Adam CHARCHALIS, Tomasz DYŁ, Agata WIECZORSKA
Gdynia Maritime University (Uniwersytet Morski w Gdyni)

THE POSSIBILITY OF EXTENDING THE LIFE OF CAST STEEL HULLS OF THE STEAM TURBINE

Możliwość przedłużenia żywotności stalownego kadłuba turbiny parowej

Abstract: *The paper presents the analyze the lifetime of the HP steam turbine hull for the EC Gdynia TG1 combined heat and power plant as part of the renovation. The impact of exploitation on changes in mechanical properties of the steam turbine hulls was determined. At the preliminary material tests were carried out, qualifying the hull of the steam turbine to undertake the revitalization process. Then, after non-destructive testing, trepanation samples were taken from the cold zone and the hot hull, which were subjected to mechanical properties tests. The next stage of work was the revitalization process including hardening and tempering. The mechanical properties and metallographic were carried out testing. In the next stage of work, non-destructive testing was performed to detect cracks and a decision was made to repair these areas by welding. The last stage of the work includes an analysis of the vitality of the steam turbine hull after revitalization.*

Keywords: cast steel, hull, heat treatment, steam turbine

Streszczenie: *W pracy przedstawiono analizę żywotności kadłuba turbiny parowej WP w elektrociepłowni EC Gdynia TG1 w ramach remontu. Określono wpływ eksploatacji na zmiany własności mechaniczne metalu kadłubów turbiny parowej. Przeprowadzono wstępne testy materiałowe, kwalifikujące kadłub turbiny parowej do podjęcia procesu rewitalizacji. Następnie po badaniach nieniszczących pobrano próbki trepanacyjne ze strefy zimnej i gorącej kadłuba, które poddano badaniom mechanicznym. Kolejnym etapem pracy był proces rewitalizacji, w tym hartowanie i odpuszczanie. Następnie przeprowadzono badania metalograficzne i wytrzymałościowe, a w dalszej kolejności badania nieniszczące w celu wykrycia pęknięć i podjęto decyzję o naprawie tych obszarów przez spawanie. Ostatni etap prac obejmuje analizę żywotności kadłuba turbiny parowej po rewitalizacji.*

Słowa kluczowe: staliwo, obróbka cieplna, kadłub turbiny parowej

1. Introduction

A very important issue is determining the viability of energy devices through diagnostics. In the power industry and marine power plant various types of gas and steam turbines are used [1-4]. In many power plants and steam turbines is working. It is important to determine the operational suitability of the turbines after exceeding the planned number of working hours. It is also important to determine the impact of exploitation on changes in mechanical properties of the metal of steam turbine hulls [5, 6].

The extension of working time of energy devices is carried out in very different ways. They concern, among others turbine elements with power from several dozen to 500 MW. It is assumed that after modernization and replacement repairs, the period of safe operation can be extended up to 20-25 years, which means that the total life of unlisted elements may exceed 350,000 hours [7, 10-13]. According to reports on the state of the Polish energy economy, it can be stated that due to the bad or unsatisfactory technical condition of Polish power units by 2030, 60% of power plants with a total capacity of about 20 000 MW should be excluded from use. Over 40% of power units are already working for about 40 years, while 15% of them have already over 50 years [7, 11, 13], which means that they need to be stopped and disconnected. In order to overcome these power losses, investments should be made to build new power units, which requires huge financial outlays as well as a long implementation time. An alternative is the renovation and modernization of existing power units, the advantage of which is a much smaller financial outlay as well as a shorter project implementation time. These repairs and modernization of turbine sets consist in the replacement of used parts, which results in the restoration or improvement of efficiency of a given turbine [6, 8, 9, 11, 12].

The purpose of the article was to analysed the service life of a cast steel steam turbine hull for the EC Gdynia TG1 combined heat and power plant as part of the planned renovation. The scope of work included the possibility of restoring to service the hull of a steam turbine made of cast steel G20Mo5, which is conditioned by the degree of material destruction.

Hull steam turbine HP for the EC Gdynia TG1 after dismantling (fig. 1).

