szum Barkhausena, wyrażony wartością parametru MP, jest tym większy, im większe (bardziej dodatnie) jest naprężenie w badanej warstwie materiału. Kiedy podczas pomiarów na badanym elemencie, zależy nam na uzyskaniu informacji o poziomie naprężeń, wyrażonym w MPa, wówczas należy przeprowadzić specjalną procedurę kalibracji na próbce wzorcowej wykonanej z tego samego materiału co badany element. Wynikiem takiej kalibracji jest tzw. „krzywa kalibracyjna”, która umożliwia przeskalowanie urządzenia z MP na MPa (rys. 3).

parameter (MP), to be taken in any arbitrary place on the sample surface. The results of these measurements are next used for the identification of areas in the surface layer of products, where differences in the stress level are expected to occur. The generated Barkhausen noise, expressed by the value of MP parameter, is higher, the higher (more positive) is the stress in the surface layer of the test material. When measurements taken on the surface of the examined object should provide information about the stress level expressed in MPa, a special calibration procedure is applied to a standard reference sample made of the same material as the examined object. The result of this calibration is plotted “calibration curve”, which allows scale conversion from MP to MPa (Fig. 3).



Rys. 3. Przykład krzywej kalibracji, ilustrującej zależność parametru MP od wielkości naprężeń, wykorzystywanej do przeliczania wielkości parametru MP na MPa (badania własne – niepublikowane)

Fig. 3. Example of calibration curve illustrating the MP parameter – stress level relationship; the curve is used to convert the values of MP parameter to MPa (own research – unpublished)

Warunkiem koniecznym, aby taka kalibracja okazała się skuteczna i wiarygodna, jest aby mikrostruktura próbki wzorcowej była jak najbardziej zbliżona do mikrostruktury badanego materiału. Ponadto próbka taka powinna być pozbawiona wad wewnętrznych, takich jak nieciągłości lub pory, ponieważ stanowią one naturalne karby i koncentratory naprężeń, i mogą przyczyniać się do zafałszowania wyników kalibracji. Dodatkową niedogodnością takiej procedury jest wymaganie, aby warstwa wierzchnia próbki wzorcowej została przygotowana do pomiarów w sposób identyczny jak badany materiał (szlifowanie, trawienie, polerowanie itp.).

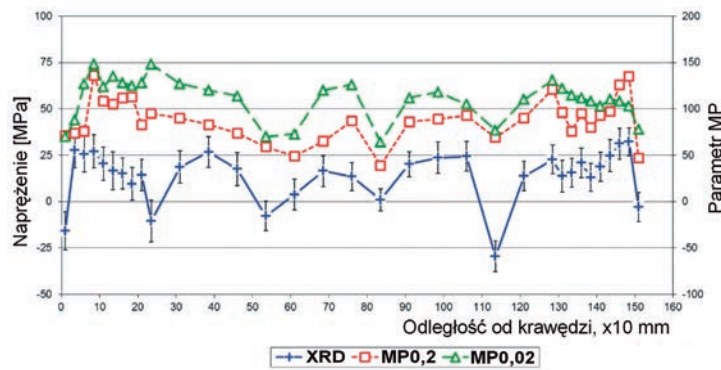
Niezależnie od kalibracji, zastosowana metoda badawcza pozwala z dużą dokładnością określać i porównywać poziom naprężeń w różnych obszarach tego samego elementu lub po różnych zabiegach technologicznych, o ile tylko w trakcie tych zabiegów nie doszło do znaczących zmian mikrostruktury takiego elementu.

Jak wynika z rysunku 4, pomiary metodą Barkhausena pozostają w dużej zgodności z powszechnie stosowa-

A prerequisite for this calibration to be effective and credible is ensuring that the microstructure of standard reference sample resembles as much as possible the microstructure of the test material. Moreover, the sample should be free from internal defects like discontinuities or pores, because they act as natural notches and stress concentration factors, and as such can contribute to false results of the calibration. Another disadvantage of this procedure is the requirement to have the top layer of standard reference sample prepared for measurements in exactly the same manner as the test material (grinding, etching, polishing, etc.).

Regardless of the calibration results, the test method when applied properly provides very accurate measurements and enables comparing the stress level in different areas of the same component or in the areas after various types of treatment, providing this treatment does not alter in a significant way the component microstructure.

As shown in Figure 4, even if expressed in MP units, the results of measurements taken by the Barkhausen



Rys. 4. Wyniki pomiarów naprężeń w arkuszu blachy walcowanej na gorąco, wykonanych z zastosowaniem metody rentgenowskiej (XRD) oraz metody Barkhausena (MP0,2 i MP0,02) wg [13]

Fig. 4. The results of stress measurements taken in a hot-rolled steel sheet by the X-ray (XRD) method and Barkhausen method (MP0.2 and MP0.02) according to [13]

waną do określania naprężeń metodą rentgenowską, nawet wtedy, gdy pomiar wykonuje się w jednostkach MP.

Niewątpliwą zaletą urządzenia STRESSCAN 500C jest fakt, że informacje o poziomie naprężeń uzyskuje się w ciągu kilku sekund w formie wartości wskazywanej na ekranie urządzenia, będącej średnią z 5–10 odczytów. Taka informacja może pochodzić z warstwy wierzchniej badanego materiału o grubości: 0,02 mm, 0,07 mm i około 0,20 mm. Za szczególnie wartościowe można uznać pomiary wykonywane w warstwie wierzchniej o grubości 0,20 mm, ponieważ dają one informacje o stanie naprężeń w warstwie około 10-krotnie grubszej niż w przypadku powszechnie stosowanej metody rentgenowskiej.

