

Andrzej PACANA, Karolina CZERWIŃSKA
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
app@prz.edu.pl, ktczerwinska@vp.pl

WSPOMAGANIE BADAŃ RADIOGRAFICZNYCH TŁOKA Z WYKORZYSTANIEM NARZĘDZI ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ

Streszczenie. Celem artykułu była analiza i propozycja rozszerzenia postępowania w badaniach radiograficznych. Badania te są często stosowane również i w przemyśle motoryzacyjnym. Wykorzystywane są m.in. do kontroli jakości tłoków silników wysokoprężnych stosowanych w samochodach osobowych, produkowanych w jednym z podkarpackich zakładów przemysłowych. W artykule przeprowadzono badania wybranego modelu tłoka do samochodu Toyota. Przedstawiono wyniki tych badań, zglądy metalograficzne z obszarów występowania nieciągłości, a także wnioski z tych analiz. Na tej podstawie zaproponowano rozszerzenie sposobu postępowania przy ocenie jakości badanych tłoków o wprowadzenie niestosowanych dotychczas narzędzi: wykresu Pareto-Lorenza i diagramu Ishikawy. Okazało się, że duży wpływ na jakość analizowanych tłoków mają nie tylko zanieczyszczenie aluminium, ale również resztki masy formierskiej w kokili.

Słowa kluczowe: badania radiograficzne, badania penetracyjne, diagram Pareto-Lorenza, diagram Ishikawy

A SUPPORTING RADIOGRAPHIC TESTS WITH THE USE OF THE QUALITY MANAGEMENT TOOL

Abstract. The aim of the study was to analyze and propose extending the procedure in radiographic studies. These studies are often used also in the automotive industry. Are used, among others for quality control of diesel engines used in passenger cars, produced in one of the industrial plants in Podkarpacie. The study carried out research on a selected piston model for a Toyota car. The results of these tests, metallographic data from the areas of occurrence of discontinuities as well as the conclusions drawn from them are presented. On this basis, it was proposed to extend the procedure for assessing the quality of the pistons under review to introduce the previously used tools: Pareto-Lorenz chart and Ishikawa diagram. It turned out that not only the contamination of aluminum, but also the leftovers of the molding sand in the mold, have a big impact on the quality of the pistons analyzed.

Keywords: radiographic examinations, penetrant tests, Pareto-Lorenz diagram, Ishikawa diagram

1. Wprowadzenie

Stały rozwój techniki prowadzi do nieustannego zwiększania obciążeń wykorzystywanych urządzeń i maszyn, co skutkuje wzrostem wymogów wobec materiałów konstrukcyjnych. Rozwój ten ma wpływ na nowe technologie wytwarzania metali i stopów mających wyższe własności wytrzymałościowe¹.

Ostatnie dziesięciolecia wpłynęły na intensywny wzrost zastosowania badań diagnostycznych zarówno mechanicznych, jak i elektrycznych elementów maszyn. Z tego względu nastąpił dynamiczny rozwój metod pozwalających na pozyskiwanie informacji z badań diagnostycznych, mających na celu ocenę stanu technicznego urządzenia, a także umożliwienia, na podstawie zgromadzonych informacji, podejmowania działań dla zwiększenia jego niezawodności, trwałości, a tam samym efektywności działania².

W eksploatacji maszyn oraz urządzeń elementem, który bezpośrednio wpływa na rozkwit diagnostyki jest odpowiedzialność za realizowaną funkcję. Mowa tutaj o maksymalnym zapewnieniu bezpieczeństwa na stanowisku roboczym osobom z obsługi, a także o bezawaryjnej pracy układów napędowych, które niejako stanowią elementy składowe, bardzo często, dużych ciągów produkcyjnych. Wystąpienie awarii co najmniej jednego z elementów składowych znacznie wydłuża czas produkcji, powoduje również powiększenie kosztów. W układach, gdzie wymagany jest duży poziom niezawodności użytkowania, techniczna diagnostyka zaczyna być dostrzegana jako niezastąpiony środek zapobiegawczy dla pojawiających się problemów³.

Zapewnienie wysokiej jakości produkcji warunkuje konieczność całkowitego eliminowania elementów, w których występują nieciągłości powierzchniowe oraz podpowierzchniowe⁴. Skutecznym sposobem wykrywania defektów oraz niedoskonałości w materiałach konstrukcyjnych bądź w gotowym wyrobie tudzież niedopuszczenia go do użytkowania może być wykorzystywanie w systemach kontroli jakości produkcji różnych metod badań nieniszczących. Stanowią one zespół metod umożliwiających określenie stanu fizycznego, a więc jakości badanych obiektów bez powodowania zmian ich własności użytkowych. Jedną

¹ Weroński A.: Zmęczenie cieplne metali. „Przegląd Mechaniczny”, nr 3, 1983.

