

doi:10.15199/48.2015.10.18

Wdrożenie produkcji elementów turbin gazowych w Zakładzie Mechanicznym EthosEnergy Poland S.A.

Streszczenie. Niniejsze opracowanie dotyczy wdrożenia produkcji elementów turbin gazowych na przykładzie trzech kompletów kierownic łopatek stacjonarnych kompresora turbiny gazowej. Opisuje problemy produkcyjne, z którymi przyszło nam się zmierzyć w trakcie realizacji wspomnianego zlecenia, jak również specjalistyczne technologie oraz nowoczesne aparaty pomiarowe, które znajdują zastosowanie w trakcie produkcji tego typu konstrukcji.

Abstract. This article concerns implementation of gas turbine components production, based on three sets of compressor vane carriers. Briefly describes production issues, that occurred while manufacturing the mentioned components as well as special technologies and advanced measuring devices being used during production and in-process inspections of this type of constructions. **The implementation of gas turbine components in RthosEnergy Poland company**

Słowa kluczowe: turbina gazowa, project, wdrożenie

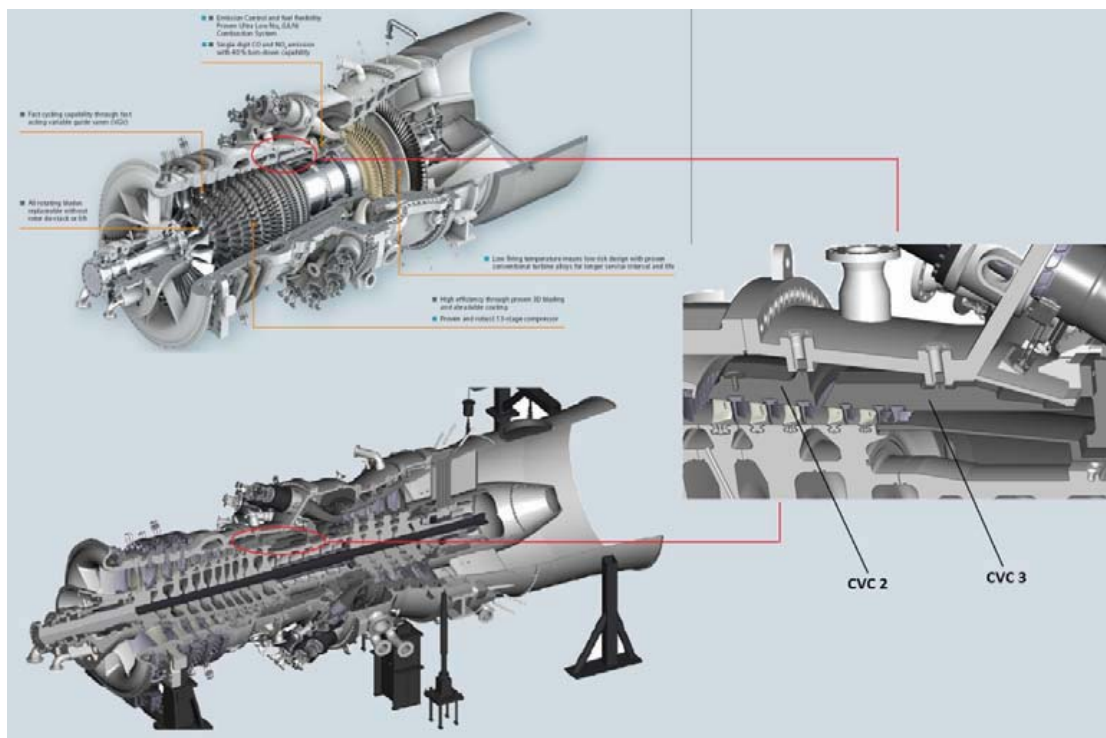
Keywords: gas turbine, design

Wstęp

Początkowo działalność Zakładu Mechanicznego obejmowała wytwarzanie komponentów stalowych w zakresie części zamiennych dla wielu urządzeń energetycznych i ciepłych, pracujących w polskich elektrowniach. Jednakże wraz z rozwojem przemysłu działalność Zakładu Mechanicznego uległa znacznemu rozszerzeniu, obejmując swym zakresem nie tylko części zamienne i drobne elementy ale również bardziej skomplikowane konstrukcje stalowe. W obszarze zainteresowania Zakładu Mechanicznego szczególne miejsce zajęły wielkogabarytowe korpusy generatorów, przeznaczone nie tylko dla elektrowni konwencjonalnych ale również atomowych, obudowy turbin, wymienniki ciepła, pokrywy łożyskowe, kadzie transformatorowe oraz pojemniki ciśnieniowe do przechowywania i transportu wirników. Tak znaczne rozszerzenie zakresu produkcji

