

**ALGORYTM EKSKLUZJI W INTERPRETACJI WSKAZAŃ
ULTRADŹWIĘKOWYCH W ODLEWACH STALIWNYCH
O RÓWNOLEGLYCH ŚCIANACH**

Bronisław CIEŚLA, RBM-NDT Sp. z o.o.; bronislaw.ciesla@rbm-ndt.pl
Ryszard JAWOR, RBM-NDT Sp. z o.o.; jawor1938@wp.pl

1. WSTĘP

Badania ultradźwiękowe odlewów rozpoczęte przez Siergieja Sokołowa w 1929 roku do dnia dzisiejszego stanowią ważny element szeroko pojętej Diagnostyki Technicznej. W przypadku przemysłowych badań nieniszczących dużych odlewów staliwnych są najczęściej wykorzystywaną metodą wolumetryczną. Metodyka wykonywania badań ultradźwiękowych odlewów staliwnych podana jest zarówno w normach europejskich [1, 2] jak i amerykańskich [3]. Najtrudniejszą kwestią w badaniach ultradźwiękowych odlewów pozostaje jednak nadal interpretacja wskazań. Zamawiający badania chce uzyskać jak najwięcej informacji na temat nieciągłości wewnętrznych, niezależnie od tego czy jest on wytwórcą czy użytkownikiem odlewu. Wytwórca może poprzez zmianę technologii zredukować ilość wadliwych wyrobów, a użytkownik wprowadzić badania okresowe części odlewu, gdzie nieciągłości materiałowe mogą w przyszłości spowodować awarie. Osobną kwestią pozostają kryteria akceptacji dla nieciągłości przestrzennych podane zarówno w 1 jak i w 2 arkuszu norm europejskich dotyczących badania ultradźwiękowego odlewów staliwnych. Ewidentne sprzeczności w porównaniu reflektorów bez mierzalnego wymiaru i reflektorów z mierzalnym wymiarem, mają swoją genezę w DIN 1690-2:1985 [4]. Przykładowo, z jednej strony niedopuszczalne jest wskazanie o średnicy ekwiwalentnej 8 mm (otwór płaskodenny) a dopuszczalne jest wskazanie o powierzchni całkowitej 2000 mm² (średnica ekwiwalentna otworu płaskodennego 50 mm). Pomijając oczywisty oksymoron (reflektor bez mierzalnego wymiaru 8 mm), pojedyncze wskazania o średnicy ekwiwalentnej ≥ 8 mm w praktyce przemysłowej zdarzają się rzadko, więc nie stanowią rzeczywistego problemu w interpretacji. Pozostaje jednak kwestia konieczności uporządkowania podstawowych pojęć i doprecyzowania kryteriów akceptacji, by nie nastroczały trudności w ocenie.

2. KLASYFIKACJA NIECIĄGŁOŚCI ODLEWNICZYCH

Aby przejść do omówienia interpretacji wskazań należy na wstępie określić płaszczyznę pojęciową, po której będziemy się poruszać. Potrzebujemy kodyfikacji lub systematyzacji w określeniu wewnętrznych nieciągłości odlewniczych. Bez nich brak jest punktów odniesienia i sama interpretacja staje się bezcelowa. W obowiązujących obecnie normach EN i ISO brak jest klasyfikacji nieciągłości wewnętrznych w odlewach. Wycofana norma PN-85/H-83105 była edycją nieudaną w stosunku do normy z 1966. Wprowadzono oznaczenia literowo-liczbowe znacznie rozszerzając ilość klasyfikowanych nieciągłości, lecz usuwając jednocześnie z niezrozumiałych względów takie nieciągłości jak „nieszpaw”.

W tej sytuacji pozostają nam do dyspozycji normy ASTM [5, 6, 7] i „Atlas wad odlewów” AFS (Amerykańskie Stowarzyszenie Odlewników), Des Plaines IL [8].