3.2. Metodyka badań

Ze względu na specyfikę materiału odlewane go i związane z nią trudności z przygotowaniem próbek do kalibracji zdecydowano, aby poziom naprężeń w warstwie wierzchniej badanych odlewów określać wartością parametru magnetosprężystego MP. Pomiaru tego parametru dokonywano punktowo, wzdłuż tej samej tworzącej w odstępach co 20 mm (rys. 1). Badania wykonano dla dwóch grubości warstwy wierzchniej, tzn. 0,02 mm i 0,20 mm. Ścisłe określenie punktów pomiarowych pozwoliło wykonać badania dokładnie w tych samych miejscach również po zabiegach dodatkowej obróbki wibracyjnej oraz po wyżarzaniu odprężającym gotowych odlewów. W każdym z punktów parametr MP określano w kierunku równoległym (MP_{||}) i prostopadłym (MP_⊥) do osi odlewu.

Celem tych działań było określenie możliwości zminimalizowania wielkości naprężeń w warstwie wierzchniej odlewów przez modyfikacje technologii ich wytwarzania.

method are in good agreement with the X-ray method commonly used for stress level determination.

An important advantage of the Stresscan 500C apparatus is that the information about the stress state is available within a few seconds and displayed on the screen of the apparatus as an average value calculated from 5–10 readings. The data collected in this way represents the test material surface layer of a thickness of 0.02 mm, 0.07 mm and 0.20 mm. Of particular value are measurements taken in the surface layer of 0.20 mm thickness, as in this way information is obtained about the stress state in a layer 10 times thicker than the layer which can be examined by the commonly used X-ray methods.

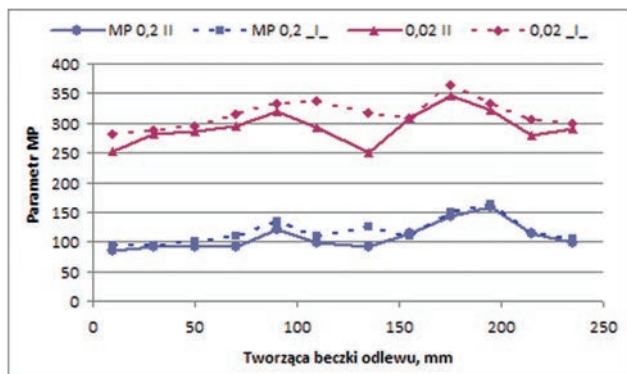
3.2. Research methodology

Due to the specific nature of the cast material and the associated difficulty with preparation of the calibration samples, it was decided to use the value of magnetoelastic parameter (MP) as a measure of the stress state in the surface layer of the examined castings. Measurements of this parameter were taken by a spot technique along the same generatrix at a spacing of 20 mm (Fig. 1). Studies were performed for two surface layer thicknesses, i.e. 0.02 mm and 0.20 mm. Strict definition of measuring points allowed the measurements to be taken in exactly the same places also after the additional vibration treatment and stress-relief annealing carried out on finished castings. At every point, the MP parameter was determined in the direction parallel (MP_{||}) and perpendicular (MP_⊥) to the axis of the casting.

The aim of the studies was to determine if and to what extent it might be possible to reduce to a minimum the stress level in the surface layer of castings by modifications introduced to the manufacturing process.

4. Wyniki badań i ich dyskusja

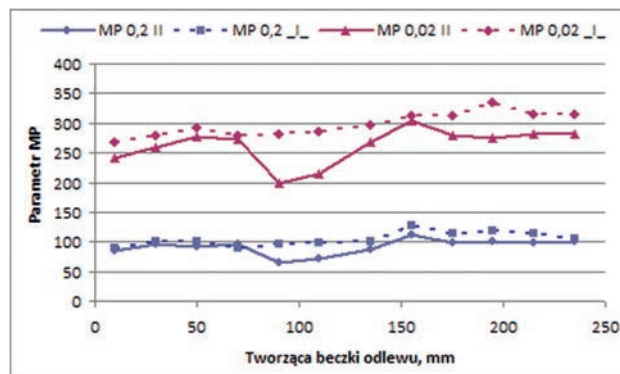
Zmiany parametru magnetoelastycznego MP wzdłuż tworzącej beczki surowych odlewów pokazano na rysunku 5.



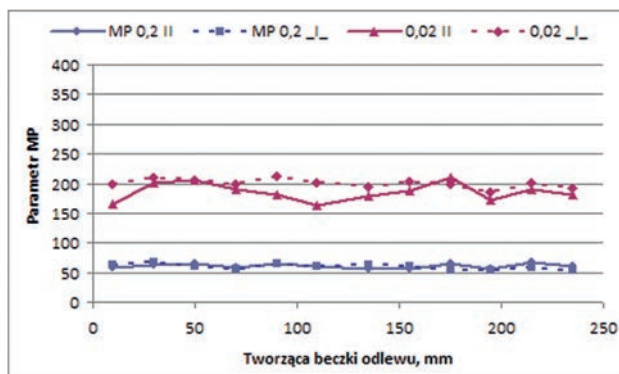
a)

4. Results and discussion

Changes in magnetoelastic parameter (MP) along the generatrix of as-cast roll barrels are shown in Figure 5.



b)



c)

Rys. 5. Zmiany parametru MP w warstwie wierzchniej beczki surowych odlewów: a) odlew 1, b) odlew 2, c) odlew 3

Fig. 5. Changes of MP parameter in the surface layer of as-cast roll barrels: a) casting 1, b) casting 2, c) casting 3

Wartości parametru MP pozostają zbliżone dla obu zastosowanych grubości warstwy wierzchniej (0,02 mm i 0,20 mm), niezależnie od tego, czy pomiar był wykonywany w kierunku równoległym (MPII), czy też w kierunku prostopadłym (MP⊥) do osi odlewu. Na rysunkach 5a i 5b łatwo jednak zauważyć, że w przypadku pomiarów na odlewach 1 i 2, przy prawej krawędzi beczki wartości tego parametru są nieznacznie większe. Jednocześnie, w centralnej części beczek wszystkich odlewów, widoczne jest wyraźne minimum wartości MPII. Ponadto niezależnie od głębokości pomiaru, wartości MP⊥ pozostają nieco większe względem MPII. Można przypuszczać, że taki charakter zmian parametru MP w warstwie wierzchniej odlewów wynika najprawdopodobniej ze specyfiki sposobu zalewania i zastosowanej technologii formy.

