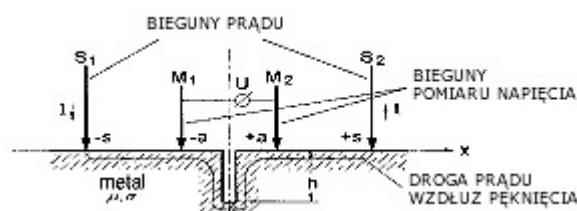


Pomiar głębokości pęknięć - aktualna technika pomiarowa

H. Cost, V. Deutsch, P. Ettl, M. Platte – Wuppertal

1. Podstawy fizyczne pomiaru głębokości pęknięć

Przy pomiarze głębokości pęknięć metodą sond potencjałowych mierzy się opór elektryczny między dwoma punktami pomiarowymi na powierzchni przedmiotu metalicznego. W miejscach występowania pęknięcia opór elektryczny jest wyższy, niż na powierzchni wolnej od pęknięć. Jest to miara dla szukanej głębokości pęknięcia. Do pomiaru stosuje się technikę czterobiegunową (rys. 1). Przez dwa zewnętrzne bieguny prądu S1 i S2 płynie przez detal prąd stały. Wytworzone na biegunach pomiarowych M1 i M2 napięcie U jest proporcjonalne do oporu elektrycznego między tymi biegunami. Napięcie U pozostaje w charakterystycznym związku z szukaną głębokością pęknięcia h , ze znanymi odstępami bieguna pomiarowego $2a$ i bieguna prądowego $2s$, jak również z elektrycznymi i magnetycznymi własnościami materiału.



rys. 1 Zasada pomiaru głębokości pęknięcia metodą sond potencjałowych.

Przy prądzie zmiennym, na podstawie efektu naskórkowości linie pola elektrycznego są w obszarze pod powierzchnią wypierane z materiału na zewnątrz, tak że ze wzrastającą częstotliwością zwiększa się również gęstość prądu. Głębokość wnikania δ po której gęstość prądu obniża się o 63%, jest przy tym:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f \sigma \pi \mu \mu_0}}$$

- σ : specyficzna elektryczna przewodność właściwa
- μ : względna przenikalność magnetyczna
- μ_0 : przenikalność magnetyczna
- f : częstotliwość

Przy wysokiej częstotliwości przepływ prądu jest zgodny z konturami powierzchni, jak to przedstawiono na rys. 1, na podstawie naszkicowanej ścieżki prądu dla efektu naskórkowości. Jednocześnie następuje podwyższenie oporu, jak przy przepływającym prądzie przez drut, którego przekrój zmniejsza się. Natomiast przy prądzie stałym, tzn. bez działania efektu naskórkowości, przepływ następuje drogą najmniejszego oporu, która zrównuje się prawie z geometrycznie najkrótszą długością drogi.

Wniosek: dla precyzyjnego pomiaru głębokości pęknięć, przy małych prądach pomiaru niezbędny jest prąd zmienny.

Zalety: przy małych prądach pomiaru unika się przypaleń w miejscach styku detalu i biegunów prądu. Ponadto zmniejsza się obciążenie prądowe eksploatowanych baterii.

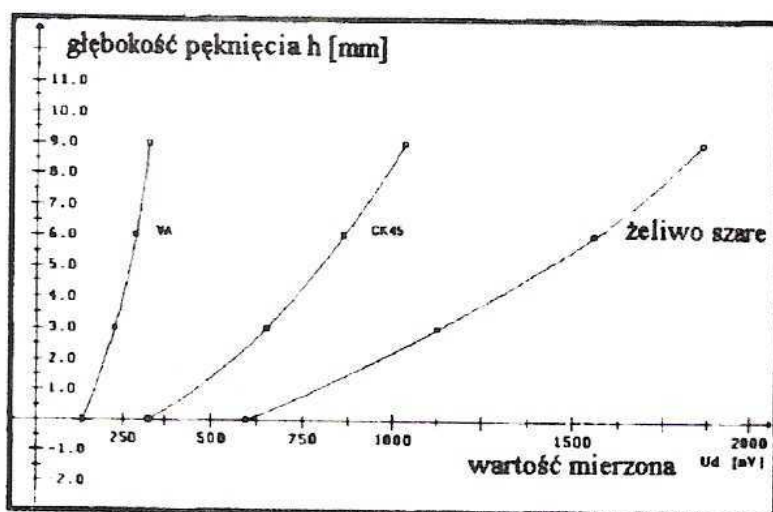
Dzięki działaniu efektu naskórkowości, w miejscach wolnych od pęknięć, zwiększa się zasadniczo napięcie pomiaru, przy pęknięciu, przez przedłużenie efektywnej ścieżki prądu, zwiększa się dodatkowo napięcie pomiaru. Tylko przy pomiarze prądem zmiennym można zrezygnować z dużego odstępu biegunów prądowych.