Normy ASTM w swoich podziałach nieciągłości w zależności od grubości są niekompatybilne. Ten sam typ nieciągłości, w zależności od grubości prześwietlanego odlewu, zmienia swój symbol. Z tych powodów wydaje się, iż „Atlas wad odlewów” AFS [8] jest dokumentem bardziej dopracowanym, choć również pojawiają się w nim drobne nieścisłości. Między innymi, zakłada się, iż „pęknięcia na gorąco” i „pęknięcia na zimno” zawsze wychodzą na powierzchnię odlewu. Codzienna praktyka w badaniach odlewów pokazuje jednak, że wykrywamy pęknięcia, które nie wychodzą na powierzchnię, i to zarówno „pęknięcia na gorąco” jak i „pęknięcia na zimno”. Kolejnym problemem związanym z terminologią nieciągłości odlewniczych są unikatowe nazwy stosowane tradycyjnie przez odlewników amerykańskich, takie jak, szcurzy ogon (rattail), świerzb (scab), sprzączka (buckle) i wiele innych. Z pomocą przychodzi tu „Słownik terminów” w pozycji literaturowej [9]. Powyższe przykłady ilustrują fakt, iż z nazewnictwem i systematyką nieciągłości odlewniczych borykają się wszystkie kraje na świecie. I tak naprawdę, trudno jest oceniać, które określenie: niespaw lub „zimny strzał” jest bardziej trafne.

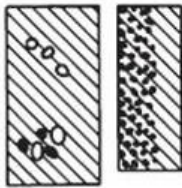
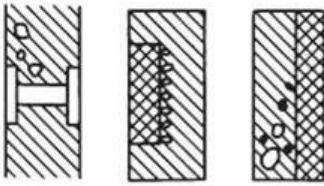
W dalszych rozważaniach będziemy jednak wykorzystywać oryginalny podział nieciągłości podany w atlasie. Międzynarodowy Komitet „Foundry Technical Associations” dzieli nieciągłości odlewnicze na 7 kategorii:



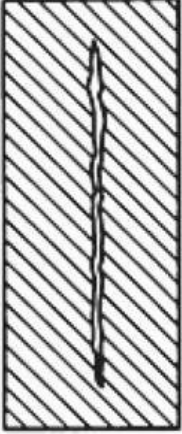
- ✓ Klasa A ⇒ Nierówności powierzchni (Metallic projections)
- ✓ Klasa B ⇒ Jamy (Cavities)
- ✓ Klasa C ⇒ Nieciągłości (Discontinuities)
- ✓ Klasa D ⇒ Defekty (Defects)
- ✓ Klasa E ⇒ Niepełny odlew (Incomplete casting)
- ✓ Klasa F ⇒ Niewłaściwy wymiar (Incorrect dimension)
- ✓ Klasa G ⇒ Wtracenia lub anomalie strukturalne (Inclusions or structural anomalies)

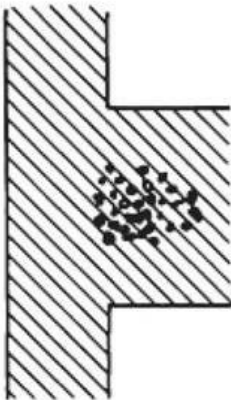
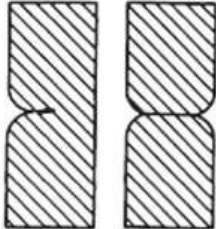
Do celów interpretacyjnych będą nas interesować nieciągłości wewnętrzne, niewychodzące na powierzchnię. Te nieciągłości należą do klas B, C i G. Klasa D pomimo nazwy odnosi się do nieciągłości powierzchniowych (Defective Surface).

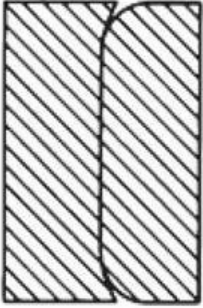

Na potrzeby referatu z katalogu AFS wybrano jedynie nieciągłości wewnętrzne. W ostatniej kolumnie dodano rubrykę „echo nieciągłości”. Zawarte w tej rubryce informacje determinują pozycję nieciągłości lub grupę nieciągłości w algorytmie ekskluzji. Sama konstatacja, czy nieciągłość powoduje pojawienie się echa na ekranie defektoskopu czy nie, jest z natury rzeczy arbitralna. W tej ocenie brano pod uwagę wyniki doświadczenia z przemysłowych badań odlewów prowadzonych na przestrzeni ostatnich 30 lat przez autorów referatu. Wpływ na ocenę miał również krytyczny stosunek autorów do podanych w normach europejskich wskazań ultradźwiękowych – patrz załącznik „B” [1] i załącznik „C” [2]. Oceny te i przedstawienia graficzne wskazań na ekranie defektoskopu mają zdaniem autorów charakter bardziej życzeniowy niż statystyczny.


