

آزمون جریان گردابی Eddy Current Testing ET

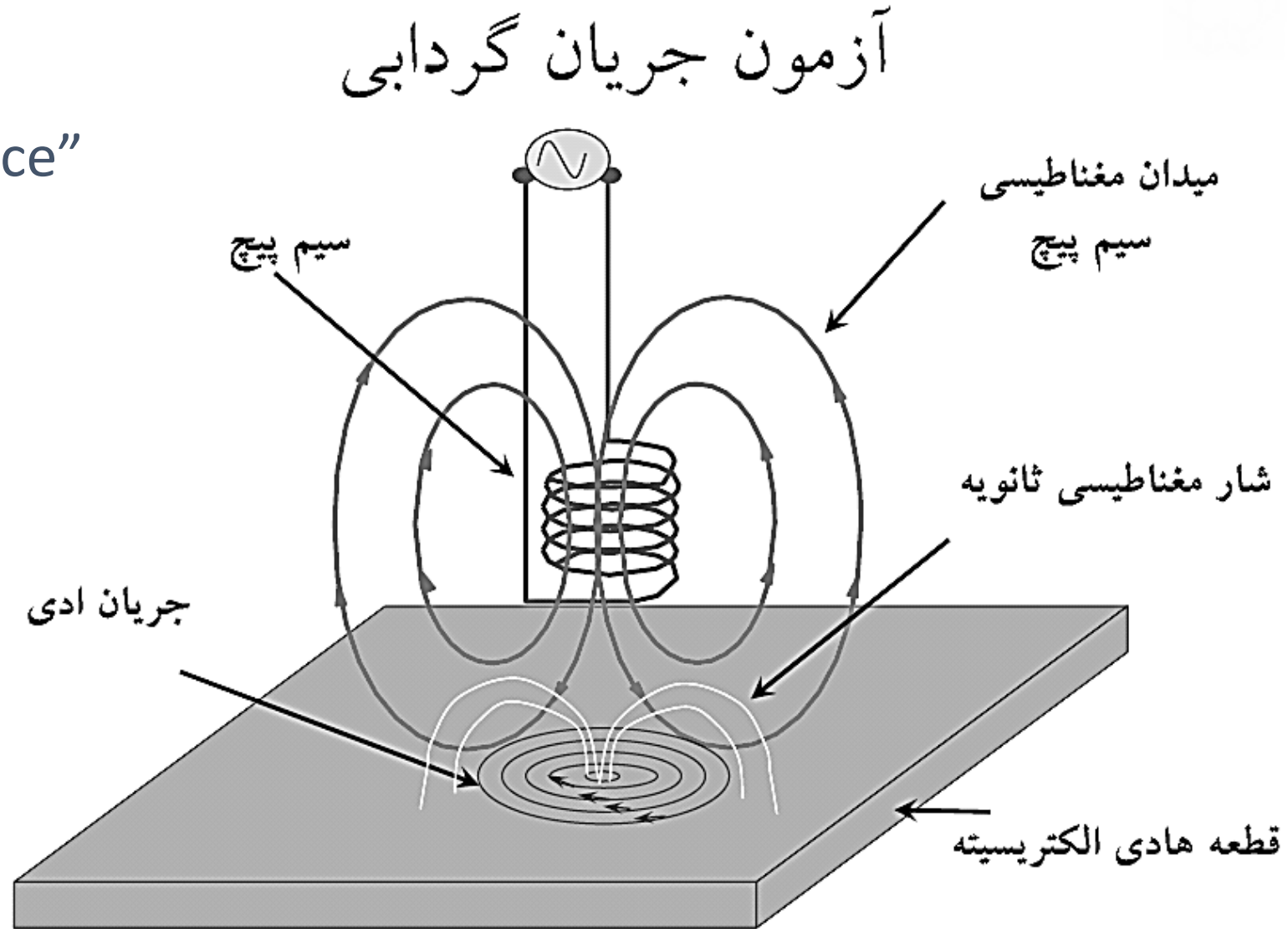
اصول کلی

- روش جریان گردابی بر اساس القای جریانهای بسته بر روی سطح جسم عمل مینماید.
- برای القای جریان گردابی بر روی جسم، لازم است که جسم هادی الکتریسیته باشد.
- جریانهای القایی به علت تغییر یک میدان الکترومغناطیسی نزدیک به قطعه ایجاد میشوند.
- جریانهای القایی نیز به نوبه خود میدانهای مغناطیسی متناظری تولید مینمایند که باید توسط پیچه یا حسگری اندازه گیری شود.

مقدمه

- 1830 - شناسایی جریانهای گردابی توسط دانشمند فرانسوی
J. B. Foucault
- 1864 - مبانی روش جریان گردابی بر اساس معادلات
ماکسول استوار است که معادلات پیچیده ای بوده و فقط در
شرایط خاص حل تحلیلی دارند.
- 1879 - اولین استفاده از جریانهای گردابی در **NDT** توسط
D. E. Hughes
- 1950s - استفاده سیستماتیک از آزمون غیرمخرب جریان
گردابی (ET) توسط Dr. Federico Förster

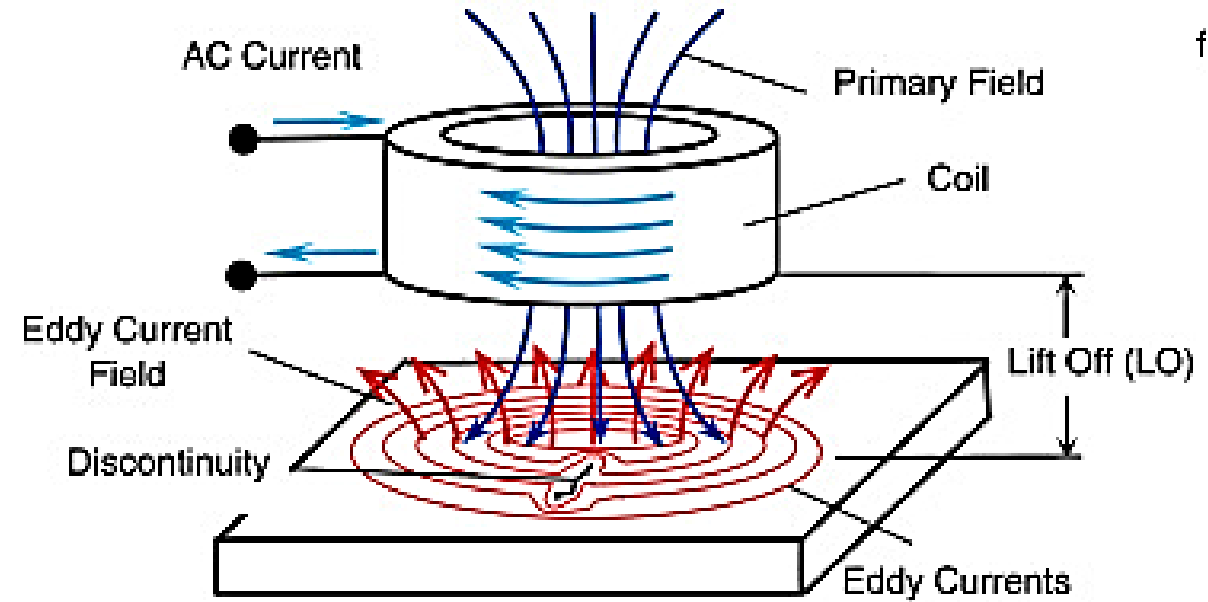
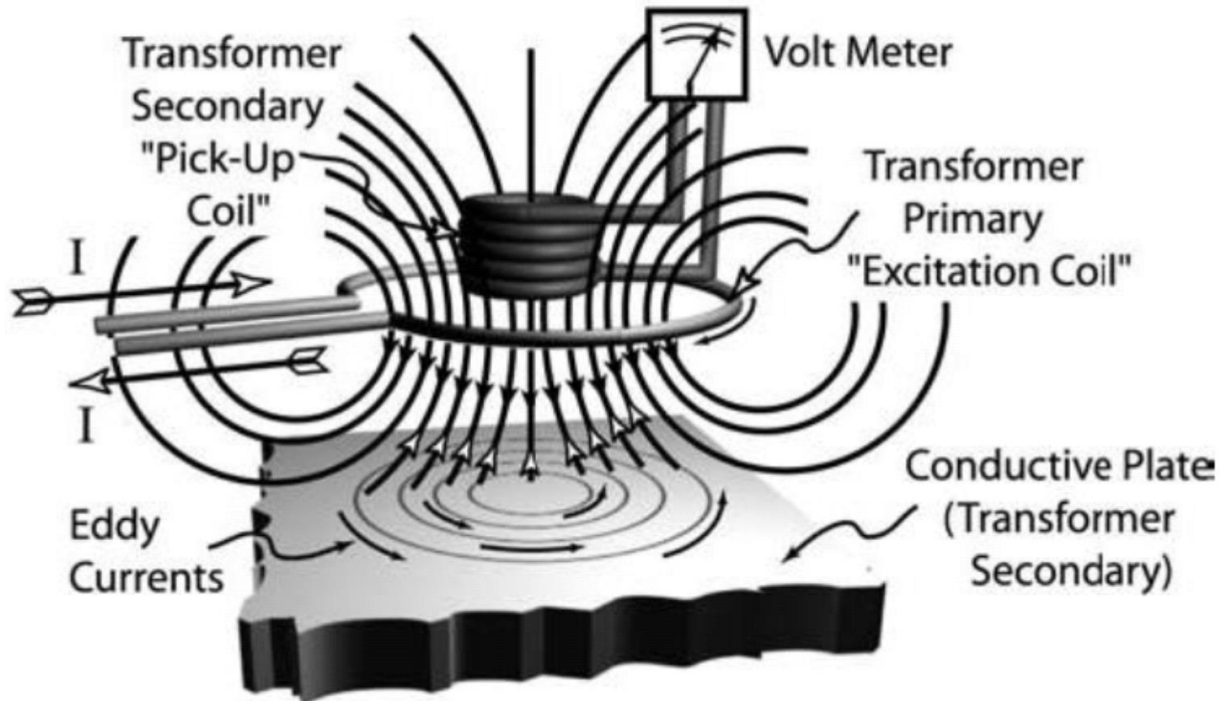
ET is a “reference”
type inspection