On the connection flanges and axial inlets of the upper and lower parts of the hull, some of the studs remain. On the external surface of the upper and lower part of the hull remained wires and tapes for assembly and insulation. The outer surface of the upper and lower part of the hull was covered with corrosion, and the inner surface with steam exploitation raids. No visible damages to the hull as a result of incorrect operation or failure. After cleaning the hull (both the lower and upper

parts) by sandblasting, surface tests were first made using the magnetic-powder method on the whole surface of the casting.

Based on the number of turbine starts in 2008-2017 given by EDF WYBRZEŻE, the number of turbine starts has been estimated from the beginning of operation to the current renovation, including various states at approximately 370 [12, 13]. Figure 2 shows the steam turbine fuselage prepared for the revitalization process by heat treatment, which aims to dissolve the carbides and enable repairs by welding.

a)

b)

Fig. 1. The hull of the HP steam turbine for EC Gdynia TG1 as delivered after disassembly: a) lower part, b) upper part

Fig. 2. The hull of the HP steam turbine for EC Gdynia TG1 prepared for the revitalization process

2. Materials properties the hull of the steam turbine

In steam turbines commonly used steel castings. Due to the continuous operation of the material at elevated temperature 300–600°C rigorous requirements are imposed on them. The material must be resistant to creep, corrosion and must be resistant to dynamic damage during start-up and stopping of the turbine, when there is a short-term but intense accumulation of locally located stresses [4-6]. Due to the working conditions of the steam turbine hulls, the material used is usually Cr-Mo-V, Cr-Mo or Mo cast steel. In order to obtain good weldability, the carbon content does not exceed 0.25%. In addition to the proper chemical composition, the material properties are also influenced by the use of a proper heat treatment. Cast steel G20Mo5 is used in the case of lowering production costs, instead of alloys with a richer chemical composition [8-10].

Chemical composition and mechanical properties of the test cast steel G20Mo5 are shown in tab. 1.

Table 1

Chemical composition and mechanical properties of cast steel G20Mo5

C	Cr	Mo	Si	Mn	P	S
0.15-0.23	0.4-0.7	0.4-0.6	0.6	0.5-1.0	0.025	0.020
R _e [MPa]	R _m [MPa]		A [%]		KV [J]	
245	420-480		22		27	

The mechanical properties of the castings on the hulls of steam turbines change depending on the time of material exploitation. Initially, a slight decrease in R_e and R_m is observed, however, these changes are within the requirements set by specific standards and may be of unchanged value over subsequent years of operation. With the increasing time of operation, plastic properties change as well, which is determined by the elongation in the tensile test and impact strength [12]. After exploitation, the following defects were found: 29 cracks of length 10-80 mm were found on the outer surface of the upper part of the hull, cracks were not revealed on the inner surface. On the external surface of the lower part of the hull 25 cracks of length 15-65 mm were found, while cracks were not revealed on the inner surface. Detected cracks could be removed by mechanical machining.

Non-destructive and destructive tests were performed: impact test, static tensile test, metallographic tests and hardness measurements. Microstructure investigations were performed using the Axioskop optical microscope at 1000x magnification on samples digested in the $Mi1Fe$ reagent. Hardness measurements were made using a Vickers Zwick 3212 durometer with a load of 98.1 N according to PN-EN ISO 6507-1: 2018-05. Impact tests were carried out using a Charpy impact hammer Zwick 5111 at ambient temperature with notch V according to PN-EN ISO 148-1: 2017-02. The static tensile test was performed in accordance with the PN-EN ISO 6892-1: 2016-09 standard on the Zwick 250 testing machine. The results of hardness measurements of the upper and lower hull parts, Charpy V sample breaking energy and static tensile test are presented in tab. 2.