więzało się także z przeprowadzeniem licznych kwalifikacji materiałów i procesów technologicznych, a w szczególności procesów spawania i badań nieniszczących, stanowiących ich integralną część, oraz z licznymi inwestycjami w nowoczesny park maszynowy. Szczególny nacisk położono na wykształcenie wysoko wykwalifikowanej kadry pracowniczej, jako jednego z podstawowych gwarantów uzyskania efektywnych wyników i rozwoju firmy.

W ostatnim okresie Zarząd spółki zatwierdził kolejny etap dywersyfikacji i rozszerzenia palety produktów oferowanych przez Zakład Mechaniczny o elementy turbin gazowych. Obecnie jesteśmy na etapie produkcji trzech kompletów kierownic łopatek stacjonarnych kompresora turbiny. Jest to produkcja kwalifikacyjna, umożliwiająca wejście na wymagający rynek dostaw komponentów do turbin gazowych.



Rys.1 Umiejscowienie kierownic łopatek stacjonarnych CVC2 i CVC3 w turbinie.

Zakres prac

Zlecenie obejmuje wykonanie trzech kompletów kierownic łopatek CVC2 i CVC3 turbin gazowych, wykonanych ze stali węglowych oraz stopowych, przeznaczonych do pracy w podwyższonej temperaturze na zbiorniki ciśnieniowe. Proces produkcyjny został podzielony na następujące etapy:

- fabrykację (składanie i spawanie wraz z wyżarzaniem odprężającym);
- obróbkę rowków łopatek i gniazd pod napylanie cieplne warstwy dodatkowej;
- natryskiwanie HVOF (High Velocity Oxy – Fuel), obróbkę warstwy napyłonej
- wysyłkę.



Rys.2 Wizualizacja kierownic łopatek stacjonarnych.

Fabrykacja – pierwsze wyzwania

Przegląd dokumentacji technologicznej, dostarczonej przez klienta wykazał, iż pierwotne założenia projektowe dotyczyły elementów odlewanych. Ze względów ekonomicznych i trudnościach w modyfikacji szerokiego zakresu dodatków stopowych została podjęta decyzja o wykonaniu kierownic łopatek jako konstrukcji spawanej. Wymusiło to na nas ponowne zamodelowanie obu kierownic i wprowadzenie modyfikacji projektowych, które w pełni zostały zaakceptowane przez klienta. Dodatkowych trudności w procesie fabrykacji dostarczył sam materiał, ponieważ stale chromowo-molibdenowe ze względu na duże ryzyko lokalnego podhartowania w SWC wymagają specjalnego traktowania w trakcie procesu spawania jak również wypalania [4]. Dlatego w celu minimalizacji wspomnianego ryzyka, a w konsekwencji ograniczenia wzrostu kruchości i wystąpienia pęknięć już w trakcie przygotowywania elementów wypalanych zastosowano podgrzewanie. Rzeczą niezmiernie ważną było kontrolowanie i utrzymanie jeszcze wyższych temperatur przed i w trakcie spawania w celu eliminacji niekorzystnego wzrostu kruchości stali i maksymalnej redukcji dodatkowych naprężeń powstających w spoinie i stworzenie korzystnych warunków dla dyfuzji wodoru do otoczenia [4],[5]. Oznaczało to stałe podgrzewanie konstrukcji z tak wielu stron jak to było tylko możliwe, w celu uzyskania wymaganego rozkładu ciepła w materiale. Co z kolei, poza znacznym ograniczeniem dostępem do spoin ze względu na okablowanie mat grzewczych i zastosowane usztywnienia, powodowało dodatkowe utrudnienia zarówno dla spawacza wykonującego spoiny, jak również inspektora wykonującego badania MT po żłobieniu na w pełni gorącym obiekcie.