Advanced NDT

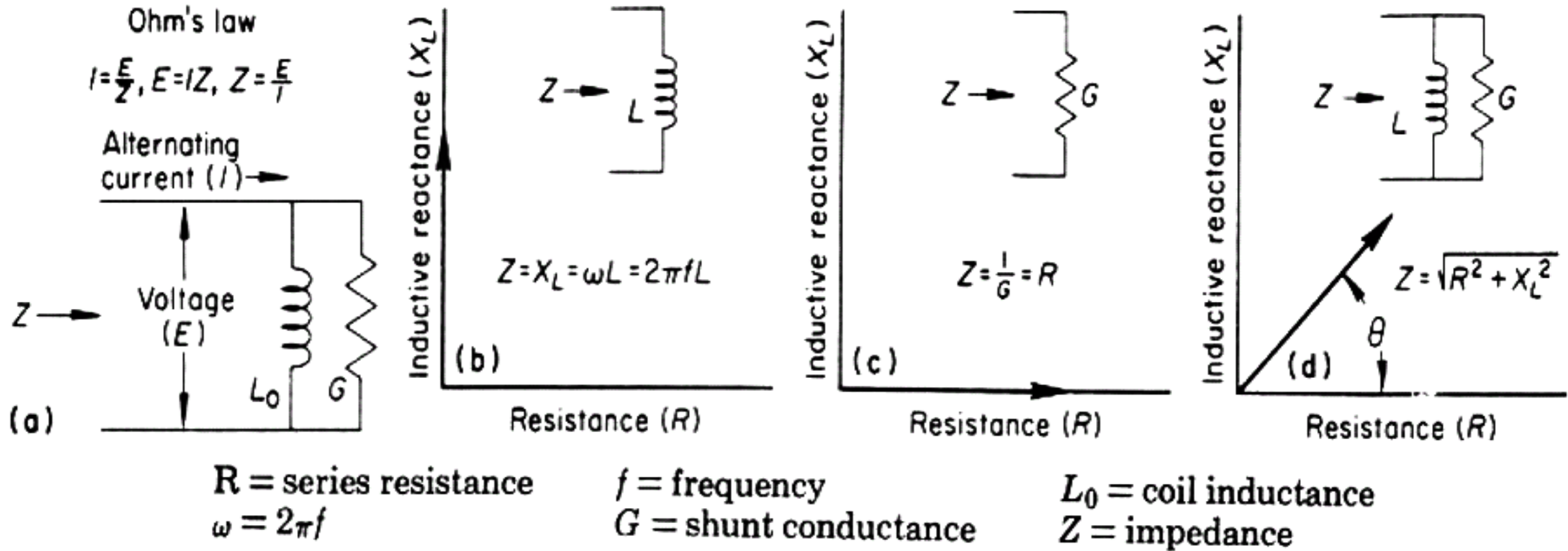
از این روش برای تشخیص ناپیوستگی در قطعاتی که رسانای الکتریسیته هستند، استفاده می شود. جریان گردابی، جریان الکتریکی در گردشی است که توسط یک میدان مغناطیسی متناوب در یک ماده رسانا القا می شود. یک سیم پیچ از سیم مسی در یک نگهدارنده به نام "پروب" قرار می گیرد. پروب، میدان مغناطیسی متناوب مورد استفاده در ET را تولید می کند. جریان های گردابی القا شده، بسته به خواص قطعه مانند هدایت الکتریکی، نفوذپذیری مغناطیسی، هندسه و وجود ناپیوستگی از نظر بزرگی و توزیع متفاوت است. جریان گردابی ایجاد شده در قطعه یک میدان مغناطیسی ثانویه ایجاد می کند که عکس جهت میدان اولیه است. هرگونه تغییری در میدان ثانویه باعث تغییر امپدانس سیم پیچ و در نتیجه تغییر جریان درون آن می شود. هنگامی که جریان های گردابی با مانعی مانند ترک برخورد می کنند، مسیر طبیعی و قدرت جریان ها تغییر می کند. این تغییر بر روی یک نمایشگر یا یک متر تشخیص داده می شود. ET یک بازرسی از نوع "مرجع" است. اصطلاح "مرجع" به این معنی است که یک استاندارد برای راه اندازی تجهیزات استفاده می شود. نتایج فقط به خوبی استاندارد(های) مرجع استفاده شده است. برای تشخیص عیب، حداقل سه نقص در اندازه های مختلف برای راه اندازی توصیه می شود. این سه نقص نشان دهنده یک روش استانداردسازی نزدیک تر برای قابلیت اطمینان بازرسی و احتمال تشخیص (POD probability of detection) است. استانداردهای کالیبراسیون نیز برای اندازه گیری ضخامت و تست رسانایی استفاده می شود.

آزمون جریان گردابی



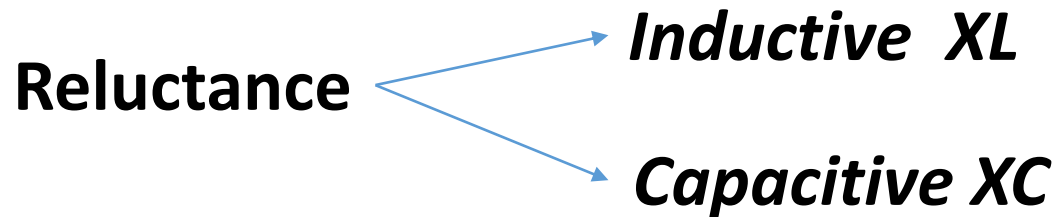
a) Generation of eddy currents

Impedance plane



Advanced NDT

Resistance	R	مقاومت اهمی
Reluctance	X	مقاومت غیر اهمی
Impedance	Z	مقاومت ظاهری



$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z = (X_L^2 + R^2)^{1/2}$$

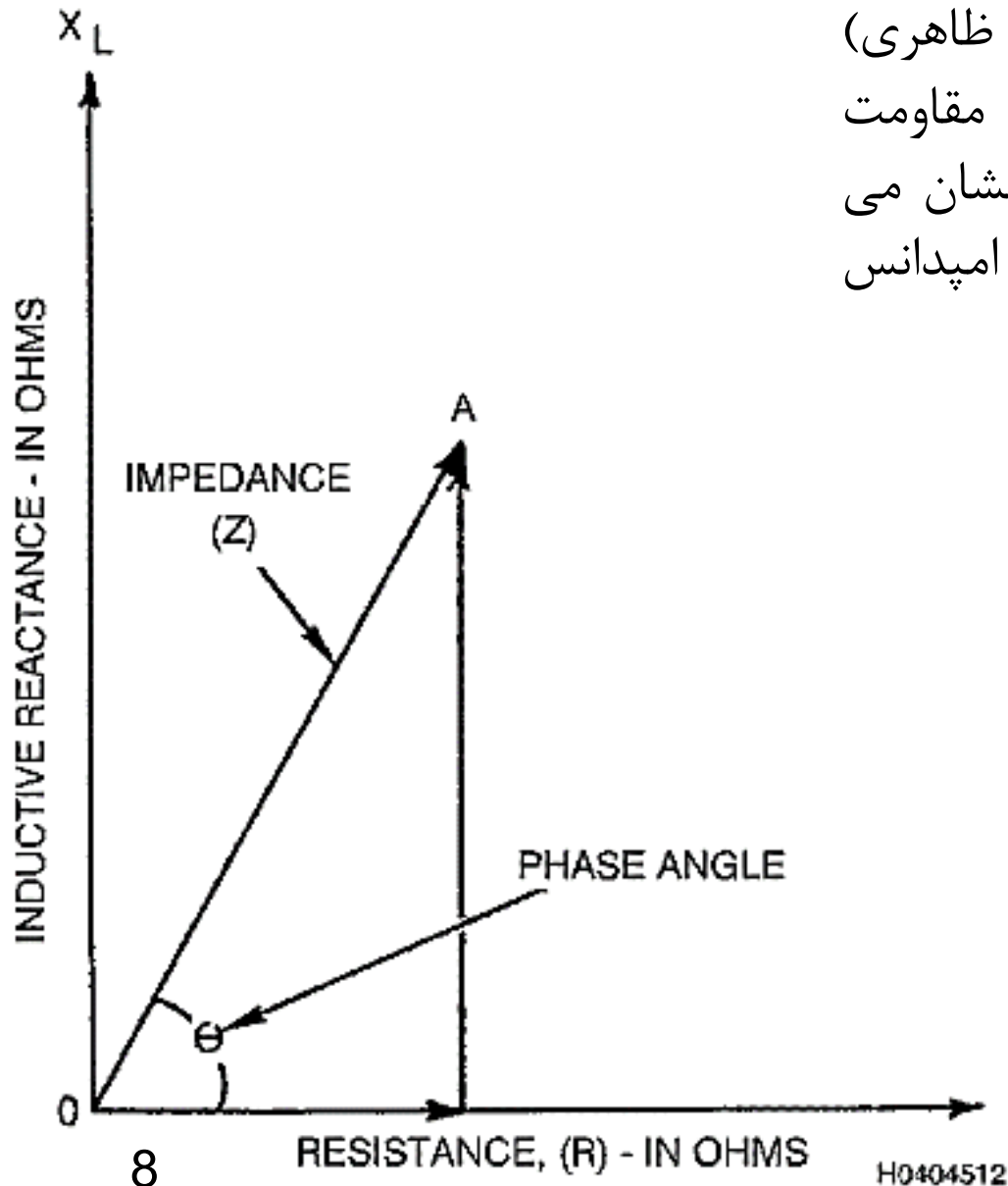
Z = Impedance magnitude (ohms)

X_L = Inductive reactance (ohms)

R = Resistance (ohms)

$X_C = 0$ Capacitive reactance is negligible.