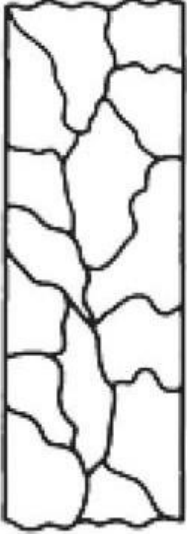
Na kolejnych stronach przedstawiono tabele z klasyfikacją nieciągłości wewnętrznych w odlewach wg „Atlasu wad odlewniczych” AFS.


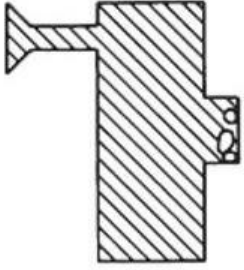
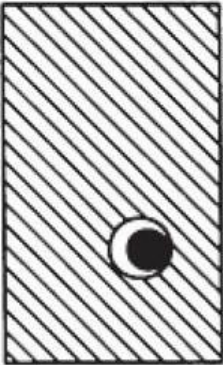
Numer	Opis	Nazwa zwyczajowa	Szkic	Echo nieciągłości(*)
B 100	Jamy zazwyczaj zaokrąglone o gładkich ścianach widoczne gołym okiem (pęcherze, porowatość)			
B 110	Klasa B 100 jamy wewnętrzne w odlewach nie wychodzące na powierzchnię, rozpoznawalne jedynie specjalnymi metodami, podczas obróbki maszynowej lub na przełomie odlewu			
B 111	Wewnętrzne okrągłe jamy, zazwyczaj z gładkimi ścianami, różnej wielkości, pojedyncze lub w grupach nieregularnych w całej objętości odlewu	Pęcherze, porowatość		TAK (przy odpowiedniej wielkości pojedynczego pora i niedużych skupiskach)
B 112	Jak wyżej, ale ograniczone do sąsiedztwa metalowych części umieszczonych w formie (ochładzalniki, wkłady, podpórki rdzeniowe, etc.)	Pęcherze przylegające do wkładów, ochładzalników, podpórek rdzeniowych, etc.		TAK (przy odpowiedniej wielkości pojedynczego pora i niedużych skupiskach)


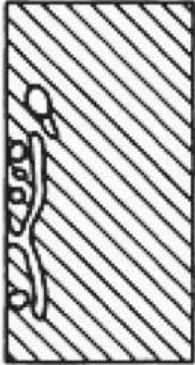
Numer	Opis	Nazwa zwyczajowa	Szkic	Echo nieciągłości(*)
B 113	Podobnie jak B 111 lecz towarzyszącymi wtrąceniami żuźla (G 122)	Pęcherze żuźla		Zależy od gładkości odbijającej powierzchni
B 220	Klasa B 200 z jamami lokalizowanymi całkowicie wewnątrz odlewu			
B 221	Wewnętrzna jama o nieregularnych kształtach, ściany często dendrytyczne	Wewnętrzny lub „ślepa” rzadzizna		NIE (pojedyncze punktowe odbicia należą do rzadkości)
B 222	Wewnętrzna jama lub obszar porowaty wzdłuż osi centralnej	Rzadzizna osiowa		TAK (w przypadku jamy) NIE (w przypadku porowatości)