Wstępna analiza pokazanych na rysunku 5 zmian parametru MP może sugerować, że różnice w technologii wykonania odlewów 1 i 2 nie mają wpływu na mierzony parametr MP. Wartości parametru dla tych odlewów pozostają bardzo zbliżone, a przy tym są one

The values of MP parameter are similar for both surface layer thicknesses (i.e. 0.02 mm and 0.20 mm), irrespective of whether the measurements are taken in the direction parallel (MPII) or perpendicular (MP⊥) to the axis of the casting. In spite of this, it is easy to notice in Figures 5a and 5b that in the case of measurements taken on castings 1 and 2, the values of this parameter are slightly larger near the right edge of the roll barrel. At the same time, there is a distinct minimum of MPII in the central part of all the cast roll barrels. Moreover, regardless of the depth of measurement, the values of MP⊥ are somewhat larger than the values of MPII. It can be assumed that changes of this type in the MP parameter in the surface layer of castings are probably due to the specific nature of the pouring technique and the mould technology applied.

Preliminary studies of changes in the MP parameter as shown in Figure 5 can suggest that differences in the technology of making castings 1 and 2 have no major effect on the measured values of this parameter. The

znacznie wyższe od tych, które zarejestrowano podczas badań odlewu 3 (rys. 5c). Porównując rysunki 5a i 5b, można jednak stwierdzić, że wartości parametru MP określone w warstwie wierzchniej odlewu 1 są jednak nieco wyższe od tych, jakie zarejestrowano dla odlewu 2. Najprawdopodobniej przyczyną tych różnic może być obecność, widocznych na rysunku 1, porów w warstwie wierzchniej odlewu 1, na którym po zalaniu w formie nie zastosowano wibracji.

Wartości parametrów MP określone na surowych odlewach 1 i 2 mogą zatem świadczyć, że uzupełnienie technologii wytwarzania o zastosowanie wibracji zalanej formy nie przyniosło oczekiwanego rezultatów z punktu widzenia obniżenia poziomu naprężeń w warstwie wierzchniej. Nieznacznie niższe wartości parametru MP określone w warstwie wierzchniej odlewu 2, połączone z wynikami obserwacji makroskopowych jego becзки, mogą jednak sugerować, że wibrowanie ogranicza porowatość odlewu, co może przyczynić się do osiągnięcia nieco korzystniejszego stanu naprężeń w jego warstwie wierzchniej.

Zdecydowanie korzystne okazało się natomiast zastosowanie dodatkowej obróbki pozapiecowej. Jak bowiem wynika z rysunku 5c, obróbka taka przyczyniła do wyraźnego obniżenia poziomu naprężeń, określanych za pomocą parametru magnetoelastycznego MP, i to niezależnie od kierunku, jak i głębokości tych pomiarów. Warto również zauważyć, że w odlewie 3, w przeciwieństwie do odlewów 1 i 2, zmiany wielkości parametru MP (naprężeń) na długości becзки były minimalne.

Na rysunku 6 pokazano zmiany parametru MP po zastosowaniu dodatkowej obróbki wibracyjnej surowych odlewów. Porównując te dane z wynikami badań zestawionymi na rysunku 5, łatwo zauważyć, że wartości parametru MP niezależnie od głębokości i kierunku pomiaru pozostały zbliżone. Można zatem przypuszczać, że zastosowanie procesu wibrowania na gotowych odlewach nie przyczynia się do wyraźnej zmiany stanu naprężeń w ich warstwie wierzchniej.

Na rysunku 6 można zauważyć, że we wszystkich odlewach, w odległości około 150 mm od lewej krawędzi becзки, stwierdzono minimalne wartości MP dla obu głębokości i obu kierunków pomiaru. Najprawdopodobniej, w obszarach tych doszło do lokalnej relaksacji naprężeń. Niewykluczone, że została ona wywołana pojawieniem się – na skutek wibracji – mikropęknięć zmęczeniowych, które mogły zostać zainicjowane zarówno na powierzchni, jak i wewnątrz odlewów w miejscach występowania ewentualnych wad odlewniczych, takich jak pory lub jama usadowa. Ponieważ w niniejszej pracy ograniczono się do analizy wyników pomiarów parametru MP na powierzchni badanych odlewów, przypuszczenie takie należałoby jednak w przyszłości zweryfikować z użyciem innych metod badawczych.

Z zestawienia, jakie pokazano na rysunku 7, wynika, że wyżarzanie odprężające odniosło oczekiwane skutki w postaci zmniejszenia naprężeń przede wszystkim dla

wartości są bardzo podobne dla obu odlewów, a w tym samym czasie znacznie wyższe niż wartości zarejestrowane dla odlewu 3 (Fig. 5c). Jednakże, bardziej szczegółowe porównanie rysunków 5a i 5b wskazuje, że w porównaniu z odlewem 2, wartości parametru MP w warstwie wierzchniej odlewu 1 są nieco wyższe. Najbardziej prawdopodobną przyczyną tych różnic, widocznych na rysunku 1, są pory w warstwie wierzchniej odlewu 1, które po zalaniu w formie nie zostały poddane wibracji.