مقاومت اهمی و القایی را می توان برای تولید امپدانس خالص (مقاومت ظاهری) یک سیم پیچ ترکیب کرد. مقاومت القایی (X_L) بر روی محور Y و مقاومت اهمی (R) در امتداد محور X رسم شده است. بردار OA امپدانس را نشان می دهد. زاویه فاز " θ " میزان خارج از فاز out of phase است. برای امپدانس القایی به تنهایی 90° است و مقاومت اهمی 0° می باشد.



$$\tan \theta = X_L / R$$

θ = Phase angle (degrees)

X_L = Inductive reactance (ohms)

Advanced NDT

$$L = n \Phi / I$$

L = Inductance (Henrys)

n = Number of turns in coil

Φ = Magnetic flux (Webers)

I = Current through coil (Amperes)

$$X_L = 2\pi fL = \omega L$$

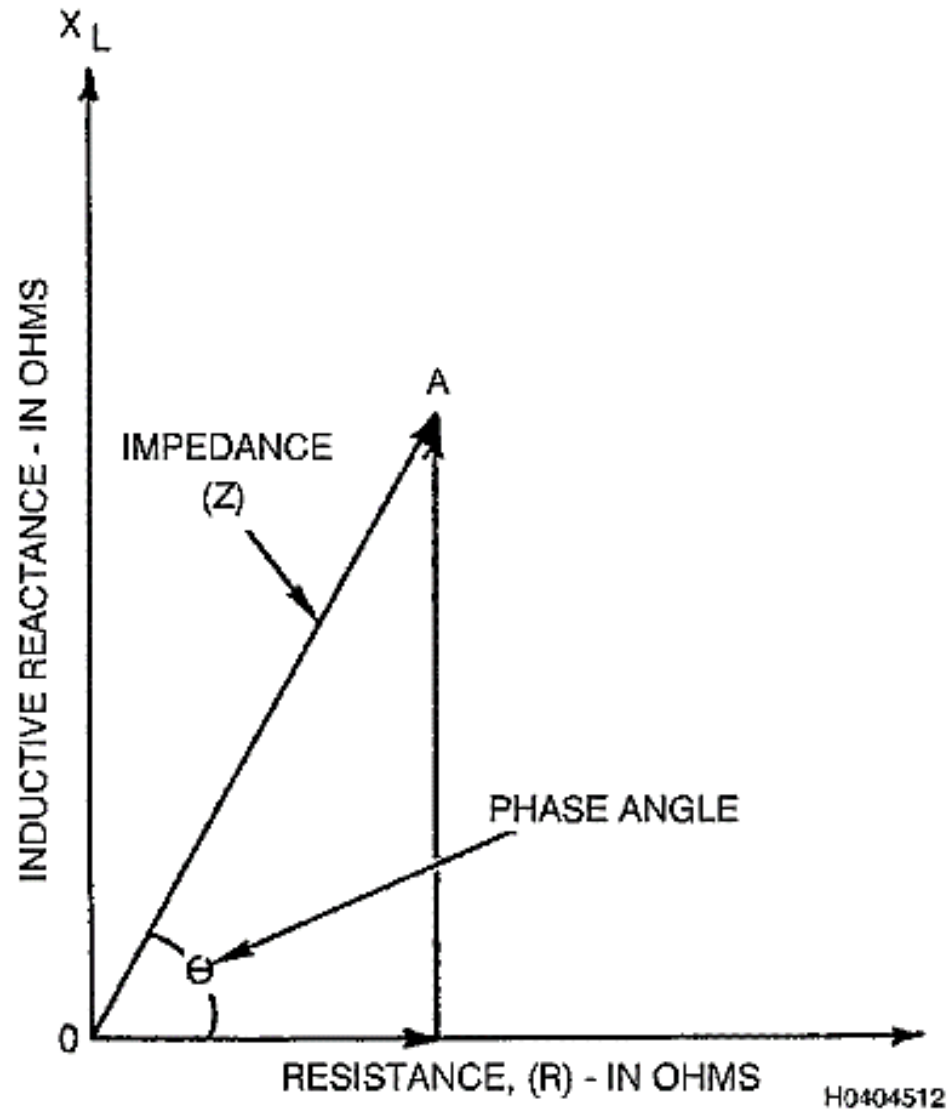
X_L = Inductive reactance (Ohms)

π = 3.141596

f = frequency (Hertz)

L = Inductance (Henrys).

Advanced NDT



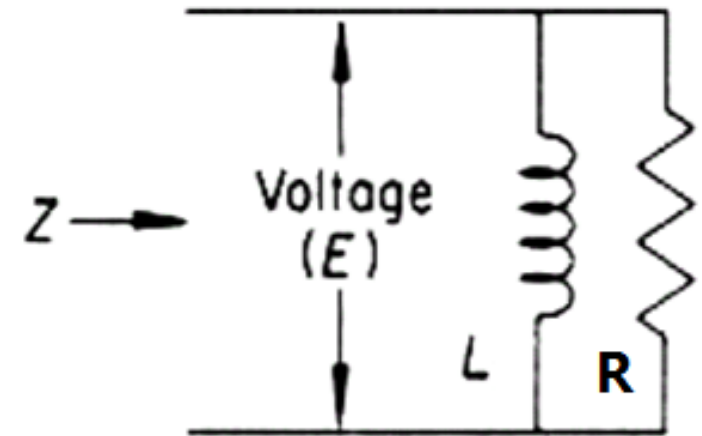
$$Z = R + jX_L = R + j\omega L = re^{i\theta}$$

$$r = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

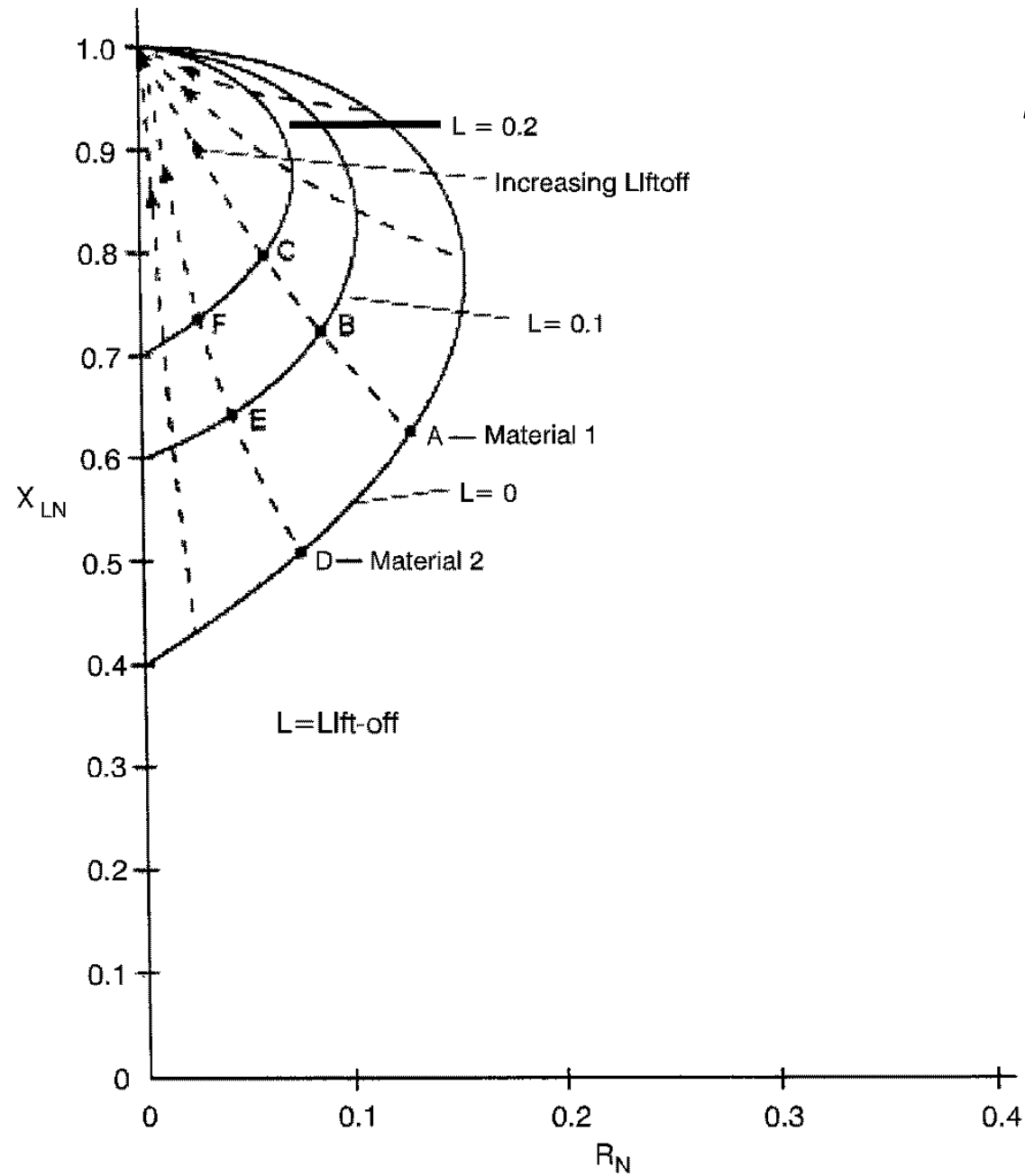
$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L}$$

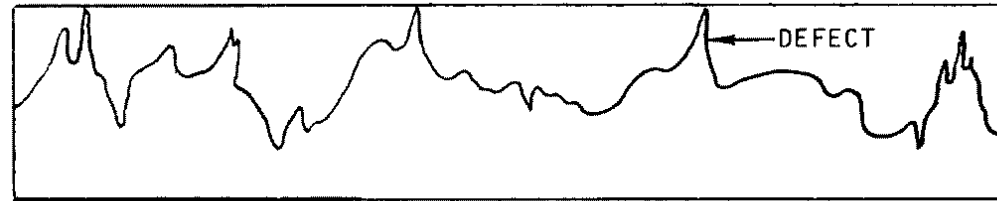
$$Z = \frac{(R - j\omega L)j\omega LR}{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$= \frac{R(\omega L)^2}{R^2 + (\omega L)^2} + j \frac{\omega LR^2}{R^2 + (\omega L)^2}$$