Pomimo zastosowania masywnych usztywnień rurowych i ograniczenia powstawania wysokich naprężeń spowodowanych cyklem ciepłym spawania, siły oddziałujące na konstrukcję w trakcie krzepnięcia spoiny okazały się na tyle duże, że spowodowały pęknięcie spoin sczepiających obie połówki i częściowe odkształcenie obu

połówek na końcach kołnierzy podziałowych, co zostało skorygowane dopiero w trakcie obróbki mechanicznej. Fakt wystąpienia tak dużych sił zaowocował zastosowaniem dodatkowych zacisków wykonanych z blach spawanych do obu połówek od strony zewnętrznej na kolejnych kompletach. Wszystkie połączenia spawane zostały wykonane metodą FCAW (136) w której wykorzystuje się energię cieplną generowaną przez łuk elektryczny prądu stałego, w celu stopienia metalu w obszarze złącza. Łuk wytwarzany jest pomiędzy drutem spawalniczym, w postaci zwiniętej rurki wypełnionej mieszaniną odpowiednich pierwiastków w postaci proszku - podawanym w trybie ciągłym - a spawanym elementem, powodując stąpienie zarówno drutu jak również materiału podstawowego w jego pobliżu. Cały obszar łuku otoczony jest gazem osłonowym, chroniącym jeziorko ciekłego metalu przed niekorzystnym wpływem otaczającego powietrza. Jest to metoda stanowiąca odmianę procesu GMAW i choć łączy je wiele cech wspólnych, to istnieje również kilka istotnych różnic. Przykładowo, proces FCAW oferuje większą wszechstronność w zakresie składu obrabianych stopów. Zazwyczaj umożliwia też osiągnięcie większej wydajności stąpienia oraz dużej stabilności łuku. Dodatkowo jest metodą mniej podatną na powstawanie wad typu przyklejenia w porównaniu do spawania drutem litym. Jednakże ze względu na zastosowanie nieodpowiedniej techniki i braku należytej dbałości o odpowiednie oczyszczenie ściegów przed nakładaniem kolejnych warstw powoduje znacznie zwiększone występowanie wtrąceń żużla. Podwyższona jest również emisja pyłów i dymów spawalniczych [1], [2], [5]. W ten sposób pospawaną konstrukcję poddano badaniom NDE (VT, MT, UT – tylko dla spoin z pełnym przetopem).



Rys.3 Rozmieszczenie i mocowanie grzałek na zewnątrz konstrukcji w trakcie spawania kołnierzy podziałowych.

Badanie wizualne spoin (VT)

Jest to podstawowe i pierwsze co do kolejności badanie, wykonywane zawsze i dla każdej spoiny, niezależnie od jej wymiaru, klasy jakości czy spawanych gatunków materiałów. Metoda polega na bezpośrednim wykryciu i ocenie nieciągłości występujących na powierzchni spoin oraz weryfikacji geometrii, w połączeniu ze sprawdzeniem, czy ewentualne odchyłki od wymiarów nominalnych mieszczą się w zakresie dopuszczonym przez odpowiednią normę bądź specyfikację klienta. Wykorzystuje się tutaj bezpośrednio narząd wzroku specjalisty wspomagany prostą optyką (latarki, lupy, lusterka kontrolne) bądź bardziej złożoną (endoskopy, wideoendoskopy). Mimo, iż jest to metoda prosta do przeprowadzenia to wymaga od kontrolera dużej wiedzy i doświadczenia, które jest niezbędne w trakcie subiektywnej oceny podejrzanych obszarów [3], [7].

Badanie magnetyczno-proszkowe (MT)

Badania te stosuje się do wykrywania nieciągłości materiałów, wychodzące na powierzchnie elementu i