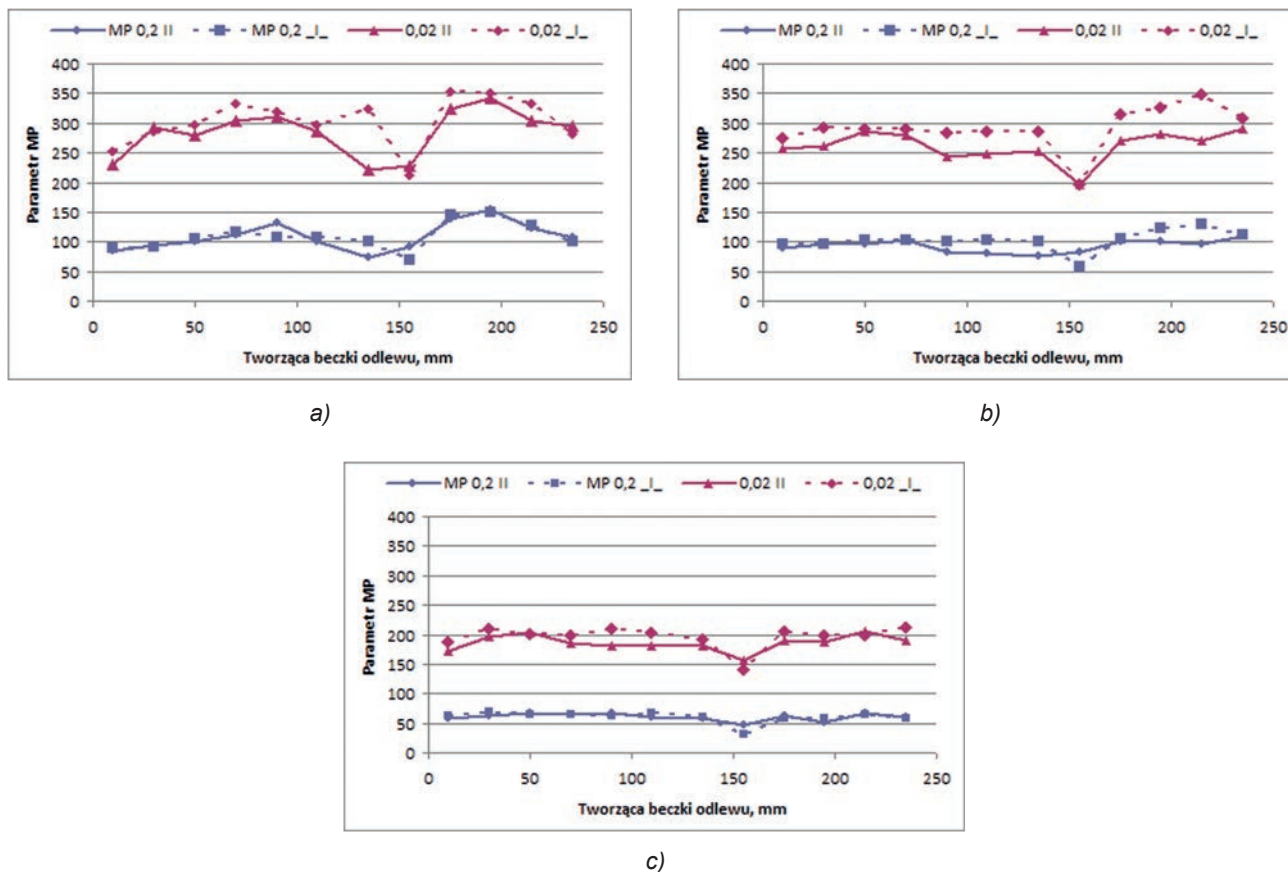
Skoro, sądząc z wartości parametru MP określonych dla surowych odlewów 1 i 2, pierwszym wnioskiem jest to, że uzupełnienie procesu wytwarzania o zastosowanie wibracji zalanej formy nie przyniosło oczekiwanych rezultatów w postaci obniżenia poziomu naprężeń w warstwie wierzchniej. Jednakże, nieco niższe wartości parametru MP w warstwie wierzchniej odlewu 2, połączone z wynikami obserwacji makroskopowych jego becзки, mogą sugerować, że wibrowanie ogranicza porowatość odlewu, co może przyczynić się do osiągnięcia nieco korzystniejszego stanu naprężeń w jego warstwie wierzchniej.

Of indisputably beneficial effect has proved to be the use of additional secondary metallurgy. As follows from Figure 5c, this treatment has led to a significant reduction of the stress level expressed by the value of magnetoelastic parameter (MP), regardless of the direction and depth of measurements. It is worth noting that in casting 3, in contrast to castings 1 and 2, changes in the value of MP parameter (stress level) along the barrel length are minimal.

Figure 6 shows changes in MP parameter after the application of vibration treatment to raw castings. Comparing this data with the results shown in Figure 5, it is easy to notice that the values of MP parameter are similar, irrespective of the depth and direction of measurements. Hence the conclusion follows that the vibration process applied to finished castings has no major contribution to the stress state change in the casting surface layer.

As follows from Figure 6, in all the examined castings, at a distance of about 150 mm from the left edge of the barrel, the minimum value of MP has occurred at both depths and in both directions of the measurement. Most likely, the cause is local stress relaxation taking place in those areas. It is possible that this effect is due to the appearance of fatigue microcracks that might be initiated by vibration treatment on the surface and in the interior of castings at sites of possible casting defects, such as pores or shrink holes. Anyway, since this study is limited to the analysis of the results of the MP parameter measurements taken on the surface of the examined castings, probable causes of the occurrence of this effect should be verified in the future by other test methods.