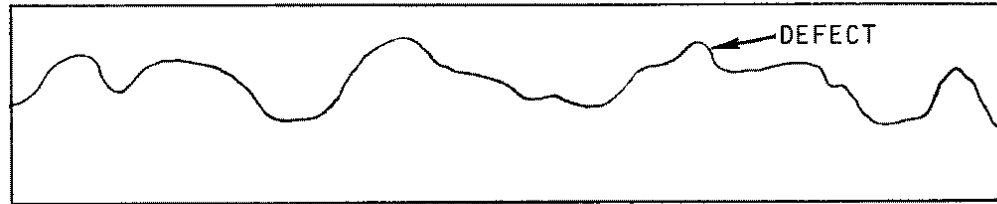


$$E = Zi$$

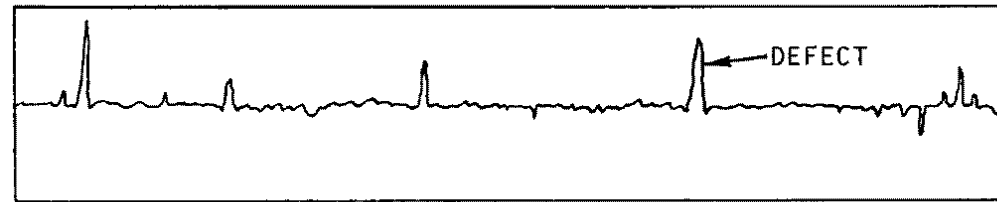




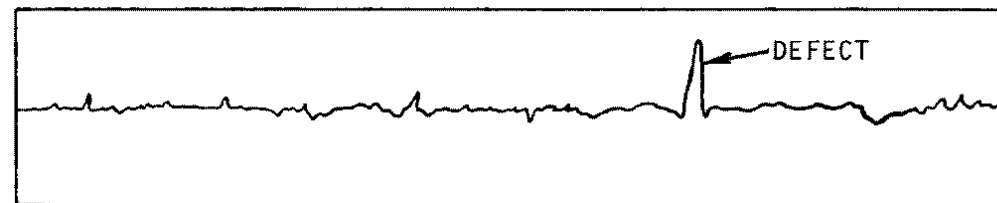
UNFILTERED DC SIGNAL



LOW PASS FILTERED DC SIGNAL

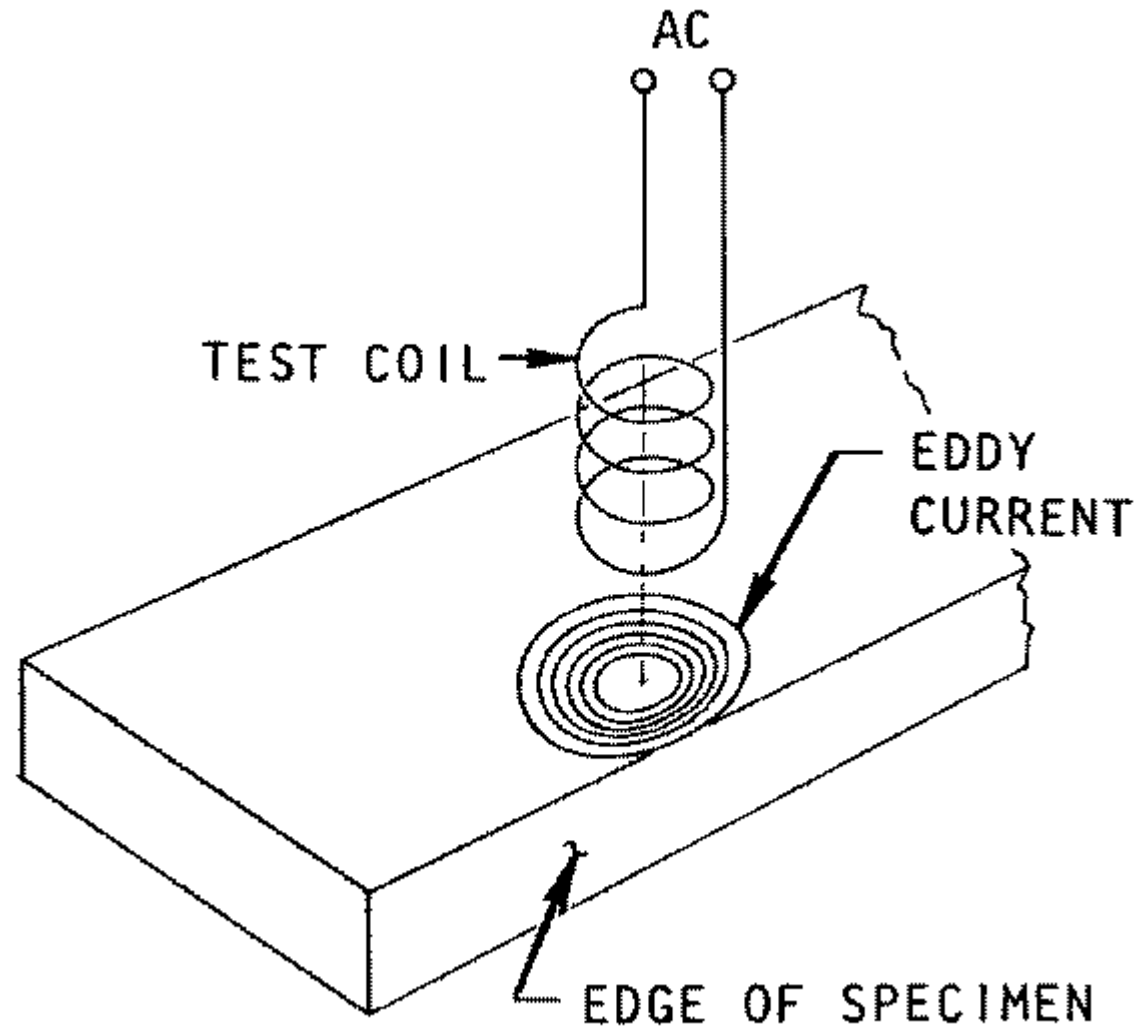


HIGH PASS FILTERED DC SIGNAL

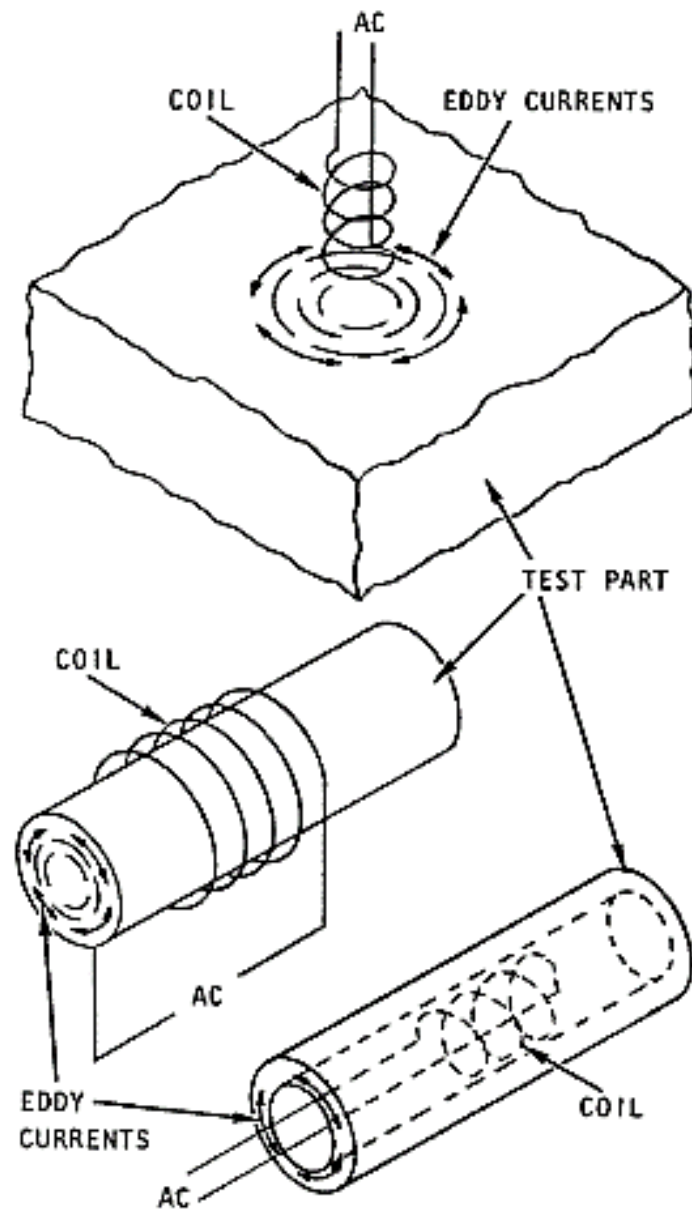


BAND PASS FILTERED DC SIGNAL

***Edges (Including
Corners and Radii)***

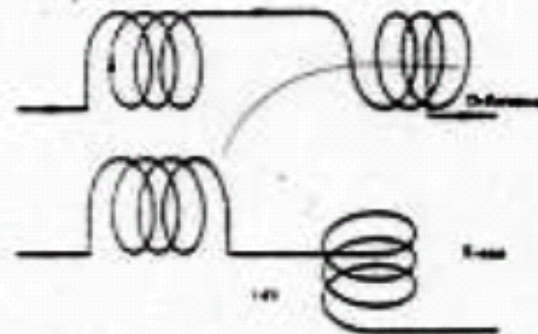
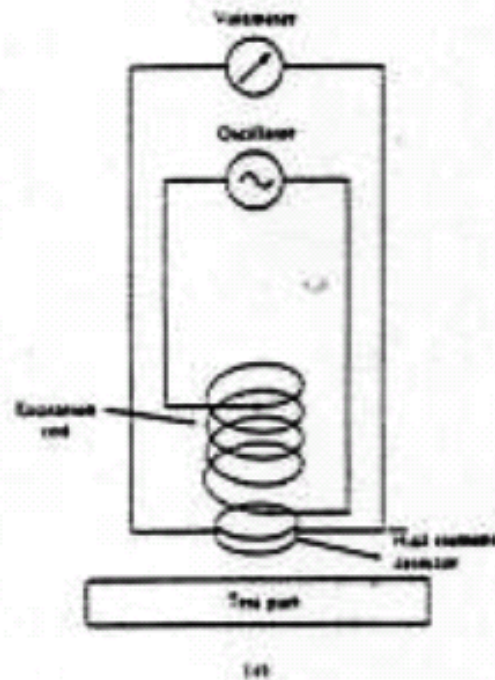
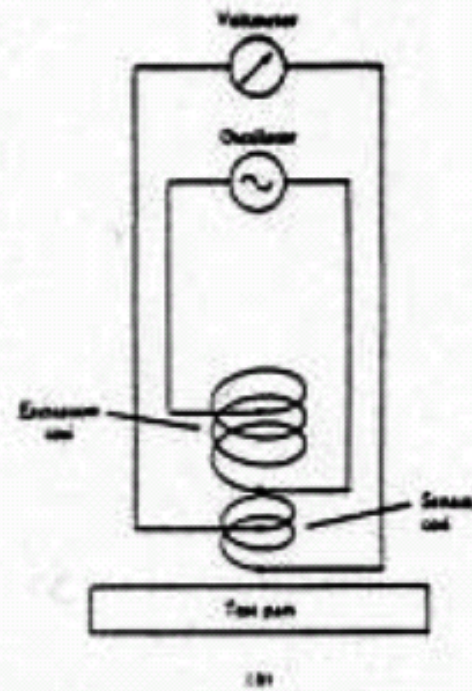
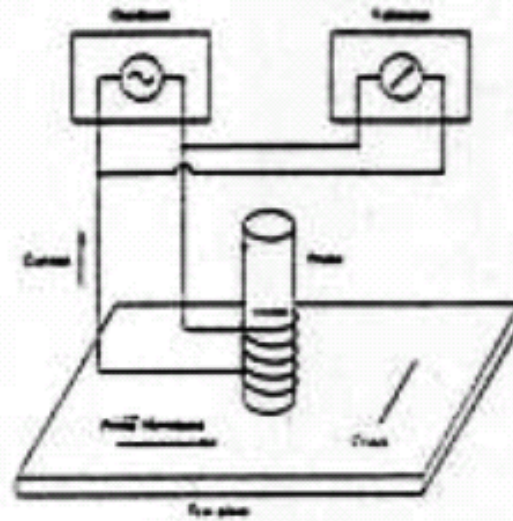


H0404536



H3404542

Advanced NDT



محدوده فرکانس در ET بین 5 تا 500 هرتز برای RFEC و بین 1 کیلوهرتز تا 2 مگاهرتز برای بازرسی مواد غیرآهنی است.