Table 2

The results of measurements of hardness, impact energy of Charpy V samples and the static tensile test for the post-operational state and after revitalization of the material of the hull

No	HV10	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]	KV [J]
<i>post-operational state</i>						
1GG	160	277	508	28,9	58	9
2GZ	167	324	511	24,7	61	17
3DG	155	311	500	22,5	60	8
4DZ	151	318	505	25,5	63	14
<i>after revitalization</i>						
11GG	155	342	519	24,6	63	70
12GZ	152	346	509	28,4	70	59
13DG	151	351	511	25,3	69	95
14DZ	159	364	526	23,8	64	64

The revitalization process of the steam turbine hull consisted of heat treatment, which aims to enable repair by welding. However, before proceeding to this stage, both hull halves had to be connected to each other (fig. 2) and stiffened with sections, in order to protect the casting before significant deformations occurred during the heat treatment.

The purpose of heat treatment in the revitalization process of the steam turbine hull is to remove after-care changes of the microstructure and to obtain a sufficiently high impact resistance and to enable the correct repair performance by welding the material after removed, after-cracked cracks. Tempering was carried out by heating to the temperature of austenite and heating at this temperature and subsequent cooling to obtain non-equilibrium structures - martensite, bainite or a mixture of martensite and bainite. The use of heat treatment to revitalize the steam turbine hulls resulted in favorable changes in microstructure and mechanical properties. As a result of the heat treatment, a significant increase in the energy of breaking Charpy V samples was obtained. In the after-care condition, the average impact strength was 12 J, and after the revitalization process, the average value reached 72 J. It can therefore be concluded that the energy of breaking the Charpy V samples of the steam turbine's hull after revitalization has increased by six times.

Fig. 3. The microstructures of sample from the upper part of the hull: a- post-operational state b- after revitalization, at 1000x magnification, etched with $Mi1Fe$

The microstructure of the hull material from the upper and lower part is composed of ferrite and pearlite, with a ferrite content of about 80%. However, the microstructure of material of the upper and lower parts of the steam turbine hull after regeneration is composed of bainite grains (fig. 3).

3. The analysis of the life of a steam turbine hull

The most important factors affecting the lifetime of steam turbines are: turbine type and operating conditions, element construction, manufacturing technology and material used. The assessment of the technical condition of the turbine elements includes: operation history, experience from the operation of similar turbines, life-cycle calculations and the results of component testing. In order to assess the degradation of material applied to the element under consideration, showing its wear during stationary and non-stationary work, the life-span calculation of the steam turbine is performed. For calculations of wear during stationary work, the temperature and stresses in the element under consideration, the location of the most loaded places and the development of appropriate creep characteristics of the material are determined. Accurate temperature and stress calculations are very important. In the case of non-stationary work, the basis for calculations are precisely determined amplitudes of stresses and strains and fatigue characteristics of a low-grade material at elevated temperature.

The calculation principle is given in the German standard TRD 301/508 (Technische Regeln Für Dampfkessel, TRD301/508), according to which the life calculation of the hull steam turbine HP EC Gdynia TG1 has been carried out [12]. The material grade G20Mo5, the working pressure $p = 10$ MPa, the service life $t = 232\,658$ hours, the number of starts in different states was accepted: $N = 452$ (N - total number of starts), $N_1 = 82$ (number of warm starts), $N_2 = 370$ (number of starts from the cold state), heating speed at start-up: $v_1 = 1^\circ\text{C}/\text{min}$, $v_2 = 3^\circ\text{C}/\text{min}$, cooling rate at standstill: $v_3 = 0.5^\circ\text{C}/\text{min}$, dimension: $D_z = 850$ mm, $D_w = 650$ mm, $g = 220$ mm [12, 13].

The maximum permissible working time at 535°C , adopted from the creep performance of G20Mo5 cast steel is 800 000 hours. Hull life in operation was calculated for an additional 257 000 working hours, which is 29 years after conversion. After the element reaches the design lifetime equal to $Z = 0.75$, further exploitation is associated with the risk of failure, from that moment there is no guarantee of safety. For rotors and turbine hulls, the service life should be less than or equal to 0.75.

4. Summary and Conclusions

The study show that the revitalization of the outer hull was carried out correctly and restored the material to plastic deformation. The lifespan of the hull after revitalization was calculated for 29 years.