Numer	Opis	Nazwa zwyczajowa	Szkic	Echo nieciągłości(*)
B 300	Struktura porowata spowodowana licznymi rzadziznami			
B 310	Rzadzizny z klasy B 300 trudno dostrzegalne gołym okiem			
B 311	Rozproszone, dendrytyczne gąbczaste rzadzizny wewnątrz ścian odlewu, trudno dostrzegalne gołym okiem	Makro i mikro rzadzizny, porowatość spowodowana rzadziznami, nieszczelności		NIE
C 300	Nieciągłości spowodowane przyklejeniami (niespaw), krawędzie zazwyczaj zaokrąglone, pokazujące słaby kontakt pomiędzy różnymi warstwami metalu wypełniającego formę			
C 310	Przyklejenie ostatniej porcji metalu do odlewu (wypełnienie formy)			
C 311	Całkowite lub częściowe oddzielenie ścian odlewu, często w pozycji pionowej	Niespaw		TAK (przy odpowiednim kierunku wiązki)


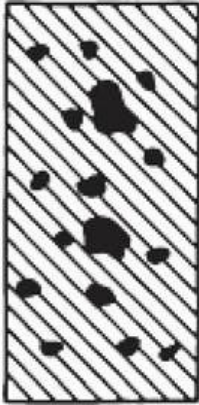
Numer	Opis	Nazwa zwyczajowa	Szkic	Echo nieciągłości(*)
C 320	Przyklejenie 2 części odlewu			
C 321	Separacja w pozycji poziomej	Przerwane odlewnie		TAK (przy odpowiednim kierunku wiązki)
C 330	Przyklejenie wokół podpórek, ochładzalników i wkładów			
C 331	Lokalne nieciągłości wokół wkładów metalowych	Niespaw wkładu lub podpórki, nieprzetopiona podpórka		NIE
C 400	Nieciągłości spowodowane defektami metalurgicznymi			
C 410	Separacja wzdłuż granic ziaren			

Numer	Opis	Nazwa zwyczajowa	Szkiec	Echo nieciągłości(*)
C 411	Separacja wzdłuż ziaren pierwotnej krystalizacji	Muszlowe przetomy lub skalne cukierki		NIE
C 412	Siatka pęknięć na całym przekroju	Korozyja międzykrystaliczna		NIE
Wtrącenia i anomalie strukturalne				
G 100	Wtrącenia			
G 110	Wtrącenia metaliczne			

Numer	Opis	Nazwa zwyczajowa	Szkic	Echo nieciągłości(*)
G 111	Wtrącenia metaliczne, których pojawienie się, analiza chemiczna lub badanie struktury pokazują element obcy w stopie	Wtrącenia metaliczne		TAK (przy odpowiedniej wielkości)
G 112	Wtrącenia metaliczne tego samego składu chemicznego jak bazowy metal, generalnie sferyczne, czasem pokryte zgorzeliną,	Niespaw		TAK
G 113	Sferyczne wtrącenia metaliczne wewnętrzne pęcherza lub innej jamy lub na powierzchni wgłębienia (patrz A 311). Skład chemiczny podobny do stopu ale bardziej zbliżony do eutektyki	Wewnętrzne pocenie się, pot fosforków		NIE