podpowierzchniowe. Ograniczeniem w badaniu jest możliwość prowadzenia badań wyłącznie na materiałach ferromagnetycznych, czyli wykazujących własne spontaniczne namagnesowanie bez widocznego uporządkowania tzw. domen magnetycznych – obszarów stałego namagnesowania – które następuje dopiero pod wpływem przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego i jest ono zawsze zgodne z kierunkiem oddziałującego pola. Dlatego opisywana metoda badań polega na wykorzystaniu wzbudzonego na danym odcinku spoiny pola magnetycznego a następnie napyleniu w ten obszar materiału reagującego na wywołane pole magnetyczne tzw. proszku magnetycznego. W przypadku wystąpienia wady następuje rozproszenie strumienia magnetycznego oraz zmiana układu proszku magnetycznego w tej okolicy. Wynik badania jest widoczny w postaci linii i punktów utworzonych przez zgromadzony na nieciągłości proszek. Najlepszą wykrywalność osiąga się w sytuacji, w której kierunek ułożenia wady jest prostopadły do kierunku sił pola magnetycznego. Metoda magnetyczno-proszkowa charakteryzuje się możliwością wykrywania wąskich i płytkich nieciągłości powierzchniowych, otwartych do powierzchni i podpowierzchniowych. Materiał badawczy występuje w formie barwnych lub fluorescencyjnych suchych proszków magnetycznych, zawiesin olejowych lub wodnych. Najczęściej przy wykorzystaniu proszków barwnych stosuje się biały podkład w celu zwiększenia kontrastu i ułatwienia badania danego obszaru a przy użyciu zawiesin fluorescencyjnych wymagane jest użycie lamp UV i zaciemnienia miejsca badania. Źródłami strumienia magnetycznego są jarzma. Dobór rodzaju systemu badania: sposobu magnesowania, detekcji pola magnetycznego i demagnetyzacji obiektów uzależniony jest od szeregu czynników takich jak rodzaj badanego elementu materiału, stan powierzchni i panujących warunków – głównie temperatury [3], [7].



Rys.4 Kierownice łopatek CVC2 i CVC3 w trakcie badania MT.



Rys.5 Obraz wady spawalniczej uzyskany w badaniu MT z wykorzystaniem proszku magnetycznego oraz MT w świetle UV z wykorzystaniem zawiesziny fluorescencyjnej [8], [11].

Badanie ultradźwiękowe (UT)

Polega ono na wprowadzeniu do badanego obiektu drgań mechanicznych wytworzonych przez głowicę ultradźwiękową (prostą lub skośną). Głowicę przykładają się do badanej powierzchni poprzez cienką warstwę wody, żelu lub oleju pełniącego rolę ośrodka sprzęgającego. Odbicia wiązki fal ultradźwiękowych od wewnętrznych nieciągłości materiału są uwidaczniane na ekranie defektoskopu w postaci tzw. "pików". Nowoczesne defektoskopy używane przez inspektorów Zakładu Mechanicznego pozwalają na precyzyjne

zlokalizowanie wady, jej odległości od powierzchni badanego materiału i czoła głowicy ultradźwiękowej. Jest to metoda badania objętościowego, co oznacza iż pozwala wykryć nieciągłości w głębi materiału spoiny i nie wychodzą na jej powierzchnię. O zastosowaniu tej metody informują odpowiednie wymagania zawarte w zamówieniu lub dokumentacji technologicznej dostarczonej przez klienta. Tego typu badania wykonywane są zazwyczaj na spoinach doczołowych z pełnym przetopem, łączących bardzo odpowiedzialnych elementy, takie jak uszy transportowe czy płaszcze, odpowiadające za szczelność konstrukcji. Badania ultradźwiękowe są najtrudniejszą metodą badań nieniszczących, dlatego wymagają od operatora dużej wiedzy i doświadczenia. Personel wykonujący badania nieniszczące musi posiadać kwalifikację odpowiedniego stopnia i we właściwym sektorze przemysłowym [3], [7].



Rys.6 Kierownice łopatek CVC2 oraz CVC3 po badaniach UT



Rys.7 Przykładowy obraz uzyskiwany na defektoskopie w trakcie badania UT [12].

Zbadane elementy poddano obróbce cieplnej po spawaniu, wyżarzając i wytrzymałując w temperaturze wymaganej dla danego gatunku materiału zgodnie z zaleceniami dostarczonych przez klienta specyfikacji materiałowych. Dodatkowy wpływ na temperaturę i czas wytrzymania miały różnice w grubości poszczególnych komponentów spawanych do siebie w danej konstrukcji.

Obróbka mechaniczna – nadanie ostatecznego kształtu.