عوامل موثر در آزمون جریان گردابی

■ عوامل الکترومغناطیس (عمق نفوذ را معین میکند)

□ فرکانس منبع (excitation frequency)

□ هدایت الکتریکی قطعه (conductivity)

□ تراوایی مغناطیس قطعه (permeability)

■ عوامل فیزیکی

□ شعاع پیچه تحریک و شعاع پیچه گیرنده در قطعات گرد

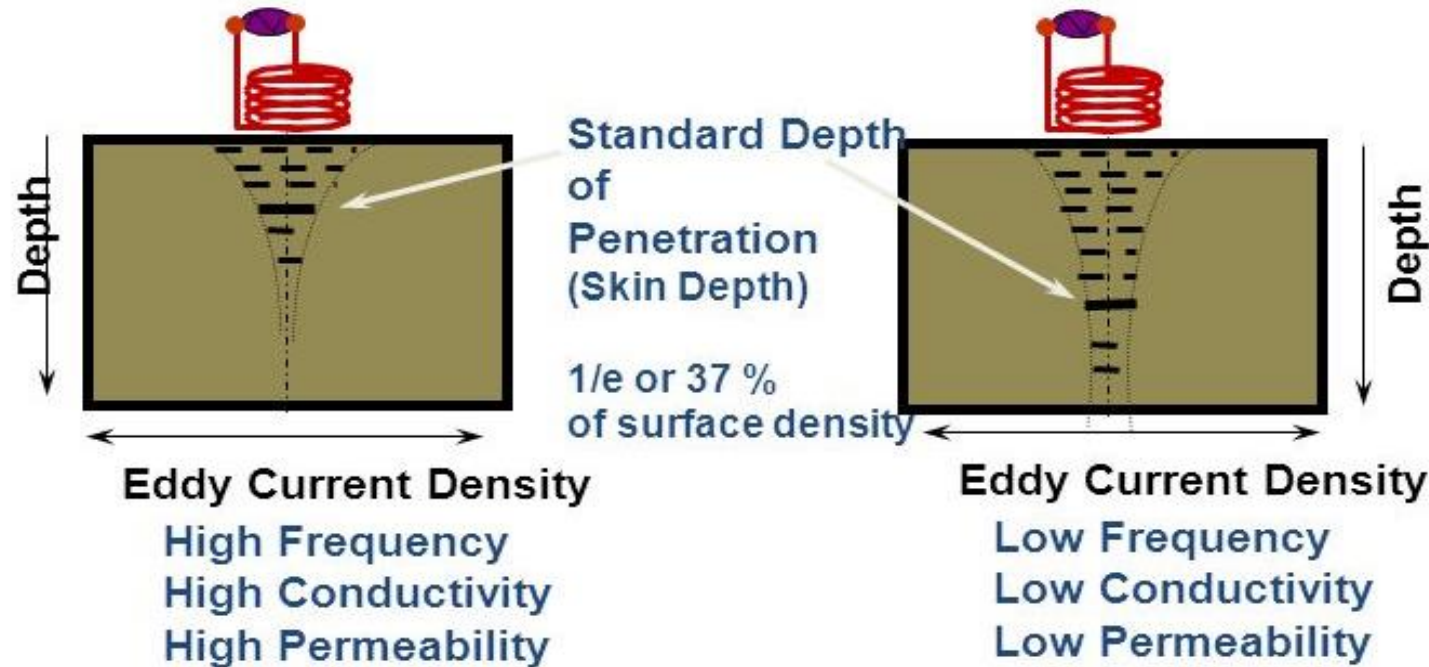
□ تعداد دور حلقه های پیچه

□ میزان نزدیکی پیچه تحریک یا پیچه گیرنده به قطعه (lift-off)

□ ابعاد قطعه نظیر ضخامت و یا شعاع

□ نزدیکی سیستم به لبه های قطعه

عمق نفوذ استاندارد



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

Where:

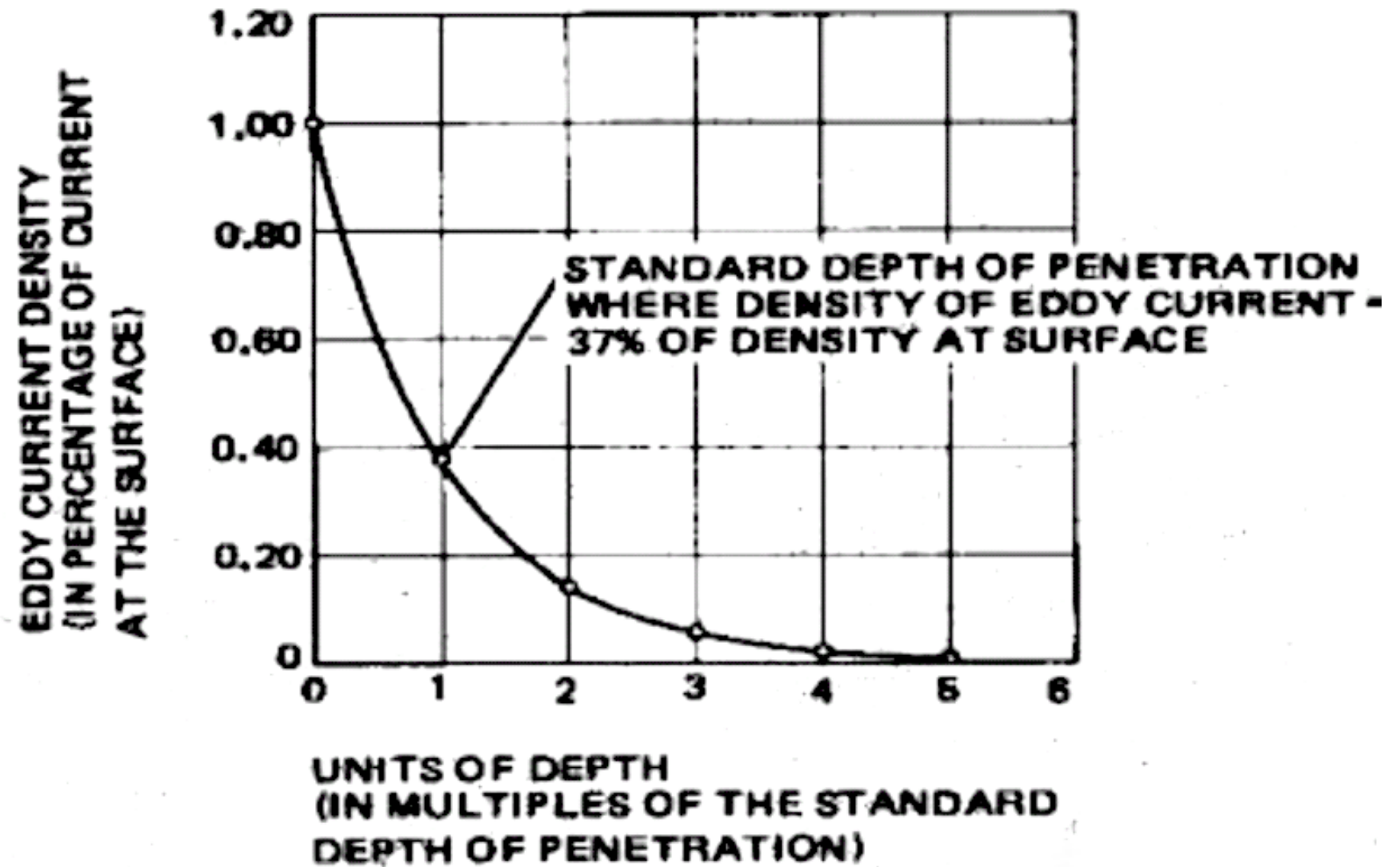
d = Standard Depth of Penetration (mm)

pi = 3.14

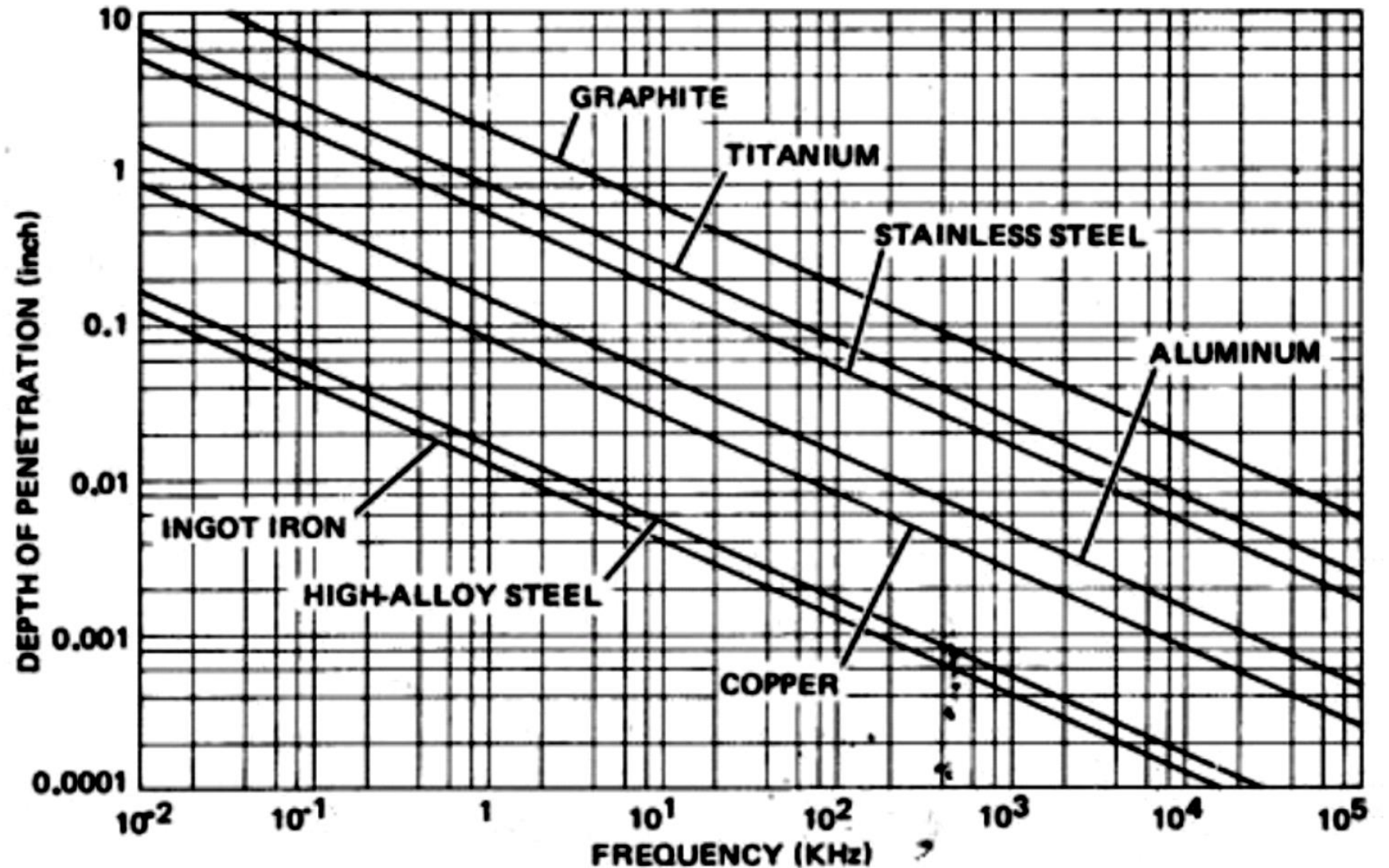
f = Test Frequency (Hz)