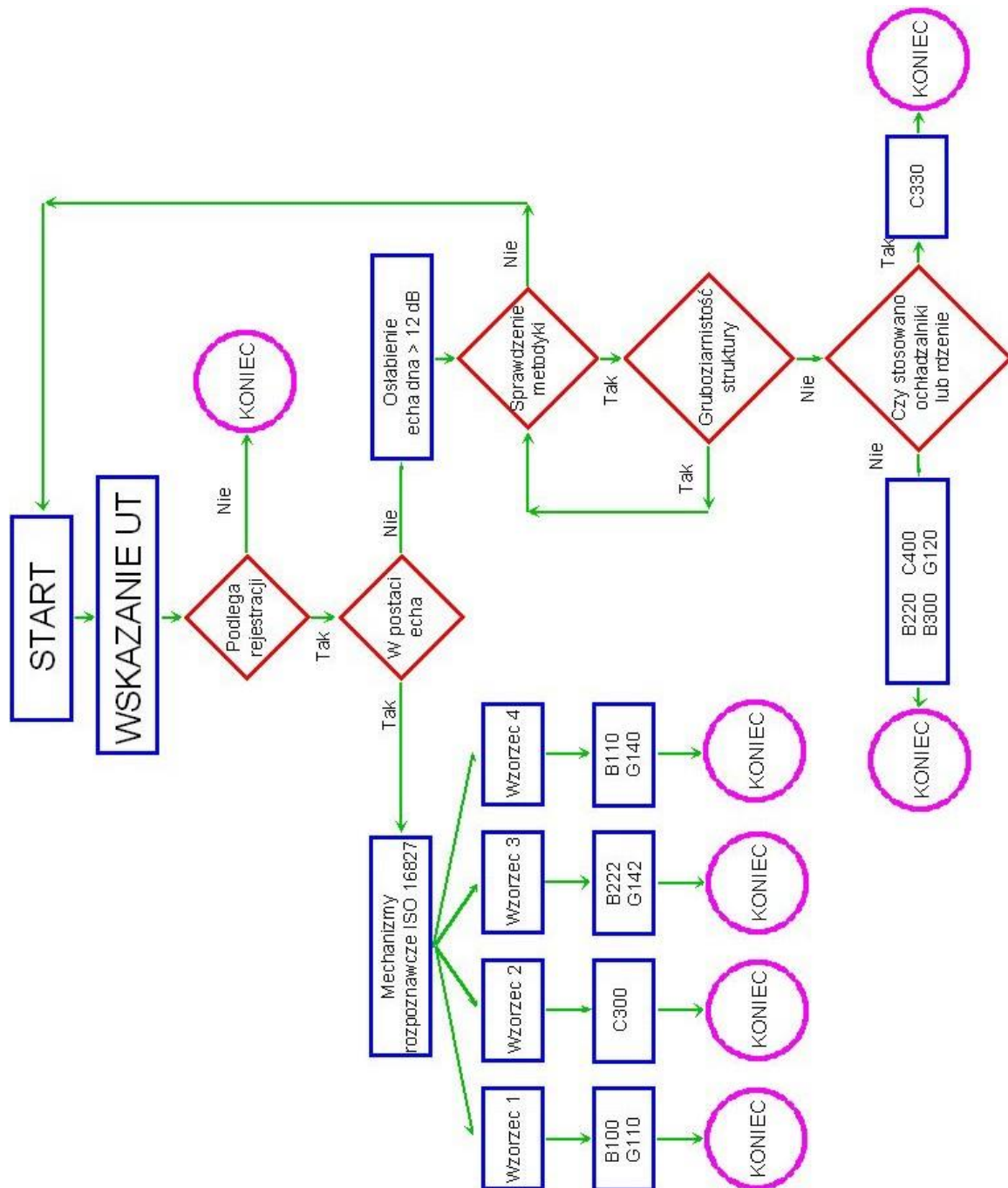
Numer	Opis	Nazwa zwyczajowa	Szkic	Echo nieciągłości(*)
G 120	Wtrącenia niemetaliczne; żużel, popiół, topnik			
G 121	Wtrącenia niemetaliczne, których pojawienie się lub analiza pokazują, że pochodzą one z roztopionego żużla, topników i innych produktów niemetalicznych	Żużel, popiół lub wtrącenia topnika, ceroxydy		NIE
G 130	Wtrącenia niemetaliczne; formy lub materiałów rdzeni			
G 131	Wtrącenia piasku zazwyczaj blisko powierzchni odlewu	Wtrącenia piasku		NIE

Numer	Opis	Nazwa zwyczajowa	Szkic	Echo nieciągłości(*)
G 140	Wtrącenia niemetaliczne; oksydacje i produkty reakcji			
G 141	Wyraźne kontrastowe nieregularne czarne plamy na powierzchni przelomu żeliwa ciągliwego	Czarne plamy		TAK
G 142	Wtrącenia formy lub zgorzeliny zazwyczaj powodujące zlokalizowane szwy	Wtrącenia zgorzeliny lub szwy		TAK

Numer	Opis	Nazwa zwyczajowa	Szkic	Echo nieciągłości(*)
G 143	Sfałdowane powłoki połykającego grafitu na ścianach odlewu	Połykające powłoki węgla lub ślady grafitu		NIE
G 144	Twarde wtrącenia kawałków formy	Twarde plamy		TAK
(*)	⇒ konstatacja czy nieciągłości powodują pojawienie się echa opiera się na danych statystycznych i nie powinno się jej rozpatrywać w kategoriach bezwzględnych.			