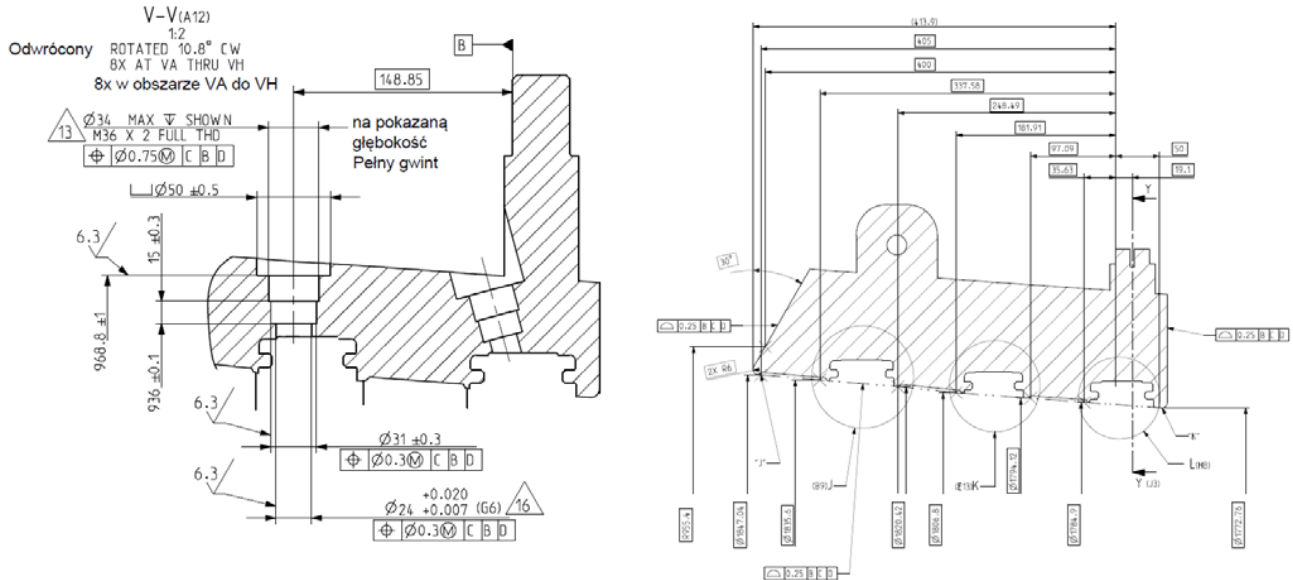
Obróbka wiórowa jest integralną częścią procesu wytwarzania konstrukcji stalowych, w której przedmiot obrabiany, w wyniku usuwania określonej objętości materiału tzw. naddatku przy pomocy ostrza odpowiedniego narzędzia uzyskuje wymagane kształty, wymiary oraz odpowiednią jakość powierzchni.

Ze względu na bardzo ciasne tolerancje i skomplikowane kształty rowków łopatek oraz kątowe ustawienie otworów wielostopniowych wymagające bardzo precyzyjnej obróbki, konieczne było zastosowanie obrabiarek ze sterowaniem numerycznym, wyposażonych w mikroprocesory, które można w dowolny sposób interaktywnie zaprogramować. Było to ekstremalnie trudne wyzwanie, w szczególności gdy na dostarczonej dokumentacji w wielu miejscach standardowa tolerancja wymiarowa, określona przez maksymalne odchyłki górną i dolną od wymiaru nominalnego została zastąpiona ogólną tolerancją położenia tolerowanego elementu – np. otworu względem bazy lub układu baz, zdefiniowanych przez wymiary teoretyczne, które zazwyczaj przedstawione zostały jako wartości nominalne ujęte w prostokątnych

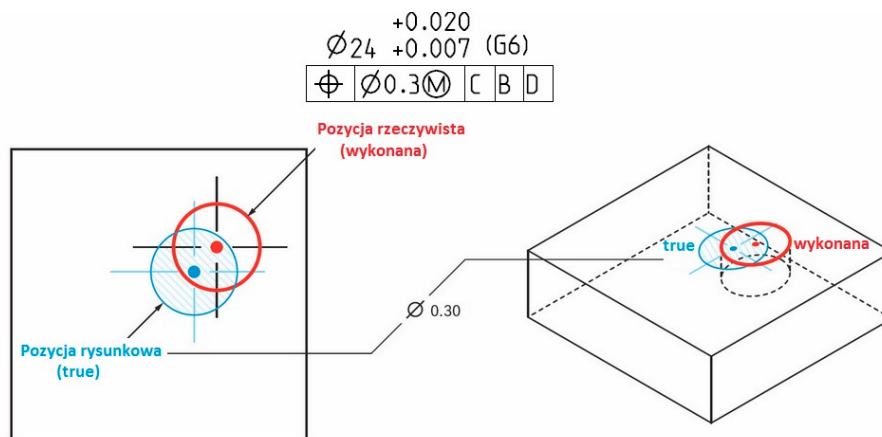
ramkach. Zastosowana metoda tolerancji jest opisana w amerykańskiej normie ASME Y14.5 pod pojęciem „true position” – inaczej idealna pozycja, która w praktyce określa maksymalną dopuszczalną odchyłkę pozycji elementu od określonej (true) na rysunku.