μ = Magnetic Permeability (H/mm)

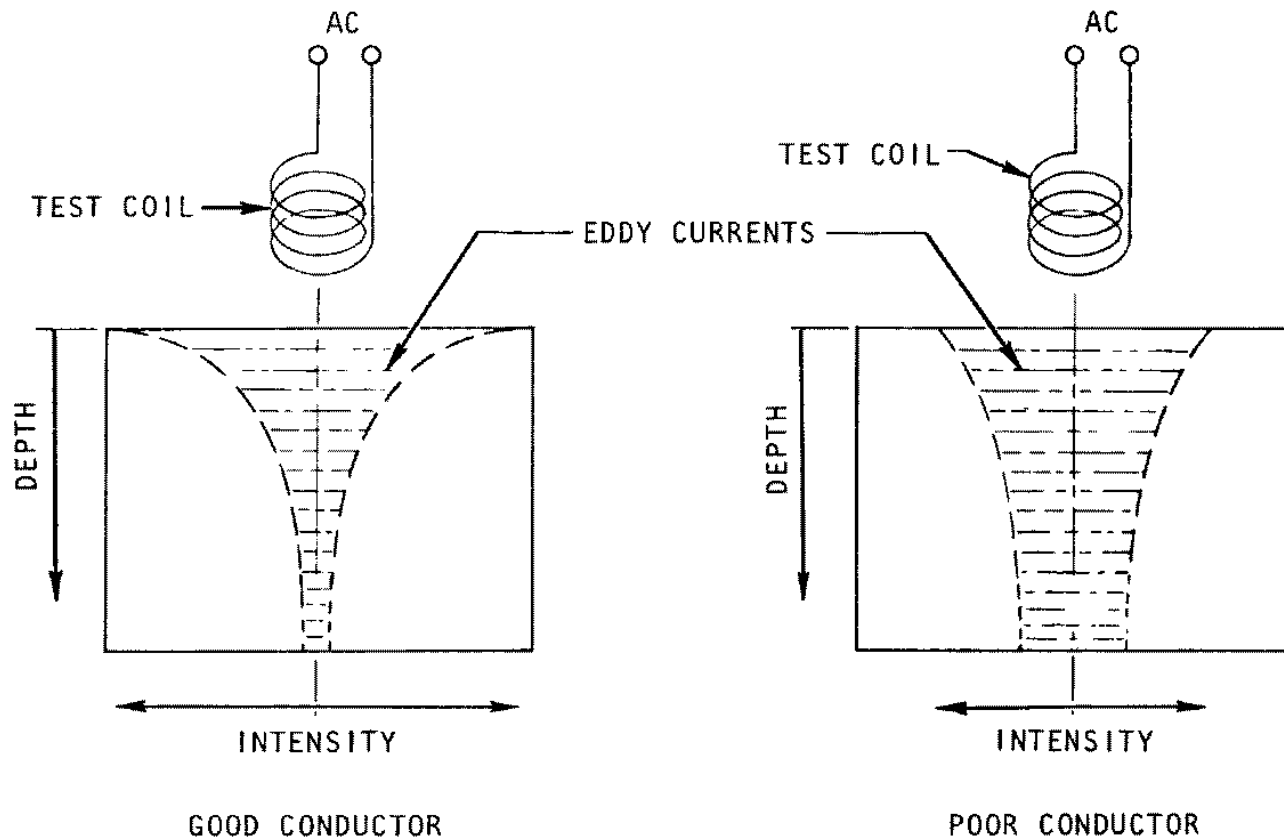
σ = Electrical Conductivity (% IACS)



رابطه عمق نفوذ و فرکانس تحریک

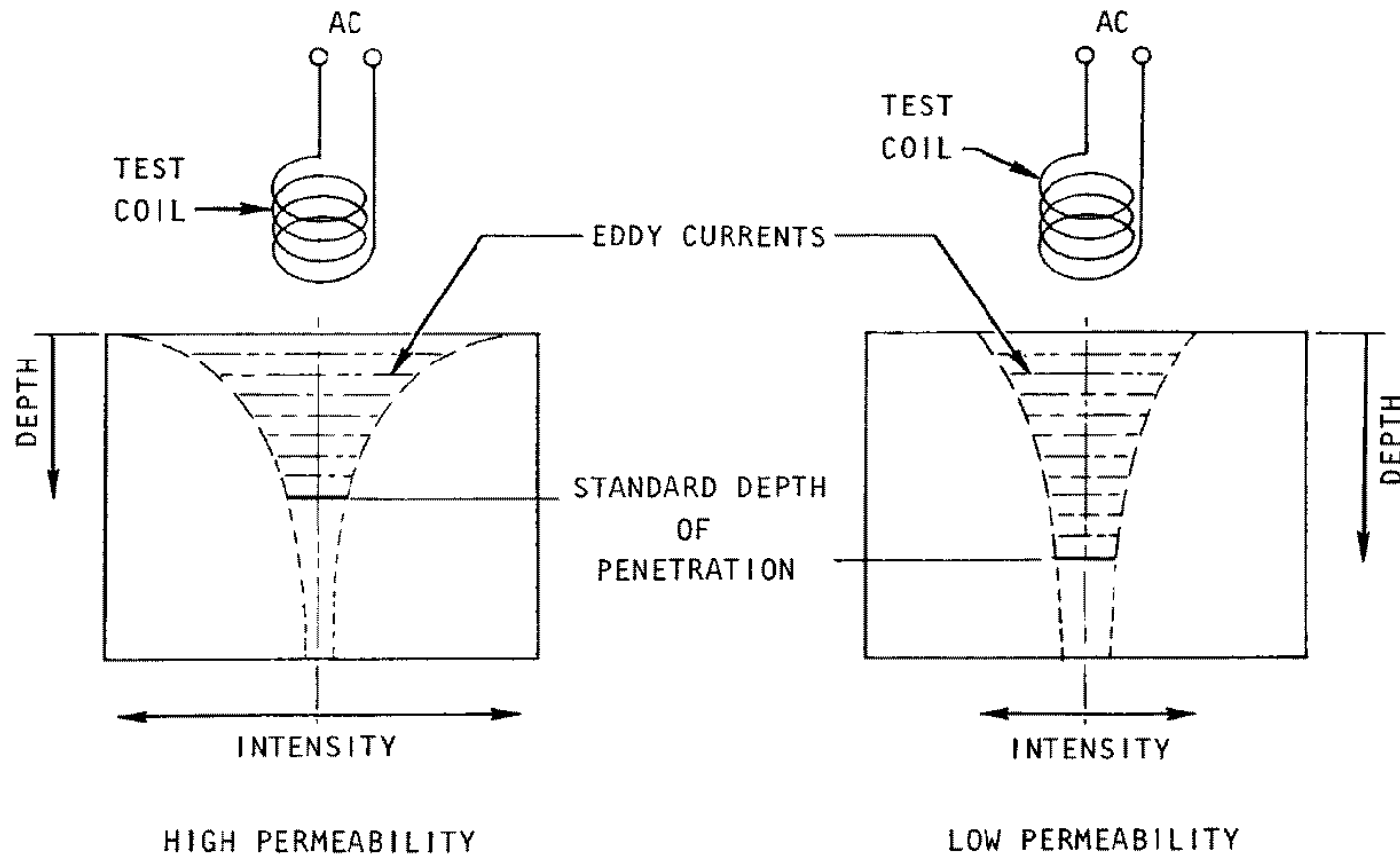


اثر رسانایی بر جریان های گردابی



توزیع و شدت جریان های گردابی در مواد غیر فرومغناطیسی به شدت تحت تأثیر هدایت الکتریکی قرار دارد. در ماده ای با رسانایی نسبتاً بالا، جریان های گردابی قوی در سطح ایجاد می شود. به نوبه خود، جریان های گردابی قوی یک میدان الکترومغناطیسی ثانویه قوی را در مقابل میدان اولیه اعمال شده تشکیل می دهند. در نتیجه، با افزایش عمق در زیر سطح، قدرت میدان اولیه به سرعت کاهش می یابد. در مواد رسانای ضعیف، میدان اولیه مقدار کمی جریان گردابی تولید می کند که میدان ثانویه مخالف کوچکی را تولید می کند. بنابراین، در مواد با رسانایی بالا، جریان های گردابی قوی در نزدیکی سطح ایجاد می شود، اما قدرت آنها به سرعت با عمق کاهش می یابد. در مواد رسانای ضعیف، جریان های گردابی ضعیف تری در نزدیکی سطح ایجاد می شود، اما به اعماق بیشتری نفوذ می کنند.