The microstructure of the material after exploitation in the upper and lower part of the hull consists of ferrite and pearlite grains. The ferrite content is about 80%. As a result of the revitalization, carbides were dissolved at the grain boundaries. The structure of the

hull material after revitalization is the one that was produced at the stage of production of hulls made of cast steel in the G20Mo5 grade. The impact strength of the upper and lower parts of the hull after revitalization is very high. The test fracture work on Charpy V notch samples ranges from 59 J to 95 J and complies with the requirements of the recipient, and higher than required by current national and industry standards.

The mechanical properties of the hull after revitalization are in accordance with the requirements contained in the standards and expert opinion on the state of the steam turbine for EC Gdynia TG1.

Welding repair of places after the removed layers of material with cracks was carried out correctly. It was found that the hull after revitalization can still be operated in the current conditions in the same way as the new hull. The next planned renovation of the steam turbine must relate to the re-checking of the hull material condition.

5. References

1. Charchalis A.: Applications of diagnosing of naval gas turbines. Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management. ELSEVIER. 2001.
2. Charchalis A.: Conditions of drive and diagnostic measurements during sea tests. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 13, No. 4, 2006.
3. Charchalis A.: Diagnozowanie okrętowych silników turbinowych. AMW Gdynia 1991.
4. Cwilewicz R., Perepeczko A.: Okrętowe turbiny parowe. AMG Gdynia 2014.
5. Dobosiewicz J.: Eksploatacyjna przydatność turbin małej mocy po przekroczeniu 200000 godzin pracy. Energetyka, No. 7, 1993.
6. Dobosiewicz J.: Wpływ eksploatacji na zmiany własności mechanicznych metalu kadłubów turbin parowych. Energetyka, No. 1, 1992.
7. Dobosiewicz J.: Zasadność regeneracji kadłubów turbin parowych. Energetyka, No. 11, 1996.
8. Dudziński K., Dudziński W., Pękalska L., Pękalski G.: Spawanie i regeneracyjna obróbka cieplna korpusów turbin parowych. Inżynieria Materiałowa, No. 6, 2003.
9. Rajca S., Grzesiczek E.: Stan materiału kadłuba turbiny parowej po naprawie przez spawanie. Energetyka, No. 12, 2001.
10. Rehms-Forc A.: Zmiany struktury zachodzące po rewitalizacji kadłubów turbin parowych. Inżynieria Materiałowa, No. 3, 2006.
11. Trzeczyskiński J.: Możliwość i warunki przedłużania czasu eksploatacji zrewitalizowanych elementów stalowych turbin parowych. Energetyka, No. 6, 2011.
12. Wieczorska A.: Analiza możliwości przedłużania czasu eksploatacji kadłuba turbiny parowej po rewitalizacji. Master's dissertation. Akademia Morska w Gdyni, 2018.
13. Wieczorska A., Dyl T.: Analysis of the possibility of extending the lifetime of the steam turbine hull after revitalization. Hutnik - Wiadomości Hutnicze, t. 86, nr 2, 2019.

MOŻLIWOŚĆ PRZEDŁUŻENIA ŻYWOTNOŚCI STALOWEGO KADŁUBA TURBINY PAROWEJ

1. Wprowadzenie

W energetyce i siłowniach okrętowych stosuje się różne rodzaje turbin gazowych i parowych [1-4]. W wielu elektrowniach wykorzystuje się turbiny parowe. Bardzo ważną kwestią jest określenie przydatności eksploatacyjnej turbin po przekroczeniu planowanej liczby godzin pracy. Ważne jest również określenie wpływu eksploatacji na zmiany własności mechanicznych kadłubów turbin parowych [5, 6].