Zanim rozpoczęliśmy tak skomplikowaną obróbkę niezbędne okazało się zamodelowanie całości i przetworzenia na plan sterowania maszyn w programach typu CAD/CAM oraz wykonanie niezbędnych symulacji,

przed właściwym wykonaniem CNC. Dodatkowo operatorzy obrabiarek zostali wyposażeni w szereg specjalnie zaprojektowanych sprawdzianów przechodnych oraz nieprzechodnych, umożliwiających wstępną weryfikację wymiarową obrabianych elementów w procesach międzyoperacyjnych i porównania otrzymanych wyników z aktualnie wyświetlanymi na interfejsie graficznym sterowania maszyny.



Rys.8 Przykładowy fragment rysunku obróbczego w wydaniu oryginalnym.

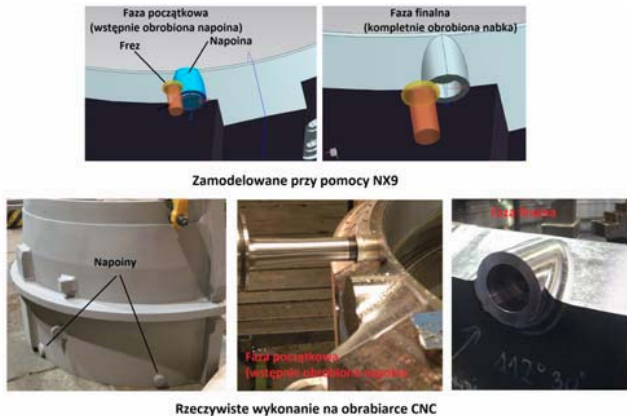


Rys.9 Przykład wyznaczania „True Position” położenia wykonanego otworu.



Rys.10 Sprawdziany Go/No-Go (przechodnie i nieprzechodnie) oraz przykład pomiaru czujnikiem zegarowym.

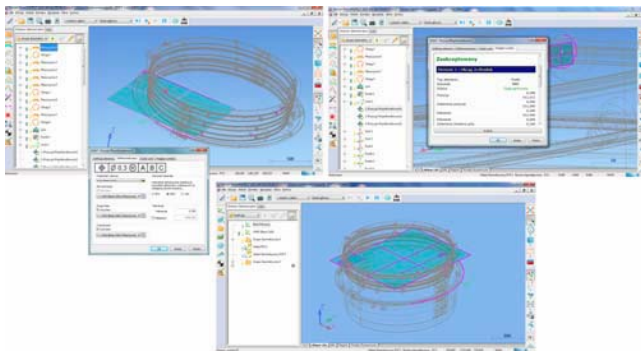
Niezwykle trudnym zadaniem, praktycznie niemożliwym do wykonania bez użycia zaawansowanych programów CAD/CAM – w naszym przypadku NX 9 firmy Siemens – była obróbka uprzednio napawanych nabek walcowych, które dodatkowo zostały umieszczone na powierzchni stożkowej obu komponentów. Po uprzednim zamodelowaniu i przeprowadzeniu symulacji obróbki, za pomocą postprocesora wygenerowano program ISO, który został bezpośrednio użyty na maszynie.



Rys.11 Przykład symulacji w programie CAD/CAM oraz wykonania na rzeczywistym obiekcie.

Kontrola wymiarowa po obróbce – ramię FARO

Przy tego typu skomplikowanych elementach do wykonania pomiarów kontrolnych oraz odbiorowych niezbędne stało się zastosowanie nowoczesnych metod pomiarowych, do których niewątpliwie należy pomiar z wykorzystaniem ramienia pomiarowego FARO lub zestawu NDI, producenta zaawansowanych urządzeń pomiarowych, którego rozwiązania w dziedzinie metrologii współrzędnościowej są wykorzystywane między innymi w Audi, BMW, Airbus oraz NASA [15]. Sprawdzenie poprawności wykonania zweryfikowano w programie PowerInspect, w którym wzorcem był model CAD 3D. Pomiar kontrolny w trakcie obróbki zostały wykonane na obrabiarce, a końcowe na stanowisku pomiarowym.