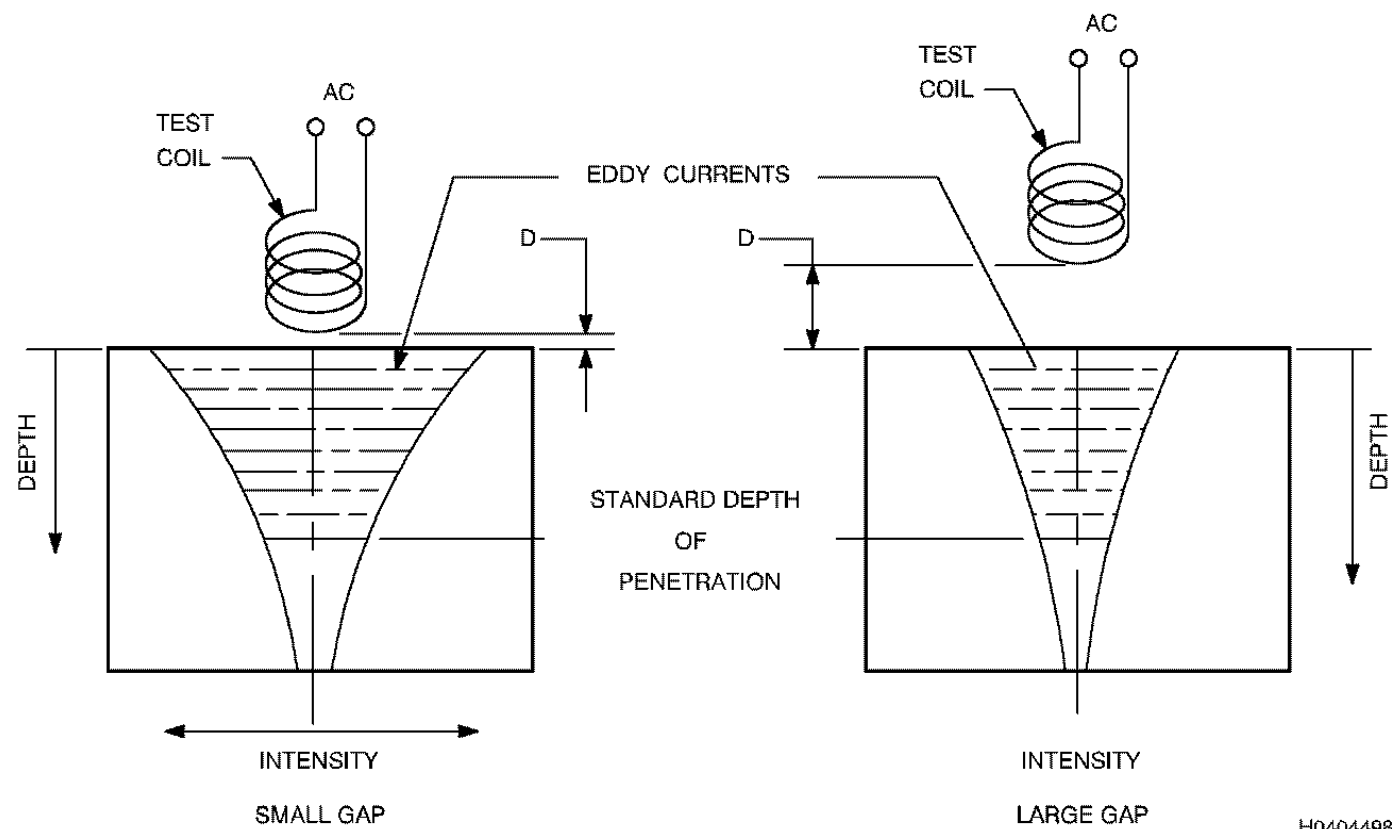
اثر نفوذ پذیری (تراوایی) مغناطیسی بر جریان های گردابی



H0404497

آزمایش جریان گردابی قطعات فرومغناطیسی معمولاً محدود به آزمایش عیوبی است که در سطح قطعه یا بسیار نزدیک به آن وجود دارد. در یک ماده فرومغناطیسی، در مقایسه با یک ماده غیر فرومغناطیسی، میدان اولیه به دلیل نفوذپذیری مغناطیسی نسبی زیاد، میدان ثانویه بسیار قویتری ایجاد می کند. افزایش قدرت میدان در سطح منجر به افزایش چگالی جریان گردابی می شود. افزایش چگالی جریان گردابی میدان ثانویه بزرگتری ایجاد می کند که به سرعت قدرت میدان کلی را در فاصله کوتاهی از سطح کاهش می دهد. در نتیجه، عمق نفوذ موثر در طول ET در مواد فرومغناطیسی بسیار کمتر از سایر مواد رسانا است. نفوذپذیری مغناطیسی نسبی بالا به عنوان یک ممانعت کننده در برابر تولید جریان های گردابی در زیر سطح عمل می کند.

خیز lift off

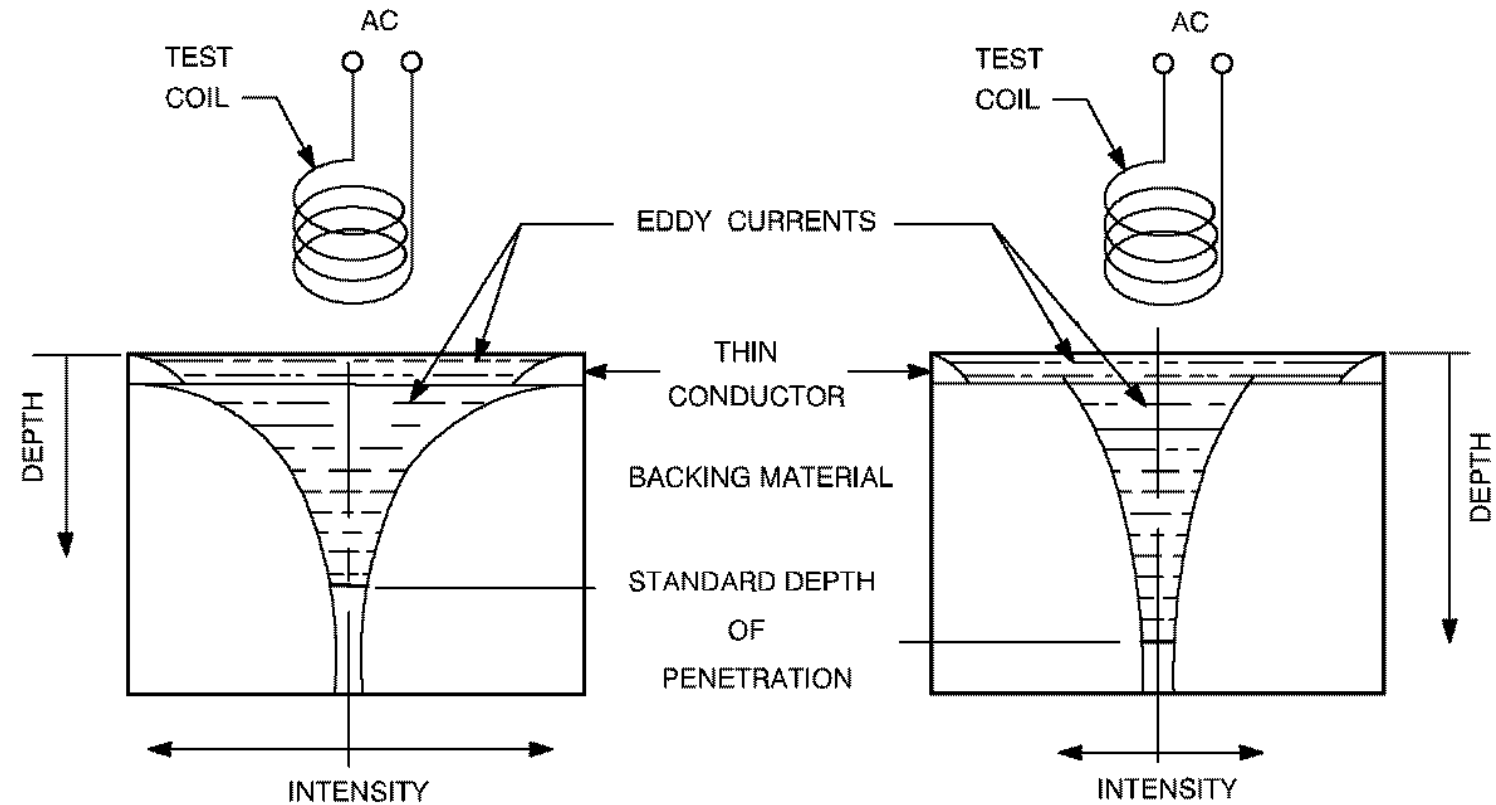


هنگامی که پروب جریان گردابی نزدیک یک قطعه رسانا قرار می‌گیرد، تغییری در سیگنال مشاهده خواهید کرد. هنگامی که پروب نزدیک سطح است، یک تغییر سیگنال مشخص در پاسخ به یک تغییر کوچک در فاصله بین سیم پیچ پروب و قطعه مشاهده خواهد شد. این اثر «خیز» نامیده می‌شود. تغییر سیگنال به این دلیل رخ می‌دهد که شدت جریان‌های گردابی در قطعه با افزایش جزئی در فاصله سیم پیچ به قطعه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. برای تعیین ضخامت پوشش‌های نارسا بر روی قطعات رسانا می‌توان از اندازه‌گیری‌های کالیبره شده خیز استفاده کرد.

ضخامت مواد

Material Thickness

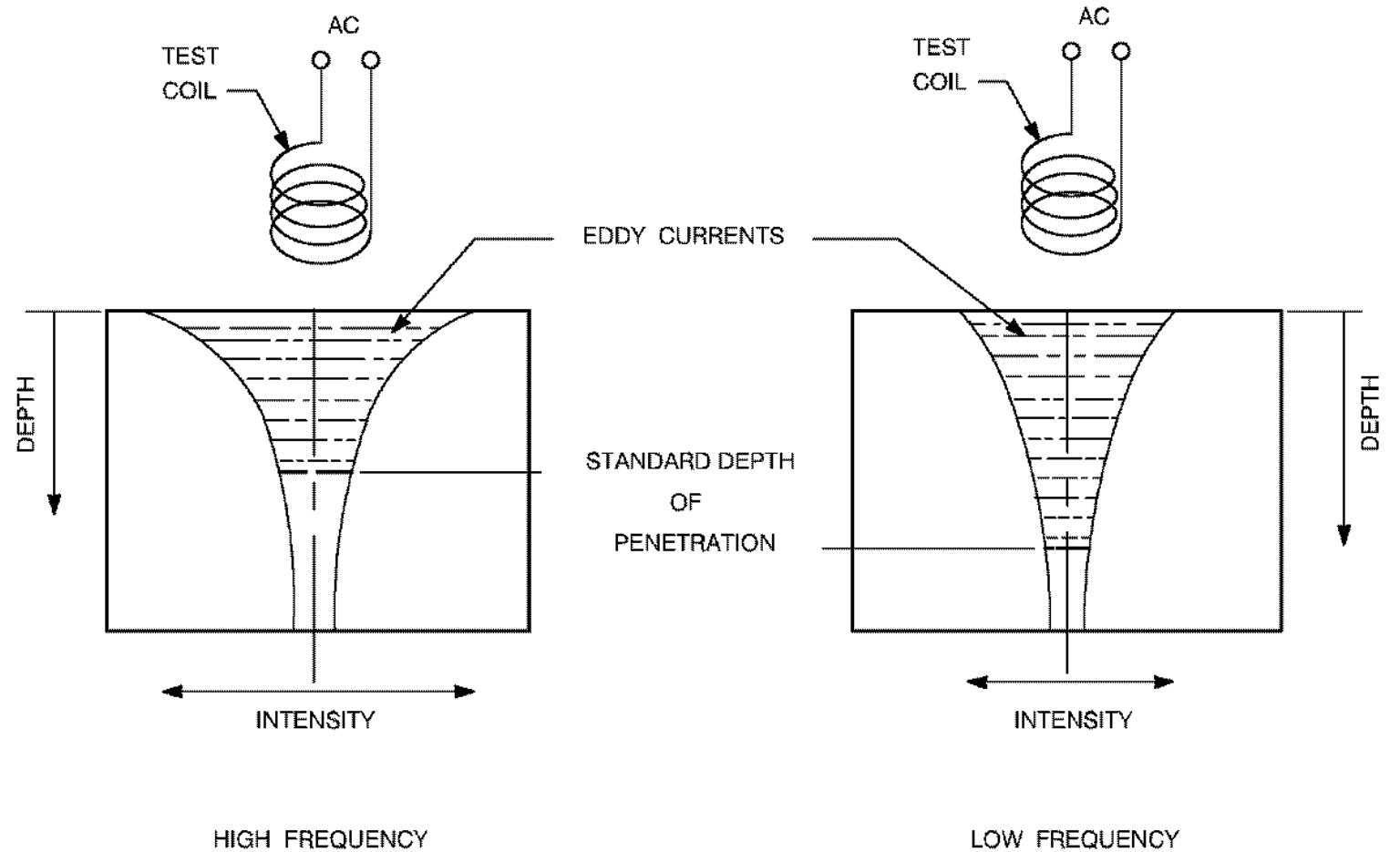
توزیع جریان های گردابی در رساناهای نازک با سطح پشتی با رسانایی متفاوت.