From the comparison drawn in Figure 7 it can be concluded that stress relief annealing has brought the expected effect of stress reduction primarily in castings 1



Rys. 6. Zmiany parametru MP w warstwie wierzchniej beczki badanych odlewów po dodatkowej obróbce wibracyjnej: a) odlew 1, b) odlew 2, c) odlew 3

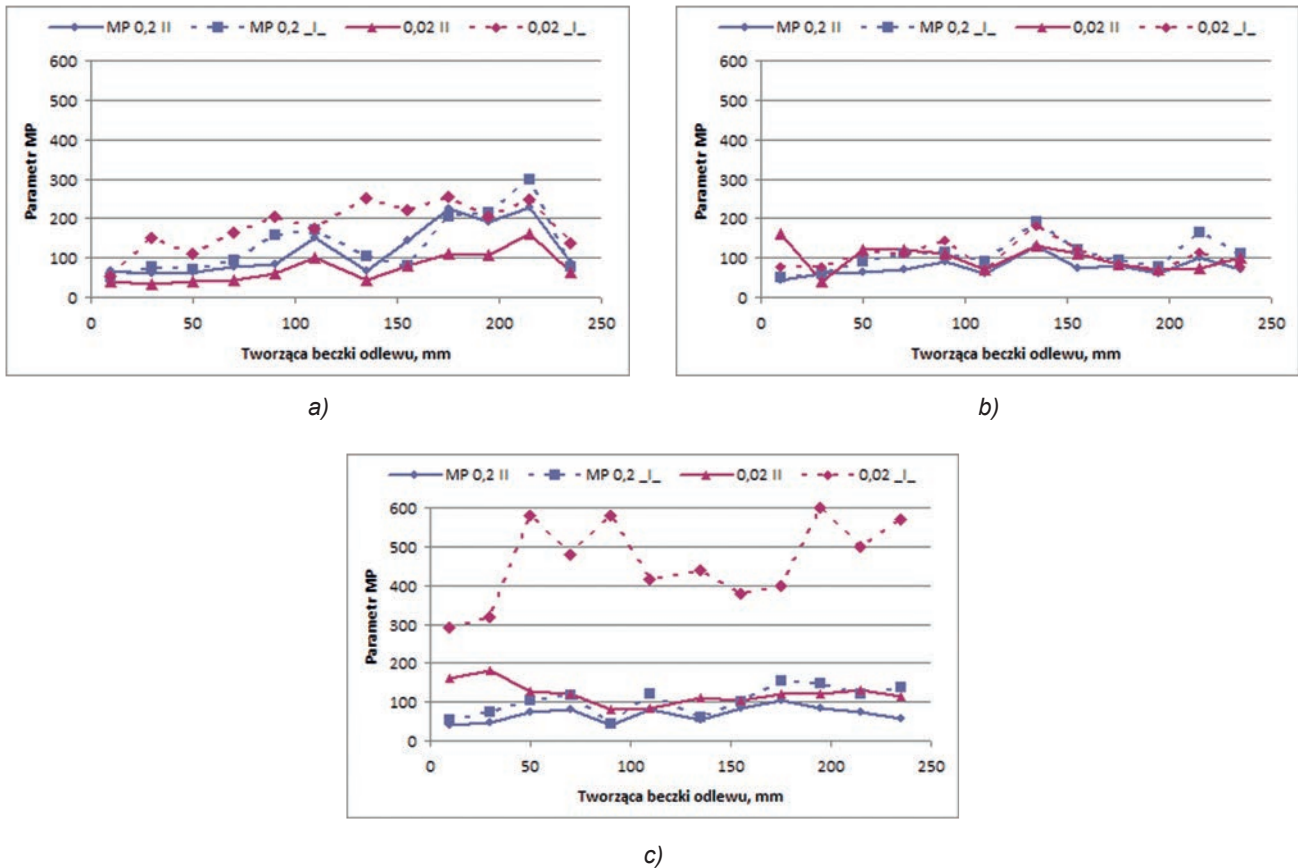
Fig. 6. Changes of MP parameter in the surface layer of cast roll barrels after the additional vibration treatment: a) casting 1, b) casting 2, c) casting 3

odlewów 1 i 2. Spadek parametru MP, któremu towarzyszy obniżanie się naprężeń rozciągających [3], jest szczególnie dobrze widoczny dla wartości tego parametru określanych w warstwie o grubości 0,02 mm. Należy jednak zauważyć, że również podczas pomiarów w warstwie o grubości 0,20 mm, w niektórych miejscach na powierzchni beczki odlewów 1 i 2 również stwierdzono wyraźne obniżenie parametru MP. Dobrze ilustruje to zwłaszcza rysunek 7b, na którym pokazano zmiany parametru MP w warstwie wierzchniej odlewu 2 (por. z rys. 6b).

W przypadku odlewu 1 wprowadzicie także odnotowano znaczne obniżenie poziomu naprężeń wyrażonych parametrem MP, ale tylko w lewej części jego beczki (por. rys. 6a i 7a). Spadek ten nie był jednak aż tak jednoznaczny i wyraźny jak w odlewie 2. Widoczne na rysunku 7a, po prawej stronie beczki, wysokie wartości parametru MP, określanego w kierunku poprzecznym do osi odlewu 1 (0,20⊥ i 0,02⊥), skłaniają do zastanowienia się, czy w tym miejscu na powierzchni beczki odlewu 1, po odprężeniu nie miała miejsca dodatkowa obróbka ścierna, która nie została ustalona z wykonawcami badań. Najprawdopodobniej taka zmiana w procedurze przygotowania powierzchni do badań sta-

and 2. The decrease of MP parameter combined with the drop of tensile stress [3] is best reflected in the MP value obtained for a layer of 0.02 mm thickness, although it is worth noting that in a layer of 0.20 mm thickness, the results of measurements also show a distinct drop of the MP parameter at some spots on the surface of cast roll barrels 1 and 2. This is illustrated in Figure 7b, which shows changes of MP parameter in the surface layer of casting 2 (Fig. 6b).