Rys. 12 Interfejs graficzny oprogramowania PowerInspect z wczytanym modelem 3D.

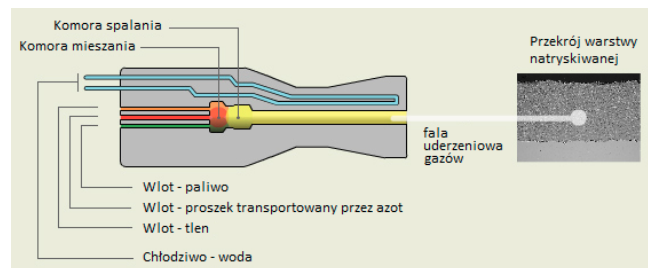


Rys. 13 Pomiar kontrolny CVC3 z wykorzystaniem przenośnego trakera optycznego firmy NDI.

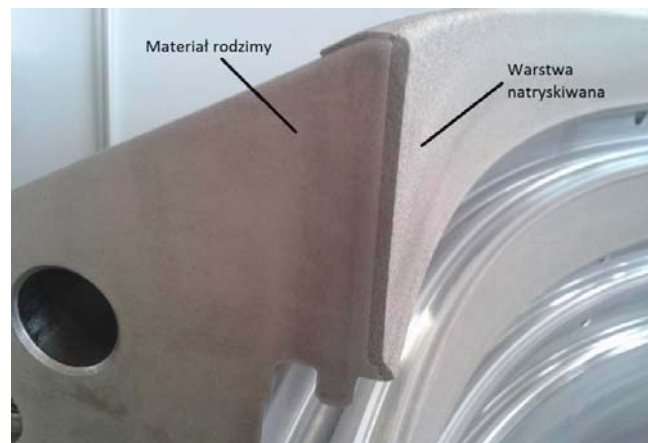
Zaletą pomiarów było natychmiastowe uzyskanie wyników, bez dodatkowego nakładu pracy, a program PowerInspect umożliwił wygenerowanie raportów z wykonanych pomiarów w sposób automatyczny.

Natryskiwanie naddźwiękowe HVOF

Zgodnie z wymaganiami dostarczonymi przez klienta przestrzenie pomiędzy rowkami pod łopatki powinny zostać pokryte powłoką uszczelniająco-ochronną. Jest to bardzo zaawansowana metoda natryskiwania płomieniowego, w której źródłem ciepła jest spalanie mieszanki naftowotlenowej (płynnego paliwa). Materiał powłokowy, w postaci proszku jest dostarczany pneumatycznie silnie sprężonym azotem poprzez specjalny podajnik. Mieszanka tlenu i paliwa wytwarza wysokie ciśnienie w komorze spalania, które formuje falę uderzeniową. Eksplodujące, wewnątrz fali uderzeniowej, gazy powodują nadtopienie proszku i transportują go z naddźwiękową prędkością (do 800 m/s = 2880 km/h) i bardzo dużą energią kinetyczną na podłoże, na którym tworzy się powłoka. Natryskiwane cząstki przebywają bardzo krótko w obszarze spalania nie osiągając zbyt wysokiej temperatury. A olbrzymia energia kinetyczna jest potrzebna do utworzenia na powierzchni natryskwanego detalu powłoki o odpowiednich parametrach. W metodzie tej ograniczono znacząco niekorzystne działanie ciepła na powierzchnię natryskwanego detalu, dzięki czemu można ją stosować do nakładania powłok na materiały wrażliwe na wyższe temperatury. Aby zapewnić stabilne warunki procesu, cały palnik jest chłodzony w płaszczu wodnym [13], [14].



Rys. 14 Schemat naddźwiękowego natryskiwania HVOF (High Velocity Oxy – Fuel) [9].



Rys.15 Zdjęcie warstwy natryskwanej na przykładzie kierownicy CVC3.