² Zbrowski A., Giesko T.: Automatyzacja kontroli jakości wyrobów w linii technologicznej wytwarzania wałeczków łożysk tocznych. „Technologia i Automatyzacja Montażu”, nr 2, 2008.

³ Ziętek P.: Metody badań nieniszczących wybranych elementów konstrukcji turbozespołu małej mocy. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, z. 3. Politechnika Śląska, Gliwice 2016.

⁴ Opdecamp J.: Computed Radiography. Products and Applications. International Workshop Imaging NDT, Chennai, 25-28 April 2007; Giesko T., Mazurkiewicz A., Zbrowski A.: Advanced mechatronic system for in-line automated optical inspection of metal parts. 2nd International Conference on Control Instrumentation And Mechatronic Engineering CIM 2009, Melaka, Malaysia, 2-3 June 2009.

z odmian podpowierzchniowych badań nieniszczących, w szczególności sposób kwalifikujący się do kontroli zarówno w procesie wytwarzania, jak i w trakcie eksploatacji, są badania radiograficzne. Kontrola jakości tłoków do silników diesla przeznaczonych do pojazdów osobowych z wykorzystaniem metody radiograficznej jest wdrażana na wielu etapach produkcji. Dodatkowo w kontroli jakości tłoków wykorzystywana jest również powierzchniowa metoda badań nieniszczących – metoda badań penetracyjnych. Ta prosta i szybka metoda pozwala wykryć nieciągłości powierzchniowe o szerokościach od 10^{-6} m, takie jak pęknięcia szlifierskie, pęknięcia zmęczeniowe, rozwarstwienia, porowatości, wżery czy równego rodzaju pęknięcia.

2. Zastosowanie badań radiograficznych

Badania radiograficzne mogą być stosowane w defektoskopii różnorodnych obiektów z niemalże wszelkich materiałów. Umożliwiają wykrycie nieciągłości o głębokości (wysokości) od około 0,5% grubości badanego materiału, w kierunku, w którym rozchodzi się promieniowanie, oraz nieciągłości o szerokości rozwarcia od około 0,1 mm⁵.

Stosowanie badań radiograficznych wymaga dwustronnego dostępu do badanego obiektu. Z jednej strony umieszczone jest źródło promieniowania (lampy rentgenowskie bądź aparaty gamma graficzne), zaś z drugiej strony badanego obiektu umieszczony jest detektor promieniowania. Detektorami w badaniach radiograficznych są błony radiograficzne. Natężenie promieniowania (na płaszczyźnie po drugiej stronie badanego obiektu) w płaszczyźnie detektora jest odwzorowywane jako tzw. obraz radiograficznego materiału badanego obiektu na detektorze⁶.

Zgodnie z geometrycznym punktem widzenia obraz radiograficzny badanego obiektu jest rezultatem projekcji obiektu ku płaszczyźnie detektora promieniowania. Radiogramy przedstawiają cieniowe, dwuwymiarowe obrazy nieciągłości trójwymiarowych. Obrazy te ukazują kształt nieciągłości oraz ich wymiary w płaszczyźnie będącej prostopadłą do kierunku, w którym rozchodzi się promieniowanie. Zaczernienie błon radiograficznych zależy od natężenia promieniowania przechodzącego przez badany obiekt, w tym od⁷:

- grubości badanego obiektu,
- rodzaju występujących nieciągłości,
- własności osłabiania promieniowania jonizującego,
- dystansu między płaszczyzną detektora a badanym obiektem.

⁵ Brzeszczak K., Jezierski G.: Metody radiologiczne. Terminologia. Agencja Reklamowo-Wydawnicza INSERAT, Opole 1999.

⁶ Lewińska-Romicka A.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. WNT, Warszawa 2001.

⁷ Brzeszczak K., Jezierski G.: op.cit.; Kielczyk J.: Radiografia przemysłowa. Wydawnictwo Gamma, Warszawa 2006.

Metodą radiograficzną dobrze wykrywane są nieciągłości przestrzenne materiałów różnych obiektów; przykładem mogą być połączenia spawane oraz odlewy. Przy wykrywaniu nieciągłości tą metodą ważny jest kierunek napromieniowania obiektów. Nieciągłości płaskie, tj. pęknięcia usytuowane wzdłuż kierunku, w którym rozchodzi się promieniowanie są dobrze wykrywalne. Nieciągłości płaskie natomiast, usytuowane prostopadłe do kierunku rozchodzenia się promieniowania, nie zawsze zostają wykryte. Położenie nieciągłości, w badanym obiekcie, wzdłuż kierunku, w którym rozchodzi się promieniowanie, określone może być przy wykonaniu napromieniowań obiektu z różnych kierunków, przy zmiennych położeniach źródła w stosunku do obiektu, tj. przy zmianach ułożenia źródła promieniowania względem obiektu bądź też zmianach ułożenia obiektu względem źródła⁸.