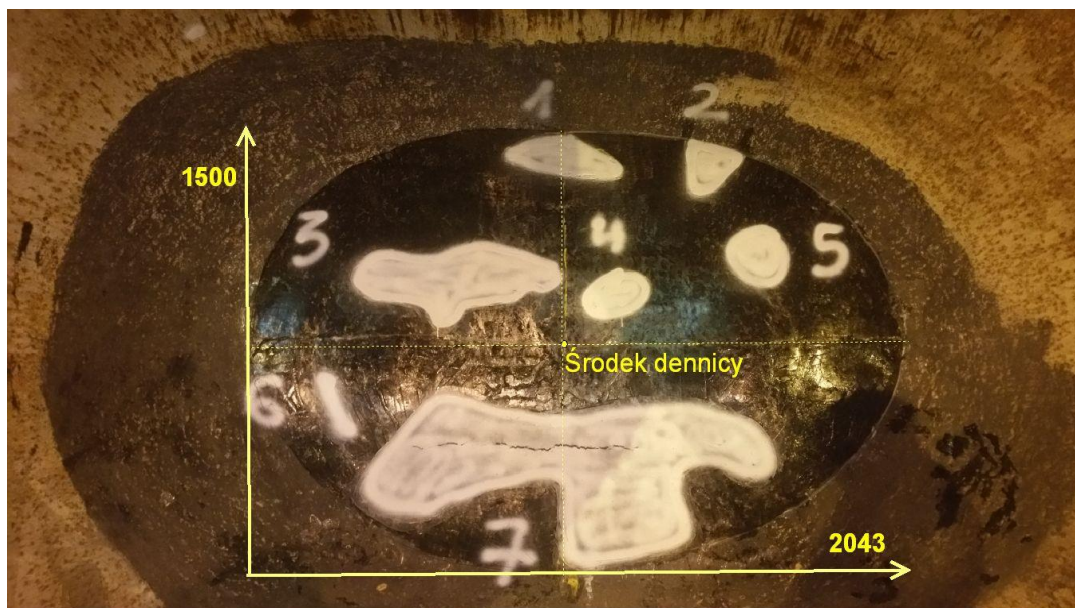
3. ALGORYTM EKSKLUZJI

Algorytm ekskluzji polega na odrzucaniu kolejnych możliwości interpretacyjnych, aż do osiągnięcia pozycji zarezerwowanej dla konkretnej grupy wskazań lub rzadziej jednego wskazania. Z punktu widzenia statystyki najczęściej występującym wskazaniem jest zanik lub osłabienie echa dna. Zleceniodawca przyjmuje takie wyniki badań bez przekonania. Jeżeli jednak użyjemy naszego algorytmu to w wynikach badań możemy podać konkretne grupy wskazań odpowiedzialne za zanik lub osłabienie echa dna. Algorytm ekskluzji przedstawiono na schemacie poniżej:



4. PRZYKŁAD STOSOWANIA ALGORYTMU EKSKLUZJI

Podczas badań UT dna kadzi żuźlowej wykryto duże obszary z osłabieniem echa dna powyżej 12 dB lub całkowitym zanikiem echa dna. Kadzie, odlane ze staliwa LII450 wg PN-H-83152:1985(P), po standardowej obróbce cieplnej (normalizacja i odpuszczanie) są używane w jednej z polskich hut. Zakres badań UT określony przez Zleceniodawcę obejmował dna kadzi – powierzchnia elipsy o wymiarach osi 2042 x 1500 mm. Zgodnie z rysunkiem wykonawczym grubość ścianki kadzi w okolicach dna wynosiła około 90 mm. Badania wykonano w oparciu o pisemną instrukcję badania [10] zatwierdzoną przez Zleceniodawcę. Lokalizacje wskazań pokazano na Zdjęciu nr 1, poniżej:



Zdjęcie 1 Dno kadzi z lokalizacją wad. Numer kadzi był odlany z prawej strony kadzi.