Rezultat: mniejsze i bardziej praktyczne sondy z czterema scalonymi biegunami, wyższa zdolność rozdzielcza i lepsza dokładność pomiarowa. Można także mierzyć materiały szczególnie dobrze przewodzące elektryczność, takie jak stal stopowa lub aluminium.

2. Wady przyrządów konwencjonalnych

Na rys. 2 pokazano związek między głębokością pęknięcia h a pomierzonym napięciem U_d (częstotliwość 3500 Hz). Jest on nieliniowy i z powodu różnorodnych własności magnetycznych i elektrycznych jest różny dla różnych detali. Dotychczasowe urządzenia uwzględniały to w sposób niedostateczny.

Ponieważ napięcia pomiarowe na powierzchni są bardzo małe (kilka μV), dotychczasowe systemy przyrządów są bardzo czułe na zakłócenia. Często na wynik pomiaru wpływa położenie przewodów doprowadzających przez indukowanie napięcia spowodowane przepływającym prądem. Do tego dochodzą nieraz nie dające się kontrolować problemy trzpienia przy przyłożeniu sondy do detalu. Zużycie trzpieni sondy daje w efekcie nieprzewidywalne rozrzuty pomiaru. Pomiar z dotychczasowymi sondami trzybiegunowymi, z oddzielnym biegunem prądu, są poza tym także z natury obciążone błędem, ponieważ odstęp bieguna prądowego nie jest zdefiniowany.



rys. 2 Zależność napięcia mierzonego U_d od głębokości pęknięcia h przy różnych materiałach

3. Nowe typy sond do pomiaru głębokości pęknięć

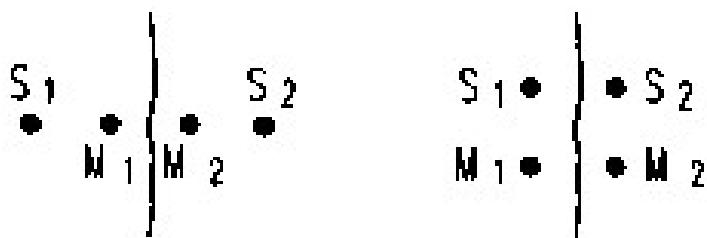
Nowe sondy (rys. 3) są zasadniczo czterobiegunowe. Bieguny prądu i pomiarowe składają się ze sprężynujących, na końcu hartowanych i połączonych, trzpieni stykowych. Gwarantują one optymalny elektryczny styk i wymagają tylko niewielkiej siły nacisku. Pozbawiona kantów sonda jest dodatkowo wyposażona w pryzmatyczną powierzchnię przyłożenia. Ma to taki skutek, że trzpienie sondy są równo dociskane do detalu siłą sprężynującą przy każdym pomiarze. Błędna obsługa jest przez to wykluczona. Pryzmatyczne ukształtowanie powierzchni przyłożenia umożliwia także bardzo pewne przyłożenie do cylindrycznie wygiętych powierzchni mierzonej rury. Przez udoskonaloną formę konstrukcji, głowica sondy może być przyłożona nie tylko na wewnętrzne powierzchnie, lecz nawet na trudno dostępne obszary detalu.



rys. 3 Sondy do pomiaru głębokości pęknięć: z głowicą pomiarową 90° i z głowicą pomiarową 0°

Przy prostej formie konstrukcji sondy, trzpienie stykowe są rozmieszczone w formie kwadratu (rys. 4b), aby można było dokonać pomiaru również na powierzchniach zakrzywionych. W przeciwieństwie do

rozmieszczenia liniowego trzpieni stykowych, z leżącymi na zewnątrz biegunami prądu (rys. 4a), sonda musi być tu tak przyłożona, że miejsce mające być pomierzone przebiega równoległe do oznaczenia na głowicy sondy, tzn. do linii połączenia bieguna prądowego, względnie bieguna napięciowego. Napięcie pomiarowe zostaje przy tym bocznie przesunięte o kilka mm w stosunku do przepływu prądu głównego.



rys. 4 Rozmieszczenie biegunów pomiarowych (M1 i M2) oraz biegunów prądowych (S1 i S2): a) rozmieszczenie liniowe; b) rozmieszczenie w formie kwadratu

Trzpień stykowe (rys. 5) są wymienne bez narzędzi: w przypadku zużycia trzpień można łatwo wyciągnąć z tulei prowadzącej sondy i wsunąć nowe. Same sondy nie muszą być z tego powodu wymieniane.