It is true that in casting 1 the stress level expressed by MP parameter has been significantly reduced, but only in the left part of the roll barrel (Figs. 6a and 7a) and certainly to the extent much less evident than in casting 2. High values of this parameter determined in the direction transverse to the axis of casting 1 (0.20⊥ and 0.02⊥), visible in Figure 7a on the right side of the roll barrel, suggest the possibility of an additional abrasive treatment, which might be carried out at that spot on the surface of casting 1 after the stress relief annealing without informing the researchers of this fact. Most probably, changes in the procedure used for the preparation of the casting surface for tests were responsible for the presence of tensile (grinding) stresses of a well-defined orientation – in this case perpendicular to the axis of the



Rys. 7. Zmiany parametru MP w warstwie wierzchniej beczki badanych odlewów po dodatkowej obróbce wibracyjnej: a) odlew 1, b) odlew 2, c) odlew 3

Fig. 7. Changes of MP parameter in the surface layer of cast roll barrels after the stress relief annealing: a) casting 1, b) casting 2, c) casting 3

ła się przyczyną „wprowadzenia” do warstwy wierzchniej prawej części beczki odlewu rozciągających naprężeń (szlifierskich) o ściśle określonej orientacji – w tym przypadku w kierunku prostopadłym do osi odlewu.

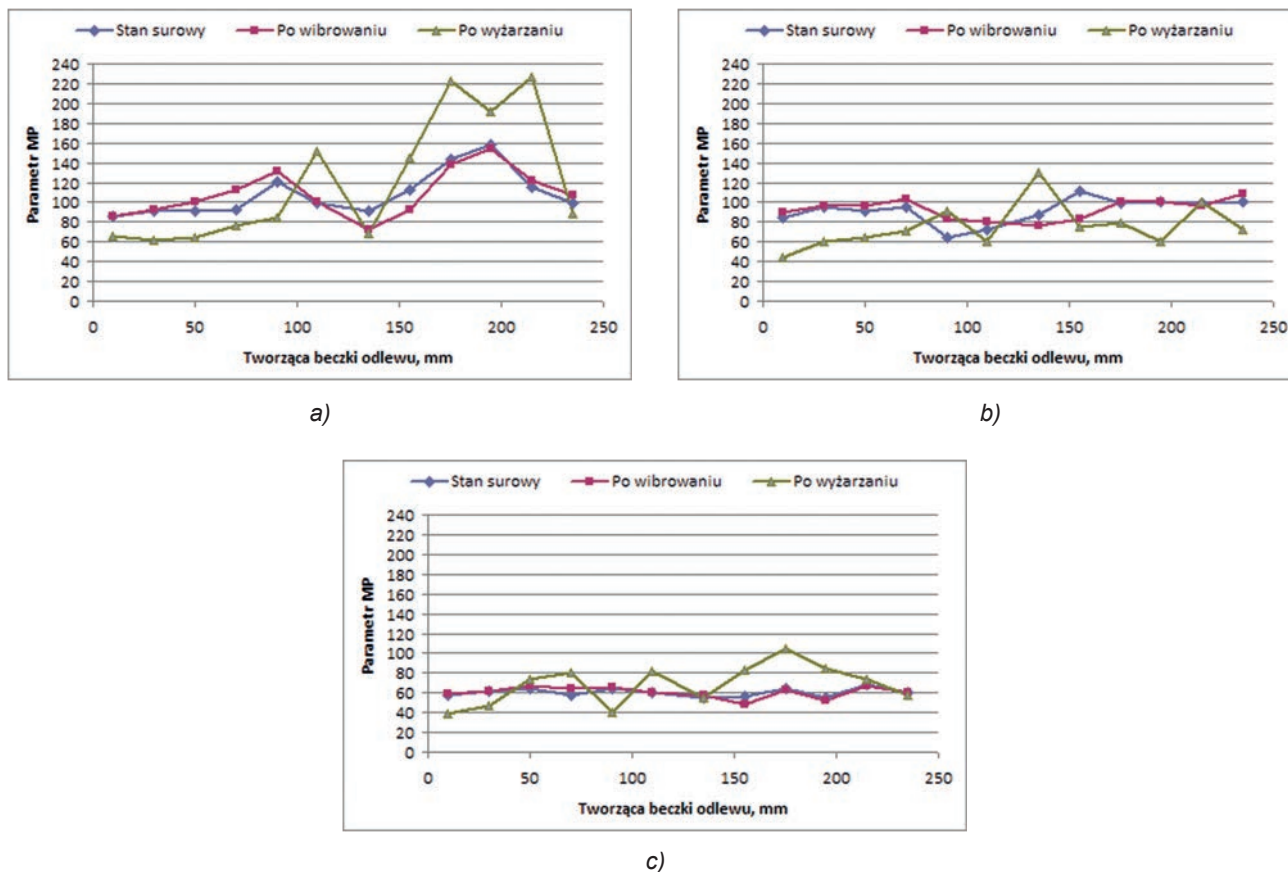
Podobna sytuacja mogła mieć miejsce również podczas pomiarów na odlewie 3 (rys. 7c). Łatwo bowiem zauważyć, że w tym przypadku wprowadzono także odnotowano nieznaczne obniżenie wartości parametru MP0,2II, MP0,2⊥ oraz MP0,02II, lecz w przypadku parametru MP0,02⊥ stwierdzono bardzo wyraźny wzrost jego wartości. Ze względu na brak takich różnic w trakcie wcześniejszych pomiarów wątpliwe jest, aby stwierdzony wzrost MP0,02⊥ był skutkiem zmian mikrostruktury spowodowanych odprężaniem, zwłaszcza że dotyczy on tylko jednej grubości warstwy wierzchniej i tylko jednego kierunku pomiaru. Dlatego nie można wykluczyć, że podobnie jak w przypadku odlewu 1 i tutaj po odprężaniu mogło dojść do dodatkowych działań mających na celu oczyszczenie powierzchni beczki odlewu przed kolejnymi pomiarami.

Skuteczność zastosowanych technologii odlewania oraz zabiegów, których celem było ich odprężenie dobrze ilustruje rysunek 8, na którym zestawiono zmiany

casting – “introduced” into the surface layer on the right side of the cast roll barrel.