Usługę natryskiwania wykonała zakwalifikowana firma zewnętrzna, a odbiór końcowy wraz z zatwierdzeniem wszystkich atestów został przeprowadzony przy współudziale przedstawicieli klienta.

Ostatnim etapem pozostała już tylko obróbka warstwy natryskwanej, choć z pozoru prosta do wykonania należało

podejść do niej z najwyższą starannością i dbałością o bezpieczeństwo pracowników. Ze względu na własności warstwy natryskiwanej proces obróbki musiał zostać przeprowadzony na sucho, a co za tym idzie z dużą ilością pyłów i oparów powstających w jego trakcie. Wspomniane opary wykazują toksyczne działanie na organizmy żywe i niezwykle łatwo przedostają się przez drogi oddechowe, co stwarza poważne zagrożenie zdrowia w następstwie długotrwałego narażenia. Dlatego po uprzednim zapoznaniu pracowników z zagrożeniami zostali oni wyposażeni w odpowiednio dobrany sprzęt ochrony osobistej i wskaźniki kontroli zapylenia, a specjalnie zaprojektowane odciążki, zainstalowane na stanowiskach obróbczych bezpośrednio przy maszynie zostały dodatkowo przetestowane podczas obróbki testowej na sprawność przez firmę zewnętrzną, przy użyciu atestowanych czujników stężenia zapylenia.

Podsumowanie

Pomyślnie zakończenie produkcji i dostawy pierwszego kompletu kierownic łopatek stacjonarnych kompresora CVC2 oraz CVC3 jeszcze w większym stopniu umocniło pozycję Zakładu Mechanicznego na arenie międzynarodowej, jako rzetelnego partnera biznesowego, nie wahającego się wykorzystywać najnowszych zdobyczy techniki w celu maksymalnego zaspokojenia dynamicznie zmieniających się potrzeb rynku oraz przede wszystkim producenta, dostarczającego produkty o bardzo wysokiej jakości, w którego szeregach zatrudnienie znajdują wysokiej klasy specjaliści. Jest to atut niezwykle ważny w dobie wszechobecnej tendencji do redukcji kosztów w przypadku konkurencji z firmami, pochodzącymi z krajów o

mniej stopniu rozwoju i kultury technicznej lecz dużo niższych kosztach produkcji.

LITERATURA

- [1] Poradnik inżyniera. Spawalnictwo. Tom 1. Praca zbiorowa pod red. J.Pilarczyka Wydawnictwo Naukowo Techniczne WNT. ISBN: 978-83-204-3479-8
- [2] Poradnik inżyniera. Spawalnictwo. Tom 2. Praca zbiorowa pod red. J.Pilarczyka Wydawnictwo Naukowo Techniczne WNT. ISBN: 978-83-204-3564-1
- [3] Czuchry J., Stachurski M.: Badania nieniszczące w spawalnictwie. Gliwice, Instytut Spawalnictwa 2005. ISBN 93-906852-7-2
- [4] Ferenc K. Ferenc J.: Konstrukcje spawane – Projektowanie połączeń Wydawnictwo Naukowo Techniczne WNT. ISBN: 978-83-204-3479-8
- [5] Ferenc K., Nita Z., Sobiś T.: Spawalnictwo Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999
- [6] Klimpel A.: Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali. Technologie. Wydawnictwo Naukowo Techniczne WNT – 1999
- [7] http://www.zspaw.zut.edu.pl/lab_pliki/Instrukcja_Badania_nieniszczace_zlaczy_spawanych_MiBM_N2.pdf
- [8] <http://www.serwnaft.pl/defektoskopia.html>
- [9] <http://www.tstcoatings.com/HVOF.html>
- [10] <http://www.energy.siemens.com/hq/en/fossil-powergeneration/gas-turbines/sgt6-5000f.htm>
- [11] http://www.advanced-ndt.co.uk/uv_applications.htm
- [12] <http://www.muehsam.pl>
- [13] <http://natryskicieplne.pl/technologie/natrysk-o-duzejpredkosci-hvof/>
- [14] <http://www.sulzer.com>
- [15] http://www.oberon3d.pl/tl_files/artykuly/mechanik/4-14.pdf

Autorzy: mgr inż. Zbigniew Machnik, EthosEnergy Poland S. A., ul. Powstańców Śląskich 85, 42-701 Lubliniec, E-mail: zbigniew.machnik@turbocare.pl.