Przy powierzchniach pokrytych zgorzeliną lub zoksydowanych najlepsze są trzpień stykowe samo obracające się: przy przyłożeniu sondy obracają się one wokół swej osi. Cienka, źle lub wcale nie przewodząca warstwa zostaje w ten sposób przewiercona i zostaje stworzony pewny styk z podłożem przewodzącym prąd.



rys. 5 Wymienne i połączone trzpień stykowe

Wbudowana elektronika (rys. 6) zawiera wzmacniacz wstępny. Dzięki temu sygnał pomiarowy jest w sposób pewny skierowany dalej do urządzenia oceniającego. Poza tym w sondzie znajduje się element układu pamięci: w ten sposób zostają zapamiętane fabryczne dane sondy oraz krzywe charakterystyczne zależne od materiału.



rys. 6 Zintegrowana elektronika: wzmacniacz wstępny oraz pamięć krzywych charakterystycznych

4. Technika pomiarowa

Na dostarczonym wzorcu, który przez skośnie przebiegające przepiętowanie odtwarza pęknięcie o różnych głębokościach, użytkownik może w każdej chwili skontrolować, czy sonda daje jeszcze dostatecznie dokładne wartości pomiarowe. Odchylenia przez zużycie sondy lub skrajne wpływy temperatury mogą być kompensowane przez wzorcowanie. Wartości korekcyjne zostaną zapamiętane przez sondę.

Konwersja napięć pomiarowych w głębokościach pęknięcia następuje w mikroprocesorze urządzenia poprzez porównanie z zapamiętanymi w pamięci sondy fabrycznymi tabelami wzorcowymi. Przed

każdym pomiarem sonda zostaje najpierw przyłożona w miejscu wolnym od pęknięć na detalu który ma być mierzony. Występujące tam napięcie pomiarowe zostaje porównane z umieszczonymi w pamięci wartościami krzywych charakterystycznych. Pasująca do materiału charakterystyka zostaje przez to automatycznie znaleziona i użyta przez mikroprocesor tak, aby w czasie następującego pomiaru ustalić głębokość pęknięcia.

Dla uniknięcia błędów obsługi, niedostatecznego kontaktu elektrycznego przez nieprawidłowe przyłożenie lub poruszenie sondy, pomiar jest nadzorowany przez mikroprocesor. Stąd nieprawidłowe wyniki są prawie wykluczone. Rezultat: wysoka powtarzalność wyników pomiarowych ($\pm 0,1$ mm do głębokości pęknięcia 100 mm) i niewielka niepewność pomiarowa. Także stale, które przez swoją wysoką przewodność elektryczną i nieznaczną przenikalność magnetyczną i z tego powodu mniejsze napięcie pomiarowe, wykazują tendencje zwiększonej niedokładności pomiarowej, pozwalają się mierzyć z dostateczną dokładnością. To samo dotyczy także większości metali nieżelaznych, takich jak aluminium i mosiądz.

5. Urządzenie

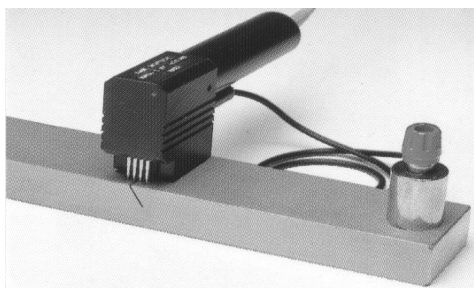
Pomiarowy prąd zmienny przepływający przez badany detal, wynosi jak przy urządzeniach konwencjonalnych 500 mA. Tak długo jak przyłożona jest sonda, prąd przepływa inaczej niż dotychczas, nie w sposób ciągły, lecz każdorazowo impulsowo przez parę milisekund, aby przeprowadzić pomiar. Przy pracy ciągłej wytworzona jest i pokazana na wyświetlaczu jedna wartość pomiarowa na sekundę. W związku z tym urządzenie może pracować z zasilaniem bateryjnym do 12 godzin, przy przyłożonej sondzie w ruchu ciągłym. Przy zastosowaniu akumulatorów, nie muszą one być każdorazowo wyciągane z urządzenia, lecz mogą być ładowane w przyrządzie za pomocą zewnętrznego zasilacza sieciowego/ładowarki.