Wskazania pokazane na zdjęciu zwymiarowano i oceniono zgodnie z DIN 1690-2:1985(G) jako wady. Na życzenie Zleceniodawcy dokonano analizę wskazań wykorzystując do tego algorytm ekskluzji, jak niżej:

A) Wybór aparatury do badań

Badania wykonano defektoskopem USM36. Wybór głowic został dokonany na podstawie DIN 1690-2:1985(G) Tabela 3 Uwaga nr 2 i SEP 1922:1985(G) punkt 10.2. Odlew był dostępny do badania tylko z jednej strony (od wewnątrz) więc użyta głowica SEB2-0⁰ obejmowała cały zakres badania (wg katalogu głowic GE zakres roboczy głowicy wynosi od (4.5 ÷ 2000) mm. Badania głowicą SEB2-0⁰ prowadzono przy nastawie zakresu podstawy czasu (0 ÷ 120) mm. Dodatkowo w przypadkach budzących wątpliwości stosowano głowicę B2S dla sprawdzenia wskazań występujących poza polem bliskim głowicy (45 mm).

B) Wybór techniki badań

Firma RBM-NDT dysponuje kompletem próbek odniesienia ze staliwa węglowego LII450 w zakresie grubości od 40 mm do 500 mm. Mając naturalne próbki odniesienia do badań wybrano technikę DAC. Do sporządzenia krzywych DAC wykorzystano próbki o kształcie walca i wysokości odpowiednio 40, 60 i 100 mm. W próbkach znajdowały się otworki płaskodenne o średnicach $\phi = 2, 4$ 6 i 8 mm.

C) Określenie strat przeniesienia

Straty przeniesienia w badanym materiale oceniono na podstawie krzywej BWEDAC (DAC sporządzony na podstawie odbić od dna próbek) i wynosiły one +6 dB.

D) Kryteria oceny wielkości wskazań

Nieciągłości z wymiarem niemierzalnym oceniano na podstawie krzywej DAC $\phi = 4$ mm. Nieciągłości z wymiarami mierzalnymi oceniano na podstawie DAC $\phi = 3$ mm.

E) Sposób oceny spadku echa dna

Spadek echa dna kontrolowano w sposób ciągły za pomocą funkcji BEA przy wzmacnieniu odniesienia 56 dB (przy FSH = 100%)

F) Przygotowanie powierzchni przed badaniem

Powierzchnie z których prowadzone było badanie zostały oszlifowane do gładkości mniejszej niż $Ra < 12,5 \mu\text{m}$.

G) Wybór środka sprzęgającego

Badania wykonano przy użyciu towotu jako środka sprzęgającego. Zaletą towotu jest stosunkowo dobra przyczepność do podłoża (środek sprzęgający nie spływa w dół). Również uzupełnia on miejsca, gdzie głowica nie przylega ściśle do powierzchni, polepszając znacznie sprzężenie z badanym materiałem.

H) Kontrola warunków stałego sprzężenia

Sprzężenie kontrolowano wskazaniami uruchomionej podczas badania funkcji BEA, (Back Echo Attenuation) a w przypadku całkowitego zaniku echa dna zwiększano wzmacnienie do momentu pojawienia się wskazań typu „trawa”.

I) Podsumowanie metodyki

Przyjęta metodyka i wykonanie badań nie były przyczyną spadku echa dna.

J) Wpływ geometrii badanego odlewu.

Dna kadzi miały równoległe ściany a badania prowadzono od strony wewnętrznej (wklęsłej) kadzi. Taka geometria powoduje, iż zewnętrzna ściana odlewu działa jak soczewka skupiająca wiązkę i tym samym wzmacnia echo dna. Możemy wykluczyć więc wpływ geometrii odlewu na spadek echa dna.

K) Wpływ nieciągłości materiału odlewu.

Badania pokazały, iż większość obszarów dna kadzi jest wolna od wskazań powyżej granicy rejestracji i odznacza się bardzo dobrą przepuszczalnością fal ultradźwiękowych (6 dB różnicy w stosunku do próbek odniesienia w warunkach laboratoryjnych). Na etapie wytwarzania kadzie były poddane obróbce cieplnej polegającej na wyżarzaniu normalizującym i odprężającym. Struktura odlewu w dnie kadzi w obszarach z wadami jak i poza nimi powinna więc być bardzo podobna. Różnice grubości ścianki w dnie kadzi były niewielkie i nie miały wpływu na zmianę struktury. Tym samym można wykluczyć przyczynę obserwowanego spadku echa dna nieciągłościami strukturalnymi w odlewach.