Wymiary charakterystyczne dla wykrytych nieciągłości (szerokość i długość) określane są przez bezpośredni pomiar na radiogramach, np. przy użyciu miarki milimetrowej bądź lupki z integralną skalą. W przypadku gdy wymiarem charakterystycznym wykrytej nieciągłości jest jej wysokość, wtedy jest ona określona na podstawie gęstości optycznej radiogramów w miejscu obrazu wykrytej nieciągłości, a następnie jest zestawiana z gęstością optyczną obrazu materiału we fragmencie pozbawionym nieciągłości. Wskazany jest pomiar zaciemnienia radiogramów w rozpatrywanych obszarach, który wykonuje się za pomocą densytometrów⁹.

Radiogram zarejestrowany na błonie radiograficznej może być poddany digitalizacji przy użyciu skanera laserowego. Radiogramy zarejestrowane na błonach radiograficznych, tzw. surowe, już w cyfrowej postaci można poddać różnym zabiegom przetwarzania obrazu, np. redukcji szumów czy poprawy kontrastu¹⁰.

Alternatywą dla klasycznej radiografii przemysłowej, w której rejestracja obrazów obiektów odbywa się na błonach radiograficznych, jest stosowanie radiografii komputerowej z zastosowaniem luminoforowych płyt obrazowych bądź radiografii bezpośredniej, gdzie stosowane są detektory typu płaski panel¹¹.

Do podstawowych zalet badań radiograficznych należy możliwość kontroli obiektów mających różnorodne kształty, o dowolnej geometrii, od małych i cienkich do stosunkowo dużych i grubych obiektów. Kontrola tego typu obiektów za pomocą innych badań nieniszczących jest utrudniona lub nawet niemożliwa. Istotną zaletą jest również możliwość automatyzacji procesu badań, dokumentowania wyników i analizy badań – z zastosowaniem radioskopii czasu rzeczywistego. Dodatkowo dzięki tej metodzie możliwa jest ocena wysokości nieciągłości w płaszczyźnie będącej równoległą do kierunku rozchodzenia się promieniowania. Metoda radiologiczna cechuje się dużą, w porównaniu z pozostałymi metodami badań,

⁸ Kielczyk J.: op.cit.

⁹ Ibidem.

¹⁰ Opdecamp J.: Computed Radiography. Products and Applications. International Workshop Imaging NDT, Chennai, 25-28 April 2007.

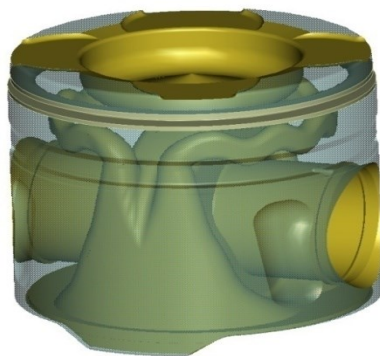
¹¹ Józwiak B., Morawski T.: Aktualne możliwości zastosowania przemysłowej radiografii komputerowej. „Badania Nieniszczące”, nr 3, 2006.

możliwością wykrywania nieciągłości objętościowych. Udogodnieniem przy przeprowadzaniu badań rentgenowskich jest fakt, że nie jest konieczne zapewnienie „kontaktu” aparatury badawczej z badanymi obiektami¹².

Ograniczeniem badania RTG jest natomiast konieczność „podejścia” z aparaturą badawczą do obiektu oraz umieszczenie błony radiograficznej pod badanym obiektem. Nie bez znaczenia jest też ograniczenie dotyczące stosunkowo słabej wykrywalność nieciągłości płaskich usytuowanych prostopadle do kierunku, w którym rozchodzi się promieniowanie czy też trudności w interpretacji wyników kontroli obiektów mających nieregularne kształty, o zmieniającej się grubości. Z reguły duże wymiary i masa aparatów rentgenowskich stanowi kolejne utrudnienie przy przeprowadzaniu badań tą metodą. Istotny jest również fakt, iż promieniowanie jest szkodliwe dla zdrowia ludzkiego. Z tego względu wymagane jest przestrzeganie przepisów ochrony radiologicznej odnoszących się do samych badań, transportu i przechowywania aparatury czy też składowania materiałów radioaktywnych. Na ogół również wyższe są koszty dotyczące prowadzenia badań rentgenowskich, w porównaniu z innymi metodami badań nieniszczących¹³.