Wydłużenie czasu pracy urządzeń energetycznych odbywa się na bardzo różne sposoby. Dotyczą one m.in. elementów turbin o mocy od kilkudziesięciu do 500 MW. Zakłada się, że po modernizacjach i naprawach zastępczych okres bezpiecznej eksploatacji można wydłużyć do 20–25 lat, co oznacza, że całkowita żywotność niewymienionych elementów może przekroczyć 350 tys. godzin [7, 10–13]. Na podstawie raportów o stanie polskiej gospodarki energetycznej można stwierdzić, że ze względu na zły lub niezadowalający stan techniczny polskich bloków energetycznych do 2030 r. 60% elektrowni o łącznej mocy ok. 20 tys. MW powinno zostać wyłączonych z użytkowania. Ponad 40% bloków pracuje już od ok. 40 lat, a 15% z nich ma już ponad 50 lat [7, 11, 13], co oznacza, że muszą zostać zatrzymane i odłączone. Aby odrobić te straty mocy, należy wybudować nowe bloki energetyczne, co wymaga ogromnych nakładów finansowych oraz długiego czasu realizacji. Alternatywą jest remont i modernizacja istniejących bloków energetycznych, czego zaletą jest znacznie mniejszy nakład finansowy oraz krótszy czas realizacji projektu. Remonty i modernizacje zespołów turbin polegają na wymianie lub naprawie zużytych części, co skutkuje przywróceniem lub poprawą wydajności danej turbiny [6, 8, 9, 11, 12].

Celem pracy była analiza żywotności kadłuba turbiny parowej dla elektrociepłowni EC Gdynia TG1 w ramach planowanego remontu. Zakres prac obejmował możliwość przywrócenia do eksploatacji kadłuba turbiny parowej wykonanej ze staliwa G20Mo5, co było uwarunkowane stopniem zniszczenia materiału.

Kadłub turbiny parowej WP dla EC Gdynia TG1 po demontażu przedstawiono na rys. 1. Na kołnierzach przyłączeniowych i wpustach osiowych części górnej

i dolnej kadłuba pozostała część śrub dwustronnych. Na powierzchni zewnętrznej części górnej i dolnej kadłuba pozostały druty i taśmy do montażu i izolacji. Powierzchnia zewnętrzna części górnej i dolnej kadłuba pokryta była korozją, a powierzchnia wewnętrzna nalotami eksploatacyjnymi pary. Nie stwierdzono widocznych uszkodzeń kadłuba na skutek niepoprawnej eksploatacji lub awarii. Po oczyszczeniu kadłuba (zarówno części dolnej, jak i górnej) przez piaskowanie, w pierwszej kolejności wykonano badania powierzchniowe metodą magnetyczno-proszkową na całej powierzchni odlewu.

Na podstawie liczby uruchomień turbiny w okresie 2008–2017 r. podanej przez EDF WYBRZEŻE oszacowano liczbę uruchomień turbiny od początku eksploatacji do obecnego remontu, łącznie z różnych stanów na ok. 370 [12, 13]. Na rys. 2 przedstawiono kadłub turbiny parowej przygotowany do procesu rewalidacji poprzez obróbkę cieplną, która ma na celu rozpuszczenie węglików i umożliwienie napraw spawaniem.

Rys. 1. Kadłub turbiny parowej WP dla EC Gdynia TG1 po demontażu: a) część dolna, b) część górna

Rys. 2. Kadłub turbiny parowej WP dla EC Gdynia TG1 przygotowany do procesu rewitalizacji

2. Własności materiału kadłuba turbiny parowej

W turbinach parowych najczęściej stosuje się odlewy stalowe. Ze względu na ciągłą pracę materiału w podwyższonej temperaturze, rzędu 300–600°C, stawiane są im rygorystyczne wymagania. Materiał musi być odporny na pękanie, korozję oraz musi cechować się odpornością na uszkodzenia dynamiczne podczas uruchamiania i zatrzymywania turbiny, kiedy występuje krótkotrwałe, lecz intensywne spiętrzanie się miejscowo zlokalizowanych naprężeń [4-6]. Ze względu na warunki pracy kadłubów turbin parowych materiał, jaki się stosuje, to zazwyczaj staliwa typu Cr-Mo-V, Cr-Mo lub Mo. W celu uzyskania dobrej spawalności zawartość węgla nie przekracza 0,25%. Oprócz właściwego składu chemicznego, na własności materiału ma również wpływ zastosowanie właściwej obróbki cieplnej. Staliwo G20Mo5 stosowane jest w przypadku obniżenia kosztów produkcji, zamiast stopów o bogatszym składzie chemicznym [8-10]. Skład chemiczny i własności mechaniczne badanego staliwa G20Mo5 przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1