A similar situation is possible as regards the measurements taken on casting 3 (Fig. 7c). It is easy to notice that in this case, in spite of a slight decrease in the value of MP parameter for MP0.2II, MP0.2⊥ and MP0.02II, a very substantial increase has occurred in the case of MP0.02⊥. Considering the absence of such differences during previous measurements, it is very doubtful that the detected MP0.02⊥ increase could be the result of microstructural changes caused by annealing, especially that it concerns only one value of the surface layer thickness and only one direction of the measurement. Therefore, it cannot be ruled out that, as in the case of casting 1, also here the stress relief annealing required further treatments performed in order to clean the surface of cast roll barrel before successive measurements.

The effectiveness of casting technology and post-casting treatments applied to achieve the stress relaxation is well illustrated in Figure 8, which summarizes changes in MP parameter measured in the direction parallel to the casting axis at a depth of 0.20 mm.



Rys. 8. Zmiany parametru MP określonego w warstwie wierzchniej badanych odlewów o grubości 0,20 mm w kierunku równoległym do ich osi, po kolejnych etapach ich odprężania: a) odlew 1, b) odlew 2, c) odlew 3

Fig. 8. Changes of MP parameter in a 0.20 mm thick surface layer of the examined castings; measurements taken in the direction parallel to the casting axis after the successive stages of stress relief annealing: a) casting 1, b) casting 2, c) casting 3

parametru MP określonego w kierunku równoległym do osi odlewu, dla głębokości pomiaru 0,20 mm.

Należy zauważyć, że najbardziej niekorzystnym rozkładem naprężeń na długości beczki (wysokie wartości parametru MP, niemonotoniczne zmiany tego parametru) cechuje się odlew 1. Zastosowanie dodatkowych procesów wibrowania i odprężania przyczynia się wprawdzie do obniżenia naprężeń (wyrażonych wielkością parametru MP), lecz są to zmiany niewielkie i mają charakter lokalny (rys. 8a).

W przypadku odlewu 2, wibrowanie surowego odlewu nie przyniosło oczekiwanego rezultatu, ponieważ poziom naprężeń pozostaje niemal taki sam jak w surowym odlewie. W tym jednak przypadku skuteczne okazało się poszerzenie technologii wytwarzania o zastosowanie wyżarzania odprężającego (rys. 8b)

Najkorzystniej na pokazanym zestawieniu prezentuje się natomiast odlew 3 (rys. 8c), który został wykonany z wykorzystaniem technologii poszerzonej o obróbkę metalurgiczną ciekłego metalu. Poziom naprężeń w tym odlewie pozostaje minimalny, niezależnie od zastosowanych dodatkowo procesów wibrowania i odprężania.

It is easy to notice that the most unfavourable stress distribution along the roll barrel length (high values of MP and non-monotonic changes) occurs in casting 1. It is true that the additional vibration treatment and annealing helped to reduce the stress (expressed by the values of MP parameter), but this reduction was both insignificant and of a local nature (Fig. 8a). In casting 2, the vibration treatment applied to the as-cast roll barrel has not produced the desired result, leaving the stress value at a level nearly the same as in the untreated casting. In this case, however, quite effective has proved to be the stress relief annealing, successfully incorporated into the casting manufacturing process (Fig. 8b).

In this comparison it seems that the best combination of parameters has been achieved in casting 3 (Fig. 8c), which was manufactured by a technology involving the secondary metallurgical treatment of molten metal. This casting shows minimum stress level, regardless of the additionally applied vibration treatment and stress relief annealing.

5. Wnioski

Przedstawiona w niniejszej pracy analiza naprężeń w warstwie wierzchniej dostarczonych do badań odlewów ze staliwa o składzie podanym w tabeli 1 pozwala stwierdzić, że:

1. Stosowanie wyłącznie tradycyjnego odlewania, może przyczynić się do powstawania niekorzystnego stanu naprężeń (wysokie naprężenia rozciągające, zmieniające się w niemonotoniczny sposób na długości beczki) w warstwie wierzchniej odlewów. Naprężenia takie trudno jest potem obniżyć przez zastosowanie dodatkowych zabiegów technologicznych, takich jak wibrowanie lub wyżarzanie odprężające surowego odlewu, ponieważ zabieg ten odnosi się tylko do nieznacznego skutku.
2. Wykorzystanie procesu wibrowania bezpośrednio po zalaniu formy przyczynia się do ograniczenia porowatości w warstwie wierzchniej badanego odlewu (rys. 1). Zastosowanie wyłącznie takiej modyfikacji technologii wytwarzania nie przyniosło jednak oczekiwanego, rezultatu w postaci znaczącego obniżenia poziomu naprężeń w warstwie wierzchniej badanego odlewu. W niniejszych badaniach dopiero wyżarzanie odprężające przyczyniło się do obniżenia naprężeń, wyrażonych wartością parametru MP.
3. Z punktu widzenia minimalizowania naprężeń w warstwie wierzchniej badanych odlewów, korzystne okazało się poszerzenie technologii odlewania o dodatkową obróbkę metalurgiczną. Stwierdzono, że obróbka taka przyczynia się do wyraźnego obniżenia poziomu naprężeń, które w warstwie wierzchniej odlewu po takiej obróbce pozostawały najniższe i zbliżone na całej długości jego beczki. Niski poziom naprężeń w surowym odlewie wykonanym z wykorzystaniem technologii uzupełnionej o odtlenianie, argonowanie i zastosowanie modyfikatora daje duże szanse, aby po zastosowaniu dodatkowej obróbki odprężającej gotowy wyrób stalowy cechował się najkorzystniejszym, minimalnym poziomem naprężeń.

Podziękowania

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, wykonana w ramach grantu nr PBS2/B5/25/2013 „Opracowanie innowacyjnej technologii wytwarzania wielkotonażowych walców o zwiększonej trwałości eksploatacyjnej”.