3. Metodyka badań radiograficznych

Przedmiotem prezentowanych badań nieniszczących był tłok stosowany w silnikach wysokoprężnych samochodów osobowych, firmy Toyota. Na rys. 1 przedstawiono model 3D tłoka silnika wysokoprężnego.



Rys. 1. Przedmiot badań – model 3D tłoka silnika wysokoprężnego

Źródło: Opracowanie własne na podstawie dokumentacji produkcyjnej Federal Mogul; materiały niepublikowane. Gorzyce.

¹² Lewińska-Romicka A.: op.cit.

¹³ Ibidem.

W przedsiębiorstwie, w którym dokonano pomiarów badania radiograficzne stosowane są do kontroli jakości całego tłoka. Kontroli radiograficznej podlega 100% dostarczonych do badania odlewów.

W badaniach radiograficznych stosowano urządzenie BOSELLO HIGH TECHNOLOGY INDUSTRIAL X-RAY (rys. 2a). Tłoki badane w cyklu produkcyjnym przemieszczają się za pomocą taśmy do komory pozycjonującej, gdzie następuje ich stabilne ustawienie na manipulatorze, a następnie przez ruch obrotowy przemieszczane są do komory roboczej, gdzie odbywa się prześwietlenie wyrobu. Tłok zostaje ustawiony w taki sposób, aby kontrolowana płaszczyzna była możliwie jak najbliżej wzmacniacza obrazu.

Długość cyklu badawczego promieniowaniem RTG wynosi średnio jedną minutę. Detale zgodne z wymaganiami trafiają do jednej szuflady, a następnie są transportowane do dalszej obróbki. Detale niezgodne odkładane są poza taśmociąg do specjalnych pojemników na braki, dodatkowo oznaczane jest miejsce występowania nieciągłości.

Przedstawiona maszyna pracując w trybie produkcyjnym automatycznie wyłapując nieciągłości badanych elementów, eliminując tym samym detale z dalszej produkcji. Na pulpicie sterowniczym ukazuje się krótki komunikat informujący o zgodności kontrolowanego detalu (rys. 2b).

a)



b)

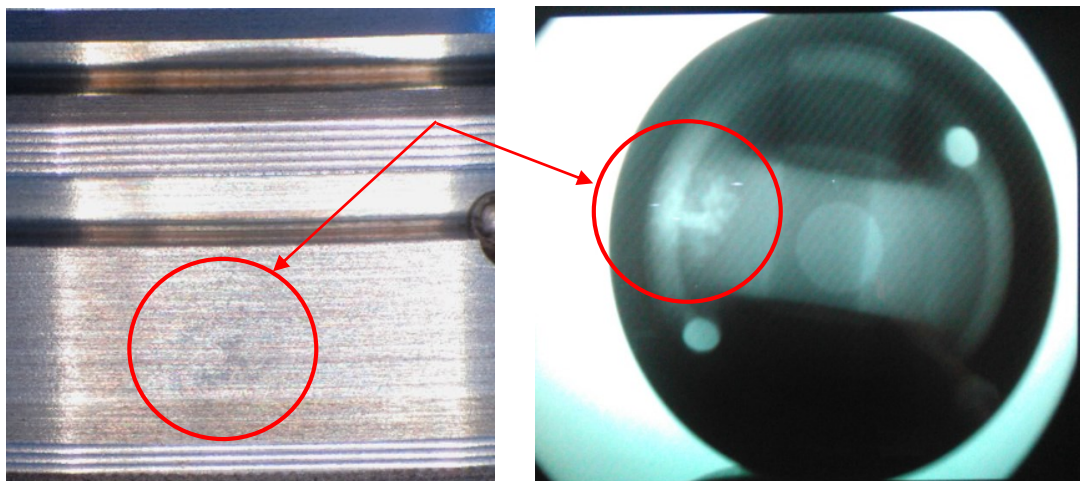


Rys. 1. Stanowisko do badań penetracyjnych: a) widok ogólny, b) widok panelu sterującego w trybie produkcyjnym aparatu do badań radiograficznych BOSELLO HIGH TECHNOLOGY INDUSTRIAL X-RAY

Źródło: Opracowanie własne na podstawie dokumentacji produkcyjnej Federal Mogul; materiały niepublikowane. Gorzyce.