Skład chemiczny i własności mechaniczne staliwa G20Mo5

C	Cr	Mo	Si	Mn	P	S
0,15-0,23	0,4-0,7	0,4-0,6	0,6	0,5-1,0	0,025	0,020
R_e [MPa]	R_m [MPa]		A [%]		KV [J]	
245	420-480		22		27	

Własności mechaniczne odlewów na kadłuby turbin parowych zmieniają się w zależności od czasu eksploatacji materiału. Początkowo obserwuje się nieznaczny spadek R_e i R_m , jednak zmiany te mieszczą się w wymaganiach stawianych

przez określone normy i przez kolejne lata pracy mogą charakteryzować się niezmienną wartością. Wraz z rosnącym czasem eksploatacji zmianie ulegają również własności plastyczne, których wyznacznikiem jest wydłużenie w próbie rozciągania i uderność [12]. Po eksploatacji wykryto następujące wady: na powierzchni zewnętrznej części górnej kadłuba stwierdzono 29 pęknięć o długościach 10–80 mm, na powierzchni wewnętrznej nie ujawniono pęknięć. Na powierzchni zewnętrznej części dolnej kadłuba stwierdzono 25 pęknięć o długościach 15–65 mm, natomiast na powierzchni wewnętrznej nie ujawniono pęknięć. Wykryte pęknięcia można było usunąć przez obróbkę mechaniczną.

Przeprowadzono badania nieniszczące i niszczące obejmujące: badanie uderności, statyczną próbę rozciągania, badania metalograficzne oraz pomiary twardości. Badania mikrostruktury wykonano z wykorzystaniem mikroskopu optycznego Axioskop przy powiększeniu 1000x na próbkach trawionych w odczynniku $Mi1Fe$. Pomiary twardości wykonano za pomocą twardościomierza Vickersa Zwick 3212 przy obciążeniu 98,1 N zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1: 2018-05. Próby uderności wykonano za pomocą młota udernościowego Charpy'ego Zwick 5111 w temperaturze otoczenia z karbem V według normy PN-EN ISO 148-1: 2017-02. Statyczną próbę rozciągania wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1: 2016-09 na maszynie wytrzymałościowej Zwick 250. Wyniki pomiarów twardości próbek z części górnej i dolnej kadłuba, energii łamania próbek Charpy V i statycznej próby rozciągania przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2

Wyniki pomiarów twardości, energii łamania próbek Charpy V i statycznej próby rozciągania dla poeksploatacyjnego stanu materiału kadłuba

Nr	HV10	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]	KV [J]
poeksploatacyjny stan materiału kadłuba						
1GG	160	277	508	28,9	58	9
2GZ	167	324	511	24,7	61	17
3DG	155	311	500	22,5	60	8
4DZ	151	318	505	25,5	63	14
po rewitalizacji stan materiału kadłuba						
11GG	155	342	519	24,6	63	70
12GZ	152	346	509	28,4	70	59
13DG	151	351	511	25,3	69	95
14DZ	159	364	526	23,8	64	64

Proces rewitalizacji kadłuba turbiny parowej polegał na obróbce cieplnej, która ma na celu umożliwienie naprawy przez spawanie. Jednak przed przystąpieniem do tego etapu należało połączyć ze sobą obydwie połówki kadłuba (rys. 2) oraz usztywnić je kształtownikami, co miało na celu zabezpieczenie odlewu przed wystąpieniem znacznych odkształceń podczas obróbki cieplnej.