Klawiatura foliowa obejmuje tylko niewiele elementów, dzięki którym bezpośrednio dostępne są podstawowe funkcje pomiarowe. Dalsze funkcje są do wykonania przez przycisk menu, przy czym każdorazowo funkcja w zrozumiałym tekście ukazuje się w okienku wyświetlacza. Obsługa jest przez to prosta jak w konwencjonalnych urządzeniach do pomiaru grubości ścianki lub powłoki.

Pamięć przyrządu przechowuje do 3850 wartości pomiarowych, które mogą być podzielone na 300 grup. Wbudowany zegar czasu rzeczywistego protokołuje przy tym automatycznie także datę szeregu pomiarów. Przez interfejs RS232 protokoły pomiarowe mogą być wydrukowane bezpośrednio na drukarce. Przez ten sam interfejs przyrząd może komunikować się z komputerem PC. W tym celu jest do dyspozycji program komputerowy „STATS Windows”, za pomocą którego wartości pomiarowe mogą być nie tylko przejmowane, ale również zarządzane i przedstawiane graficznie. Ponadto można w ten sposób sporządzać sprawozdania z badań oraz inną dokumentację.

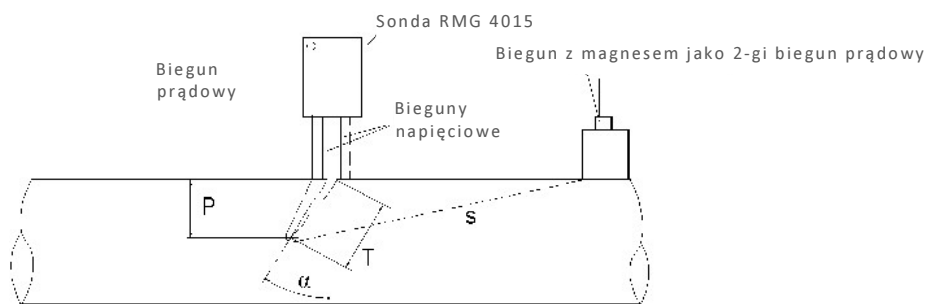
6. Rozszerzony zakres funkcji – pomiar pęknięć skośnych

Dla pęknięć przebiegających ukośnie w stosunku do powierzchni interesujący jest obok głębokości również kąt i kierunek w jakim pęknięcie zalega (projekcja głębokości). Określenie położenia pęknięcia ukośnego jest możliwe po wykonaniu dwóch pomiarów przeprowadzonych specjalną sondą. Jako nowe rozwiązanie oferowana jest sonda kątowna z czterema trzpieniami pomiarowymi (rys. 7), gdzie bieguny zewnętrzne są biegunami prądowymi a wewnętrzne napięciowymi, a pomiar głębokości pęknięcia odbywa się w sposób pokazany jak na rys. 1.