4. Wyniki badań radiograficznych i wnioski ogólne

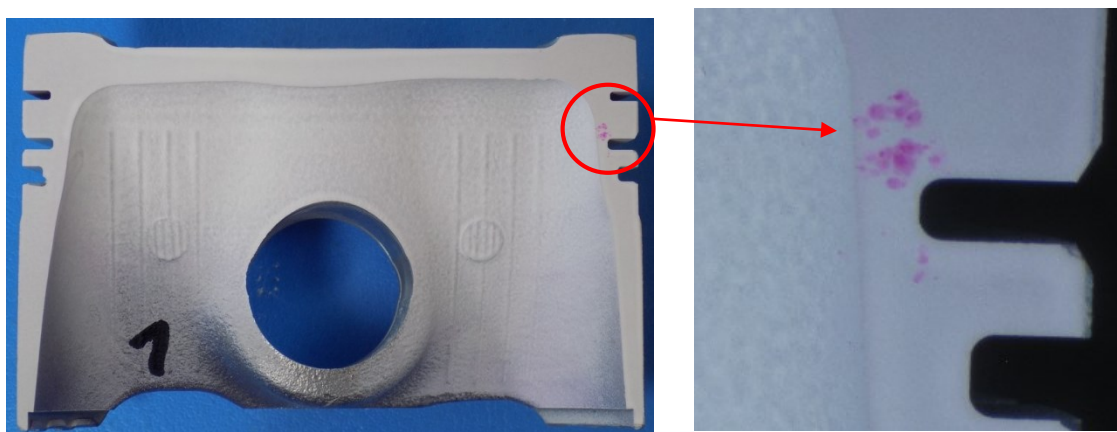
Wyniki przeprowadzonych badań radiograficznych przedstawiono na rys. 3. Uzyskane rezultaty wskazują na występowanie nieciągłości na płaszczu tłoków w strefie kanałków. Jest to nieciągłość typu porowatość.



Rys. 3. Wyniki badań radiograficznych tłoka silnika wysokoprężnego

Źródło: Opracowanie własne na podstawie dokumentacji produkcyjnej Federal Mogul; materiały niepublikowane. Gorzyce.

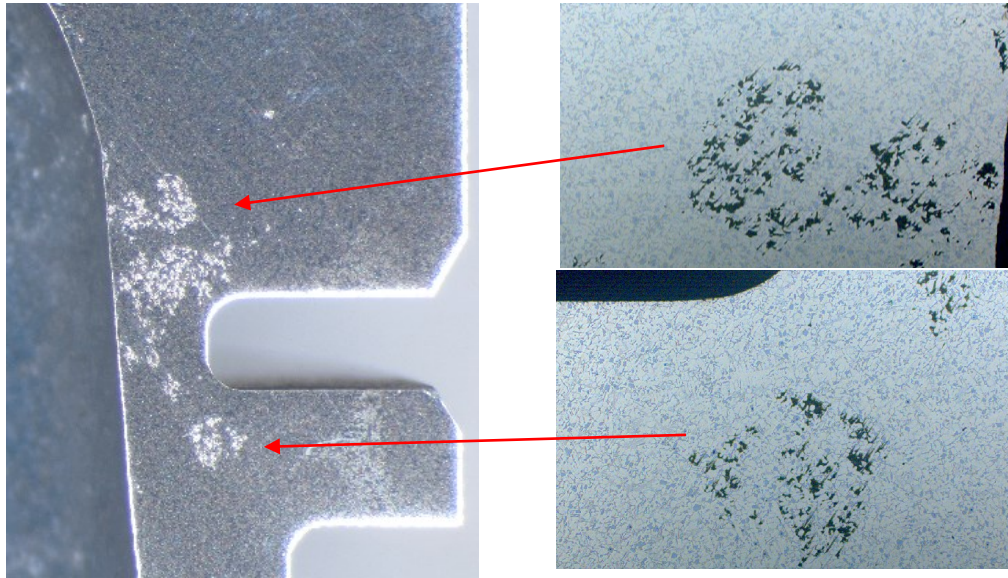
Dla weryfikacji wyników badań radiograficznych tłok został przecięty i wykonano badania penetracyjne. Wyniki badań penetracyjnych potwierdziły występowanie nieciągłości w płaszczu tłoka (rys. 4).



Rys. 4. Wyniki badań penetracyjnych potwierdzające występowanie nieciągłości w płaszczu tłoka

Źródło: Opracowanie własne na podstawie dokumentacji produkcyjnej Federal Mogul; materiały niepublikowane. Gorzyce.

Porowatość występująca w płaszczu tłoka jest wadą odlewniczą i ma postać rzadzinny. Potwierdzają to wyniki badań metalograficznych (rys. 5).