Celem obróbki cieplnej w procesie rewitalizacji kadłuba turbiny parowej jest: usunięcie poeksploatacyjnych zmian mikrostruktury i uzyskanie odpowiednio wysokiej udatności oraz umożliwienie poprawnego wykonania naprawy spawaniem materiału po usuniętych, poeksploatacyjnych pęknięciach. Hartowanie przeprowadzono przez nagrzanie do temperatury występowania austenitu oraz wygrzanie w tej temperaturze i następne schłodzenie, w celu uzyskania struktur nierównowagowych – martenzytu, bainitu lub mieszaniny martenzytu i bainitu. Zastosowanie obróbki cieplnej do rewitalizacji kadłubów turbiny parowej spowodowało korzystne zmiany mikrostruktury i własności mechanicznych. W wyniku zastosowania obróbki cieplnej uzyskano wyraźny wzrost energii łamania próbek Charpy V. W stanie poeksploatacyjnym średnia udatność wynosiła 12 J, a po procesie rewitalizacji wartość średnia osiągnęła 72 J. Można zatem stwierdzić, że energia łamania próbek Charpy V kadłuba turbiny parowej po rewitalizacji wzrosła sześciokrotnie.

Rys. 3. Mikrostruktura próbki z części górnej kadłuba: a) stan po eksploatacji, b) stan po rewitalizacji, przy powiększeniu 1000x, traw. Mi1Fe

Mikrostruktura materiału kadłuba z części górnej i dolnej złożona jest z ferrytu i perlitu, o zawartości ferrytu około 80%. Natomiast mikrostruktura materiału części górnej i dolnej kadłuba turbiny parowej po rewitalizacji jest złożona z ziaren bainitu (rys. 3).

3. Analiza żywotności kadłuba turbiny parowej

Najważniejsze czynniki wpływające na żywotność turbin parowych to: rodzaj i warunki pracy turbiny, konstrukcja elementu, technologia wykonania oraz zastosowany materiał. Ocena stanu technicznego elementów turbin uwzględnia: historię eksploatacji, doświadczenie z eksploatacji podobnych turbin, obliczenia żywotności i wyniki badania elementów.

W celu dokonania oceny degradacji materiału zastosowanego na rozpatrywany element, wykazującej jego zużycie podczas pracy stacjonarnej i niestacjonarnej wykonuje się obliczenia żywotności turbiny parowej. Do obliczeń zużycia podczas pracy stacjonarnej określa się temperaturę i naprężenia w rozpatrywanym elemencie, zlokalizowanie miejsc najbardziej obciążonych i opracowanie właściwych charakterystyk pełzaniowych materiału. Bardzo ważne są dokładne obliczenia temperatury i naprężeń. Przy pracy niestacjonarnej podstawą obliczeń są dokładnie wyznaczone amplitudy naprężeń i odkształceń oraz charakterystyki zmęczenia niskocyklicznego materiału w podwyższonej temperaturze.

Zasadę obliczeń podaje norma niemiecka TRD 301/508 (Technische Regeln Fur Dampfkessel, TRD301/508), według której zostały przeprowadzone obliczenia żywotności kadłuba turbiny parowej WP EC Gdynia TG1 [12]. Do obliczeń przyjęto gatunek materiału G20Mo5, ciśnienie robocze $p = 10$ MPa, czas eksploatacji $t = 232\,658$ godzin, liczbę uruchomień w różnych stanach: $N = 452$ (N – całkowita liczba uruchomień), $N_1 = 82$ (liczba uruchomień ze stanu ciepłego), $N_2 = 370$ (liczba uruchomień ze stanu zimnego), prędkość nagrzewania przy uruchamianiu: $v_1 = 1^\circ\text{C}/\text{min}$, $v_2 = 3^\circ\text{C}/\text{min}$, prędkość stygnięcia przy odstawianiu: $v_3 = 0,5^\circ\text{C}/\text{min}$, wymiar: $D_z = 850$ mm, $D_w = 650$ mm, $g = 220$ mm [12, 13].