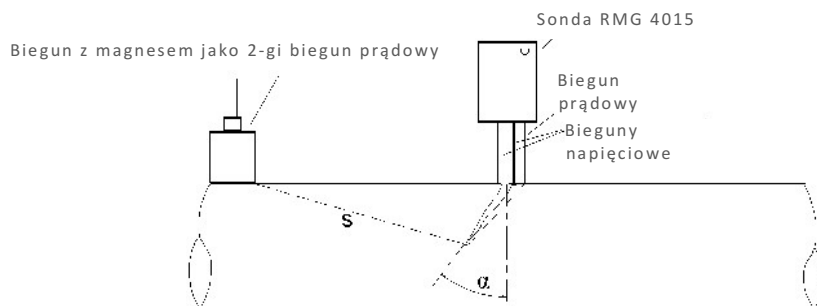


rys. 7 Specjalna sonda do pomiaru pęknięć skośnych

W obudowie sondy znajduje się dodatkowe gniazdo do podłączenia zewnętrznego magnetycznego bieguna prądowego. Kiedy dodatkowy biegun prądowy jest podłączony następuje automatyczne wyłączenie nieoznakowanego bieguna prądowego, a przepływ prądu odbywa się pomiędzy oznaczonym biegunem prądowym, a podłączonym dodatkowym biegunem prądowym z magnesem. Poza tym w urządzeniu zostanie automatycznie obniżona częstotliwość prądu pomiarowego do wartości optymalnej dla pomiarów skośnych pęknięć. Określenie skosu pęknięcia odbywa się z podłączonym zewnętrznym biegunem prądowym poprzez dwa pomiary (rys. 8). Drugi pomiar odbywa się z biegunami pomiarowymi odwróconymi o 180°. Przy prądzie stałym przepływ odbywa się możliwie najkrótszą drogą S pomiędzy biegunami, przy tych pomiarach A i B droga prądu jest różna, co powoduje odmienne wartości napięcia na biegunach pomiaru napięcia. Efekt ten występuje też w odniesieniu do prądu zmiennego, o ile częstotliwość jest na tyle mała, że głębokość wnikania δ leży jeszcze w małym zakresie. Ta korzystna właściwość prądu zmiennego może być tutaj wykorzystana. Różnice napięcia pomiędzy pomiarem A i B są miarą kąta α i mają różną wartość dla różnych grup materiałów. Odpowiednie charakterystyki materiałów są zapisane w pamięci sondy pomiarowej w postaci odpowiedniej tabeli. Wartość pomiarowa danego pęknięcia jest regulowana automatycznie w urządzeniu za pomocą wartości wziętej bezpośrednio obok pęknięcia. Przez to są kompensowane różnie wybrane odstępki pomiędzy zewnętrznym biegunem prądowym a sondą, tak że nie trzeba zwracać uwagi poza zachowaniem minimalnego odstępku. Po przeprowadzeniu pomiarów A i B urządzenie podaje automatycznie wyliczony kąt α .



A: Pierwszy pomiar U_A dla określenia kąta α



B: Drugi pomiar U_B dla określenia kąta α

rys. 8 Przebieg funkcji pomiaru pęknięcia skośnego

Dodatkowe oznaczenia dają informację na temat przebiegu pęknięcia relatywnie do położenia magnesu (zewnętrzny biegun prądu) przy dalej przeprowadzanych pomiarach: przebieg pęknięcia w kierunku magnesu - oznaczenie jest ujemne - odbiega od magnesu, zostanie podany kąt dodatni. Wtyczka zewnętrznego bieguna prądowego zostaje ponownie wyciągnięta z sondy, urządzenie przełączy się automatycznie w tryb pomiarowy z odpowiednio wyższą częstotliwością. Głębokości pęknięć przy tym są mnożone w urządzeniu przez współczynnik kąta ($\cos \alpha$), tak iż projekcja P głębokości pęknięcia zostaje podana w mm.

Funkcja pomiarowa będzie tak długo powtarzana dopóki nie wyłączy się jej w menu urządzenia lub uaktywni do pomiaru położenia innego ukośnego pęknięcia. Przy kącie α powyżej 25° dokładność pomiarowa określa się w przedziale $10\% \pm 5^\circ$. Jedynie przy głębokości pęknięcia poniżej 2 mm lub przy

kącie α poniżej 25° efekt pomiaru jak i jego dokładność z fizycznych względów są mniejsze. Niedokładność pomiarowa spowodowana małym kątem w praktyce nie odgrywa żadnej roli. Głębokość pęknięcia i jej projekcja prostopadła do powierzchni elementu $\cos \alpha$ różni się tylko maksymalnie 10%.

7. Wnioski

Pomiar głębokości pęknięć wg. metody sond potencjałowych, dotąd obciążony zbyt dużą niepewnością pomiarową, staje się przy użyciu nowego miernika RMG4015 niezawodną i wygodną metodą pomiarową. Zmniejszenie przyrządu do formatu kieszonkowego, proste obchodzenie się z sondami i przystępna cena, czynią z RMG4015 instrument kontrolny bliski ideału. Urządzenie to stanowi istotne uzupełnienie badania pęknięć metodą magnetyczno-proszkową i penetracyjną. Metoda badania za pomocą RMG4015 jest zalecana, jeżeli przy drogich detalach wchodzi w rachubę obróbka dodatkowa lub jeżeli powinien być nadzorowany przyrost pęknięcia (np. na urządzeniach produkcyjnych).



AUTORYZOWANY PRZEDSTAWICIEL KARL DEUTSCH W POLSCE:

TECHCONTROL S.C.

ul. Gdyńska 5
47-400 Racibórz
tel.: +48 32 457 80 43
info@techcontrol.eu
www.techcontrol.eu