Rys. 5. Makro- i mikrostruktura materiału tłoka w obszarze występowania nieciągłości

Źródło: Opracowanie własne na podstawie dokumentacji produkcyjnej Federal Mogul; materiały niepublikowane. Gorzyce.

W przedsiębiorstwie, w którym przeprowadzano analizę sposobu oceny jakości tłoków informacje z kontroli służyły alternatywnej klasyfikacji tłoków na: dobre, złe. Ze względu na niewielką ilość wyrobów niezgodnych, a w zasadzie braków nie prowadzono dotychczas bardziej wnikliwej analizy przyczyn powstawania tych niezgodności. Jednak w ramach doskonalenia celowe wydaje się wprowadzenie takich działań.

5. Propozycja doskonalenia sposobu oceny jakości tłoka

W przedsiębiorstwie, w którym przeprowadzane były badania radiograficzne oraz penetracyjne tłoka do silnika wysokoprężnego nie są stosowane narzędzia zarządzania jakością w celu poszukiwania źródeł niezgodności, a docelowo zmniejszenia ilości występowania wyrobów niezgodnych lub ich całkowitej eliminacji. Dlatego zaproponowano przeprowadzenie analizy wadliwości wyrobu.

Pierwszym zaproponowanym instrumentem do analizy wadliwości wyrobu była analiza Pareto-Lorenza mająca na celu zidentyfikowanie najistotniejszych niezgodności z punktu widzenia liczby ich występowania.

W tabeli 1 przedstawiono rodzaje oraz liczbę wszystkich niezgodności wyrobu w skali roku. Dane wejściowe do przeprowadzenia analizy Pareto-Lorenza uporządkowano w sposób malejący, obliczono również udział procentowy i skumulowane udziały procentowe, dzięki czemu możliwe jest zidentyfikowanie niewielkiej liczby niezgodności, które w sposób znaczący wpływają na liczbę niezgodnych wyrobów.

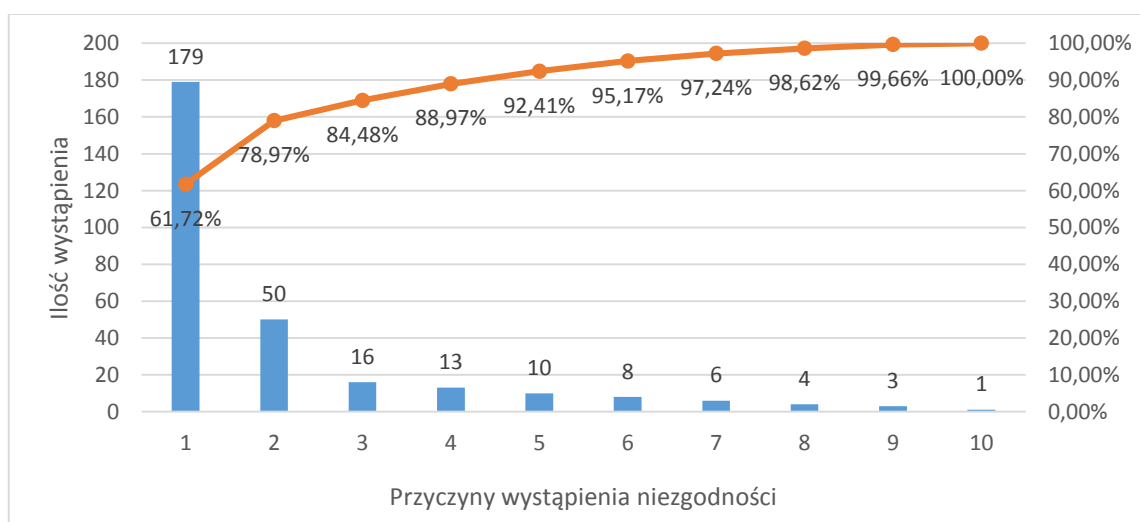
Tabela 1

Rodzaje oraz liczba niezgodności tłoka do silnika wysokoprężnego w skali roku

Numer niezgodności	Liczba niezgodności	Udział procentowy	Wartość skumulowana	Opis niezgodności
1	179	61,72%	61,72%	zanieczyszczenie aluminium
2	50	17,24%	78,97%	resztki masy formierskiej w kokili
3	16	5,52%	84,48%	nieodpowiednia temperatura chłodzenia
4	13	4,48%	88,97%	nieodpowiednio dobrane ilości dodatków stopowych
5	10	3,45%	92,41%	uszkodzenie sit filtracyjnych w kadzi lub systemie przelewowym
6	8	2,76%	95,17%	zbyt szybkie tempo zalewania formy
7	6	2,07%	97,24%	uszkodzone rury wlewowe
8	4	1,38%	98,62%	nie równomierne chłodzenie kokili
9	3	1,03%	99,66%	zbyt wolne tempo zalewania formy
10	1	0,34%	100%	przegrzanie materiały po krystalizacji
Suma	291			

Źródło: Opracowanie własne na podstawie dokumentacji produkcyjnej Federal Mogul; materiały niepublikowane. Gorzyce.