Maksymalny dopuszczalny czas pracy w temperaturze 535°C , przyjęty z charakterystyki pełzaniowej staliwa G20Mo5, wynosi 800 000 godzin. Żywotność kadłuba w eksploatacji obliczono na dodatkowe 257 000 godzin pracy, co po przeliczeniu wynosi 29 lat. Po osiągnięciu przez element żywotności obliczeniowej równej $Z = 0,75$ dalsza eksploatacja wiąże się z ryzykiem awarii, od tego momentu nie ma gwarancji bezpieczeństwa. Dla wirników i kadłubów turbin wartość żywotności powinna być mniejsza lub równa 0,75

4. Podsumowanie i wnioski

Badania pokazują, że rewitalizacja zewnętrznego kadłuba została przeprowadzona prawidłowo i została przywrócona zdolność materiału do plastycznego odkształcenia. Żywotność kadłuba po rewitalizacji obliczono na 29 lat.

Mikrostruktura materiału po eksploatacji w górnej i dolnej części kadłuba składa się z ziaren ferrytu i perlitu. Zawartość ferrytu wynosi ok. 80%. W wyniku rewitalizacji węgliki zostały rozpuszczone na granicach ziaren. Struktura materiału kadłuba po rewitalizacji to taka, która została wytworzona na etapie produkcji kadłubów ze staliwa w gatunku G20Mo5. Udarność górnej i dolnej części kadłuba po rewitalizacji jest bardzo wysoka. Praca łamania badana na próbkach Charpy'ego z karbem V wynosi od 59 J do 95 J i jest zgodna z wymaganiami odbiorcy i wyższe niż wymagane przez aktualne normy krajowe i branżowe.

Własności mechaniczne kadłuba po rewitalizacji są zgodne z wymaganiami zawartymi w normach oraz ekspertyzą stanu turbiny parowej dla EC Gdynia TG1.

Naprawa kadłuba została wykonana poprzez spawanie miejsc po usunięciu warstw materiału z pęknięciami. Stwierdzono, że kadłub po rewitalizacji może być nadal eksploatowany w obecnych warunkach w taki sam sposób jak nowy kadłub. Następny planowany remont turbiny parowej musi dotyczyć ponownego sprawdzenia stanu materiału kadłuba.

5. Literatura

1. Charchalis A.: Applications of diagnosing of naval gas turbines. Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management. ELSEVIER. 2001.
2. Charchalis A.: Conditions of drive and diagnostic measurements during sea tests. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 13, No. 4, 2006.
3. Charchalis A.: Diagnostowanie okrętowych silników turbinowych. AMW Gdynia 1991.
4. Cwilewicz R., Perepeczko A.: Okrętowe turbiny parowe. AMG Gdynia 2014.
5. Dobosiewicz J.: Eksploatacyjna przydatność turbin małej mocy po przekroczeniu 200000 godzin pracy. Energetyka, No. 7, 1993.
6. Dobosiewicz J.: Wpływ eksploatacji na zmiany własności mechanicznych metalu kadłubów turbin parowych. Energetyka, No. 1, 1992.
7. Dobosiewicz J.: Zasadność regeneracji kadłubów turbin parowych. Energetyka, No. 11, 1996.
8. Dudziński K., Dudziński W., Pękalska L., Pękalski G.: Spawanie i regeneracyjna obróbka cieplna korpusów turbin parowych. Inżynieria Materiałowa, No. 6, 2003.
9. Rajca S., Grzesiczek E.: Stan materiału kadłuba turbiny parowej po naprawie przez spawanie. Energetyka, No. 12, 2001.
10. Rehmus-Forc A.: Zmiany struktury zachodzące po rewitalizacji kadłubów turbin parowych. Inżynieria Materiałowa, No. 3, 2006.
11. Trzeszczyński J.: Możliwość i warunki przedłużania czasu eksploatacji zrewitalizowanych elementów stalowych turbin parowych. Energetyka, No. 6, 2011.

12. Wieczorska A.: Analiza możliwości przedłużania czasu eksploatacji kadłuba turbiny parowej po rewitalizacji. Master's dissertation. Akademia Morska w Gdyni, 2018.
13. Wieczorska A., Dyl T.: Analysis of the possibility of extending the lifetime of the steam turbine hull after revitalization. *Hutnik - Wiadomości Hutnicze*, t. 86, nr 2, 2019.