Jedyną konkluzją pozostaje wskazanie jako przyczyny spadku echa dna występowanie nieciągłości materiałowych w odlewach.

L) Interpretacja końcowa nieciągłości materiału odlewu.

Zgodnie z przywołanym w punkcie 3 algorytmem ekskluzji mamy cztery możliwe opcje interpretacji: B 220, B 300, C 400 lub G 120. Część wykrytych wskazań prócz spadku echa dna o więcej niż 75% (12 dB) lub całkowitego zaniku echa dna, powodowała pojawianie się szeregu ech klasyfikowanych jako „trawa”, o wielkości poniżej granic rejestracji, w środkowej, rdzeniowej części odlewu. Wiadomo również, że technologia odlewania przewidywała odwrotne ustawienie formy (dnem do góry) i obszar dna miał słabsze zasilanie w stosunku do górnej części odlewu (dół formy). Z tych powodów nieciągłości C 400 i G 120 są raczej mało prawdopodobne. W grupie B 220 znajdujemy wskazanie B 222 \Rightarrow wewnętrzna jama lub obszar porowaty wzdłuż osi centralnej. Obszar porowaty spowodowany rzadziznami (a nie gazem z zewnątrz) znajduje się zazwyczaj w strefie środkowej ścianki. Czasami wykrywamy go w formie ekstremalnej jako „podwójna ściankę”. Podobne symptomy mogą powodować wskazania z grupy B 300.

Biorąc pod uwagę powyższe rozważania należy przyjąć, iż najbardziej prawdopodobnymi wadami wykrytymi w trakcie badań były B 222 lub B300.

5. UWAGI KOŃCOWE

Autorzy referatu mają pełną świadomość faktu, iż przedstawiony algorytm ekskluzji jest narzędziem dalekim od doskonałego. Wynika to zarówno z uproszczeń klasyfikacyjnych jak i z ograniczeń przyjętej w badaniach metodyki (badania wykonywane jedynie głowicami normalnymi). Chcielibyśmy, aby algorytm ekskluzji był postrzegany jako pierwszy krok w pracach dotyczących klasyfikacji wskazań i możliwości ich interpretacji.

LITERATURA

- [1] PN-EN 12680-1:2005(P) Odlewnictwo – Badania ultradźwiękowe Część 1: Odlewy stalowe ogólnego stosowania
- [2] PN-EN 12680-2:2005 (P) Odlewnictwo – Badania ultradźwiękowe – Część 2: Odlewy stalowe na części pracujące pod wysokimi obciążeniami
- [3] ASME BPVC. V-2017 ARTICLE 23, SA-609/SA-609M – Standard Practice for Castings, Carbon, Low-alloy and Martensitic Stainless Steel, Ultrasonic Examination Thereof
- [4] DIN 1690-2:1985(G) – Technische Lieferbedingungen für Gußstücke aus metallischen Werkstoffen Stahlgußstücke; Einteilung nach Gütestufen aufgrund zerstörungsfreier Prüfungen
- [5] ASTM E 186-15 – Standard Reference Radiographs for Heavy-Walled (2 to 4¹/₂ in. (50.8 to 114 mm)) Steel Castings
- [6] ASTM E 280 – 15 – Standard Reference Radiographs for Heavy-Walled (4¹/₂ to 12 in. (114 to 305 mm)) Steel Castings
- [7] ASTM E 446 – 15 – Standard Reference Radiographs for Steel Castings Up to 2 in. (50.8 mm) in Thickness
- [8] ASM HANDBOOK VOLUME 17 – Nondestructive Evaluation and Quality Control, 9th edition 1989
- [9] ASM HANDBOOK VOLUME 15 – Casting, 9th edition 1992
- [10] UT/GRANT/2017 rewizja 00 – Instrukcja badania ultradźwiękowego dna kadzi żuźlowej, RBM-NDT grudzień 2017
- [11] PN-EN ISO 16827:2014(E) - Badania nieniszczące – Badania ultradźwiękowe – Charakteryzowanie i wymiarowanie nieciągłości