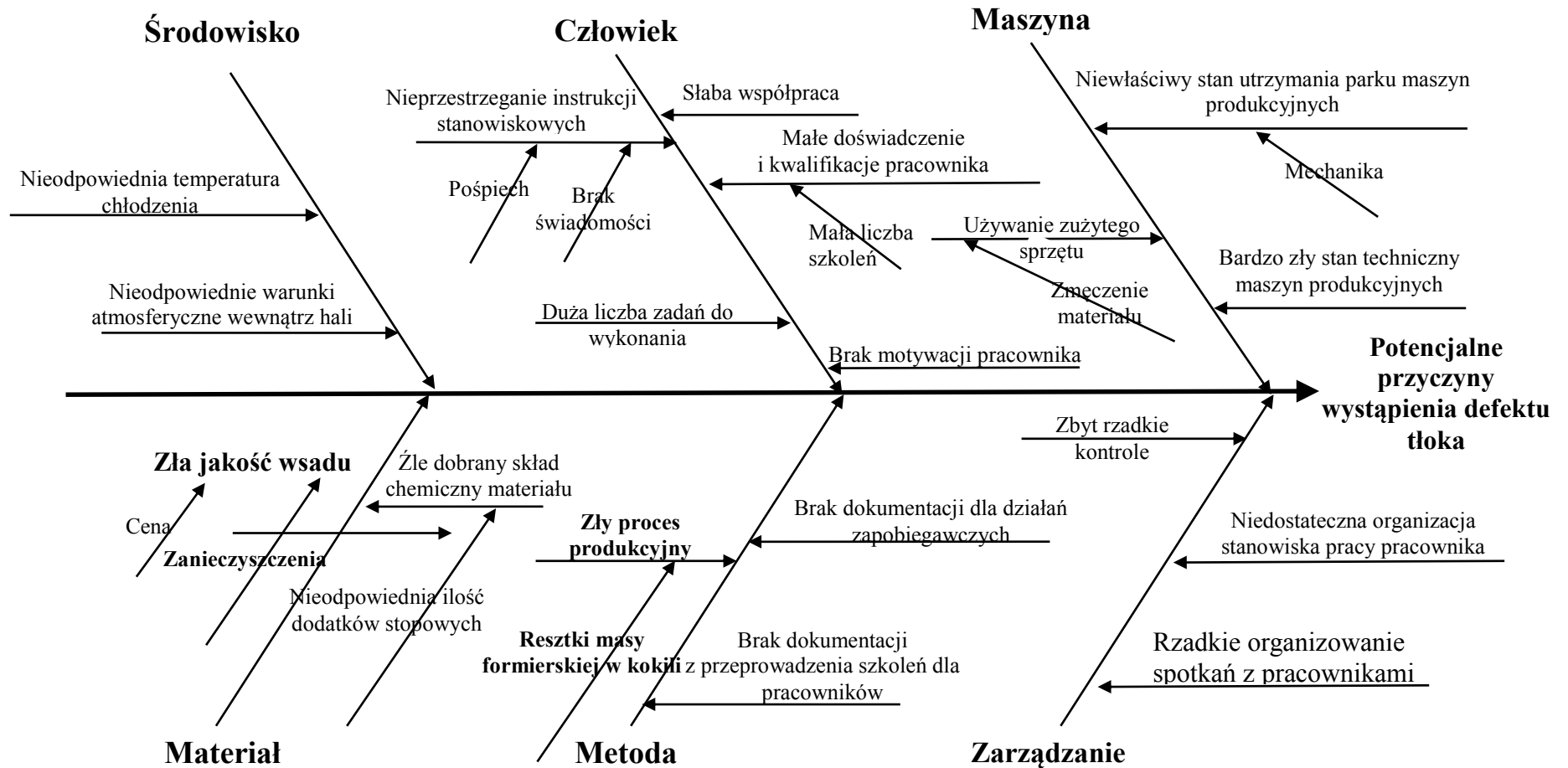
Na podstawie określonych oraz odpowiednio uszeregowanych niezgodności (tab. 1), wykonano diagram Pareto-Lorenza, który przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Diagram Pareto-Lorenza dla niezgodności występujących w tłoku do silnika wysokoprężnego
Źródło: Opracowanie własne na podstawie dokumentacji produkcyjnej Federal Mogul; materiały niepublikowane. Gorzyce.