Autorzy składają podziękowania za pomoc przy realizacji badań Panom: dr. hab. inż. Zenonowi Pirowskiemu, prof. IOd, mgr. inż. Waldemarowi Uhlowi i mgr. inż. Krzysztofowi Jaśkowcowi – Pracownikom

5. Conclusions

The stress studies described in this article, performed on the surface layer of test steel castings of the composition given in Table 1, have led to the following conclusions:

1. The use of a conventional casting process without additional treatment can contribute to the formation of an undesired state of stress in the surface layer of castings (high tensile stresses varying in a non-monotonic way along the length of cast roll barrel). Stresses of this type are difficult to reduce by additional treatments, such as vibrations or stress relief annealing, applied to raw castings, since their effect is of a marginal importance only.
2. Vibration treatment applied immediately after mould pouring helped to reduce porosity in the surface layer of test castings (Fig. 1), but introduced to the manufacturing process as a sole remedy did not produce the expected results, i.e. a substantial stress level reduction in the surface layer of test castings. As confirmed by these studies, only stress relief annealing has contributed to a substantial stress reduction expressed by the value of MP parameter.
3. Quite successful as a means to reduce to a minimum the stress level in the surface layer of test castings has proved to be the secondary metallurgical treatment incorporated in the casting manufacturing process. It was found that this treatment has contributed to a significant reduction of the stress level. Stresses in the surface layer of castings subjected to this treatment were kept at the lowest and even level along the entire roll barrel length. Low level of stresses in raw castings made by the technology including melt deoxidizing, argon treatment and inoculation raises hope for the production of cast steel rolls which, after the application of additional stress relief annealing, will be characterized by an optimal low level of stress.

Acknowledgements

This work supported by the National Research and Development Centre was made under a grant No PBS2/B5/25/2013 “The development of innovative technology to produce high-tonnage rolls with increased service life.”

The authors wish to thank the following persons for their help in carrying out the studies: DSc, PhD Eng. Zenon Pirowski, Prof. FRI, MSc, Eng. Waldemar Uhl and MSc, Eng. Krzysztof Jaśkowiec – Staff Members

Zakładu Stopów Żelaza Instytutu Odlewnictwa w Krakowie. in the Department of Ferrous Alloys, Foundry Research Institute in Cracow.

Literatura/References

1. Pacyna J., J. Krawczyk, A. Kokosza. 2001. Struktura i własności walców stalowych – kierunki rozwoju. W *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Buczek SA „Kierunki rozwoju produkcji walców”*, Wisła–Malinka, 21–23.02.2001, 169–177.
2. Pacyna J., J. Krawczyk, A. Kokosza, G. Mikulski, P. Grodowski. 2005. Staliwa na walce hutnicze – modyfikacja własności. W *Materiały X Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Buczek S.A. „Kierunki rozwoju produkcji walców”*, Wisła, kwiecień 2005, Materiały Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Seria: Metalurgia, nr 45, 80–87.
3. Pacyna J., A. Kokosza, E. Rożniata. 2006. Struktura i własności staliwa G165SiCrNiMo6-3-3-4 na wielkogabarytowe walce hutnicze. W *Materiały XI Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Buczek sp. z o.o. „Tendencje i kierunki rozwoju produkcji walców”*, Ustroń–Jaszowiec, marzec 2006, 113–122.
4. Krawczyk J., E. Rożniata. 2006. „Kształtowanie mikrostruktury i własności staliw nadeutektoidalnych”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 73 (4) : 170–177.
5. Krawczyk J., J. Pacyna, A. Kokosza. 2004. Fracture toughness of cast materials for mill rolls. W *Proceedings of 6th International Conference for Mesomechanics, Multiscaling in Applied Science and Emerging Technology, Fundamentals and Applications in Mesomechanics, Greece, Patras 31.05–4.06.2004*, 203–207.
6. Głównia J. 1987. Rola segregacji w procesie pęknięcia walców lanych. W *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Produkcja walców odlewanych i kutych oraz ich eksploatacja w walcowniach”*, Kraków–Koninki, październik 1987, *Zeszyty Naukowe AGH, Metalurgia i Odlewnictwo* 111 (1163) : 215–223.
7. Pacyna J., J. Krawczyk, A. Kokosza, A. Szczygieł, D. Latała. 2001. Mechanizm zużywania się stalowych walców bruzdowych. W *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Buczek SA „Kierunki rozwoju produkcji walców”*, Wisła–Malinka, 21–23.02.2001, 148–156.
8. Tiiitto K. 1985. Measuring Stresses in Rolls by Magnetoelastic Method. W *Proceedings of 27th Mechanical Working and Steel Processing Conference, Cleveland, Ohio, October 1985*, 27–29, 273–279.
9. Hosseinzadeh F., D.J. Smith, C.E. Truman. 2009. “Trough thickness residual stresses in large rolls and sleeves for metal working industry”. *Materials Science and Technology* 25 (7) : 862–873.
10. Tiiitto K. 1989. “Use of Barkhausen Effect in Testing for Residual Stresses and Material Defects”. *Non-Destructive Testing – Australia* 26 (2) : 36–41.
11. Kokosza A., J. Pacyna. 1997. „Kontrola naprężeń w warstwie wierzchniej walców oporowych wykonana metodą pomiaru szumów magnetycznych Barkhausena”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 64 (9) : 383–386.
12. Pacyna J., A. Kokosza, A. Wojtas. 1999. “Residual stress measurement in steel mill rolls using magnetic Barkhausen noise analysis”. *NDT.net* (Czasopismo elektroniczne) 4 (8), pobrane z: <http://www.ndt.net/article/v04n08/wojtas/wojtas.htm> [dostęp:16.03.2010].
13. Szymański W., M. Lech-Grega, M. Gawlik, A. Kokosza, A. Chochorowski. 2015. “Measurement of residual stresses in hot-rolled steel sheets for laser cutting”. *Computer Methods in Materials Science* 15 (1) : 251–257.