Z rys. 6 wynika, że za 78,97% niezgodności występujących w czasie procesu odlewania tłoka odpowiadają 2 rodzaje niezgodności: zanieczyszczenie aluminium oraz resztki masy formierskiej w kokili. Najpierw należy wyeliminować pierwszą przyczynę niezgodności, gdyż stanowi ona aż ponad połowę wszystkich stwierdzonych niezgodności.

Drugim etapem analizy wadliwości wyrobu jest analiza przyczyn występowania niezgodności za pomocą diagramu Ishikawy. Na rys. 7 przedstawiono czynniki mające wpływ na powstanie najważniejszych dla przedsiębiorstwa niezgodności tłoków do silników wysokoprężnych.



Rys. 7. Diagram Ishikawy przyczyn wpływających na powstanie niezgodności tłoków do silników wysokoprężnych
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie dokumentacji produkcyjnej Federal Mogul; materiały niepublikowane. Gorzyce.

Wśród czynników wpływających na powstawanie niezgodności w omawianym tłoku wyróżniono *material*, w tej grupie największe znaczenie miała zła jakość wsadu (zanieczyszczenia). W grupie *metoda* najważniejszym czynnikiem jest zły proces produkcyjny – obecność resztek masy formierskiej w kokili.

6. Podsumowanie

Metody badań nieniszczących nieustannie są rozwijane w wyniku czego znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu. Szerokie zastosowanie tego rodzaju badań wynika zarówno z potrzeby utrzymania bezpieczeństwa, diagnozowania maszyn, jak i niezawodności czy też gotowości technicznej na wymaganym poziomie¹⁴.

W artykule dokonano analizy badań radiograficznych używanych w przemyśle motoryzacyjnym, na przykładzie kontroli jakości tłoka stosowanego w silnikach wysokoprężnych i potwierdzono ich przydatność. Uzyskane wyniki badań nieniszczących zostały potwierdzone wynikami badań penetracyjnych oraz metalograficznych.

Wykryte nieciągłości zlokalizowane były na płaszczu tłoków w strefie kanałków; są to wady odlewnicze typu porowatość skurczowa (jamy skurczowe i rzadziny). Obecność tych nieciągłości dyskwalifikuje tłok. W związku z tym przeprowadzono analizę wadliwości wyrobu – analiza Pareto-Lorenza mająca na celu zidentyfikowanie najistotniejszych niezgodności z punktu widzenia liczby ich występowania oraz analizę przyczyn występowania niezgodności za pomocą diagramu Ishikawy. W celu eliminacji 2 rodzajów najczęściej występujących niezgodności, tj. zanieczyszczenia aluminium oraz resztek masy formierskiej w kokili należy zwrócić szczególną uwagę na poprawienie jakości wsadu (zanieczyszczenia) oraz poprawę procesu produkcyjnego – wyeliminowanie obecności resztek masy formierskiej w kokili.

Bibliografia

1. Brzeszczak K., Jeziński G.: Metody radiologiczne. Terminologia. Agencja Reklamowo-Wydawnicza INSERAT, Opole 1999.
2. Giesko T., Mazurkiewicz A., Zbrowski A.: Advanced mechatronic system for in-line automated optical inspection of metal parts. 2nd International Conference on Control

¹⁴ Ziętek P.: Metody badań nieniszczących wybranych elementów konstrukcji turbozespołu małej mocy. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 3. Politechnika Śląska, Gliwice 2016.

- Instrumentation And Mechatronic Engineering CIM 2009, Melaka, Malaysia, 2-3 June 2009.
3. Lewińska-Romicka A.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. WNT, Warszawa 2001.
 4. Kielczyk J.: Radiografia przemysłowa. Wydawnictwo Gamma, Warszawa 2006.
 5. Józwiak B., Morawski T.: Aktualne możliwości zastosowania przemysłowej radiografii komputerowej. „Badania Nieniszczące”, nr 3, 2006.
 6. Opdecamp J.: Computed Radiography. Products and Applications. International Workshop Imaging NDT, Chennai, 25-28 April 2007.
 7. Weroński A.: Zmęczenie cieplne metali. „Przegląd Mechaniczny”, nr 3, 1983.
 8. Zbrowski A., Giesko T.: Automatykacja kontroli jakości wyrobów w linii technologicznej wytwarzania wałeczków łożysk tocznych. „Technologia i Automatykacja Montażu”, nr 2, 2008.
 9. Ziętek P.: Metody badań nieniszczących wybranych elementów konstrukcji turbosespołu małej mocy. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 3. Politechnika Śląska, Gliwice 2016.