H0404499

در ورق با ضخامت کمتر از عمق نفوذ موثر، میدان الکترومغناطیسی در سطح پشتی صفر نیست. با کاهش/افزایش ضخامت ورق، میدان در سطح پشتی افزایش/کاهش می یابد. این مکانیسمی برای ضخامت سنجی ورق نازک فراهم می کند. علاوه بر این، ماده ای با رسانایی کمتر یا بالاتر در سطح پشتی، مقدار و توزیع جریان های گردابی را، تغییر می دهد. این وسیله ای برای ضخامت سنجی پوشش های نازک و رسانا بر روی مواد زیرینی که رسانایی بیشتر یا کمتر از پوشش دارند، فراهم می کند.

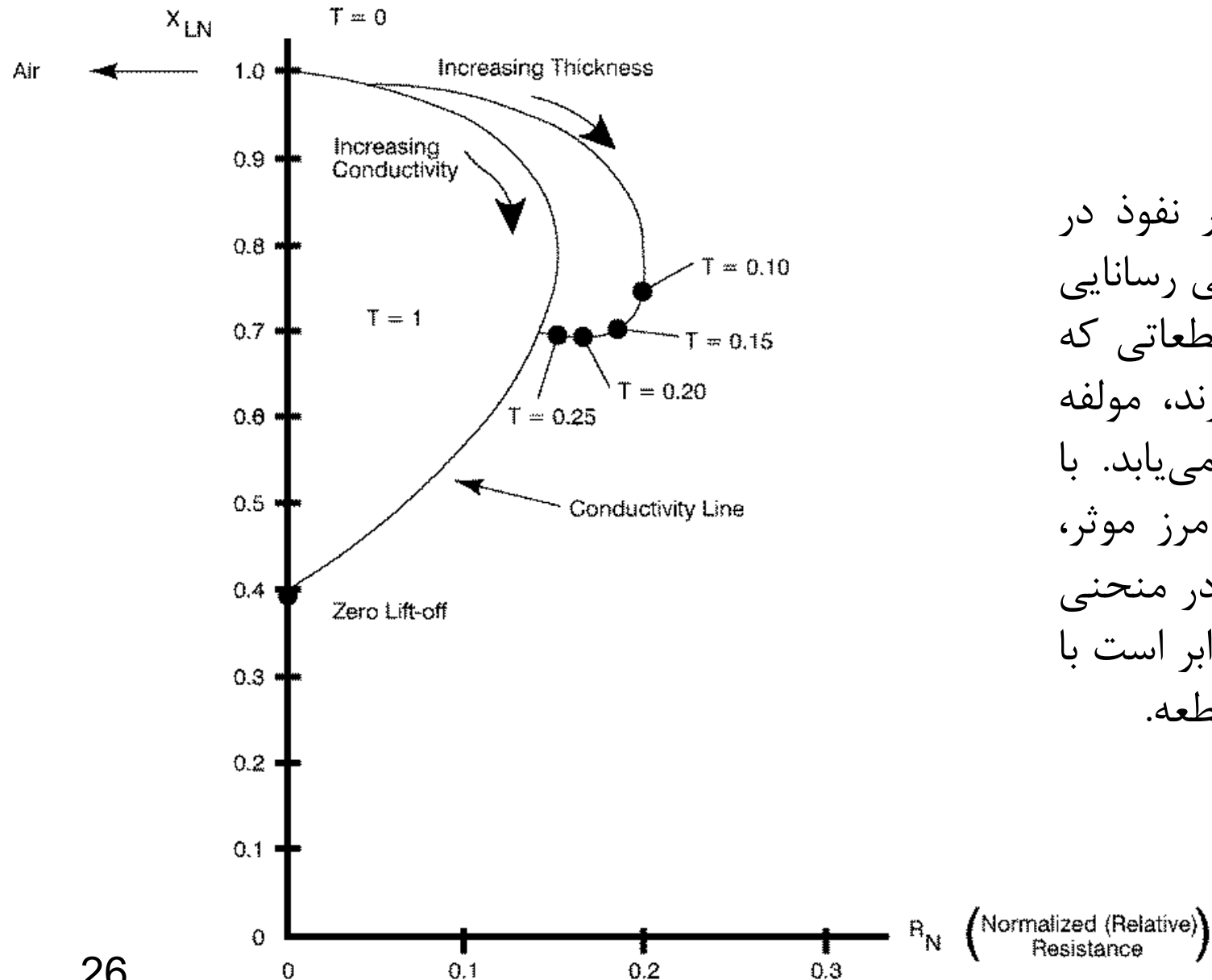
اثر فرکانس



H0404516

با افزایش فرکانس جریان القایی، مقدار جریان های گردابی القایی در قطعه افزایش می یابد. به نوبه خود، جریان های گردابی با شدت بالاتر، میدان مغناطیسی مخالف قوی تری ایجاد می کند و نفوذ میدان اولیه را کاهش می دهد. بنابراین، ثابت ماندن تمام عوامل دیگر، فرکانس های بالاتر منجر به عمق کمتر نفوذ می شود.

تغییرات ضخامت Thickness Variations



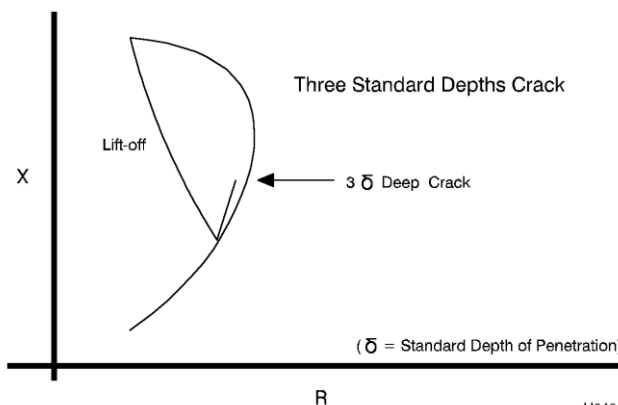
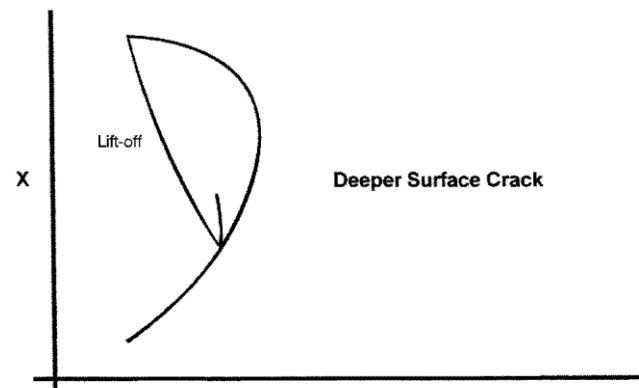
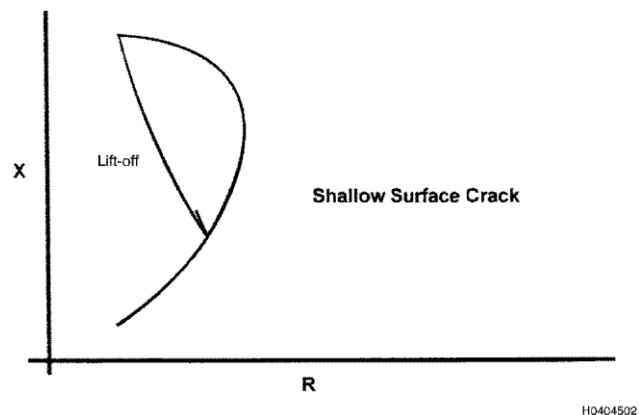
هنگامی که ضخامت قطعه کمتر از عمق موثر نفوذ در فرکانس بازرسی باشد، منحنی امپدانس از منحنی رسانایی خارج می شود. به طور معمول، در مقایسه با قطعاتی که ضخامتی برابر یا بیشتر از عمق موثر نفوذ دارند، مولفه مقاومتی امپدانس با قطعات نازکتر افزایش می یابد. با افزایش ضخامت قطعات و نزدیک تر شدن به مرز موثر، منحنی با نزدیک شدن به نقطه پایانی ($T=1$) در منحنی رسانایی به سمت مارپیچ می رود. که در آن T برابر است با نسبت ضخامت قطعه به عمق موثر نفوذ در آن قطعه.

تغییرات ضخامت

Thickness Variations

منحنی امپدانس برای لایه‌های رسانای نازک روی بستری با رسانایی متفاوت نیز به‌عنوان تغییر در منحنی امپدانس برای رسانایی نشان داده می‌شود. امپدانس برای مواد لایه ای از منحنی رسانایی در مقدار مربوط به رسانایی بستر خارج می شود و حلقه ای را تشکیل می دهد که در رسانایی فلز در لایه بیرونی دوباره به منحنی رسانایی می پیوندد. افزایش ضخامت لایه بیرونی مطابق با جهت عقربه های ساعت در امتداد حلقه است. نقطه ای که حلقه مجدداً به منحنی می پیوندد عمق مؤثر نفوذ در پوشش را نشان می دهد.

Advanced NDT



تشخیص ترک در مواد غیر فرومغناطیسی (ترک راه بدر)

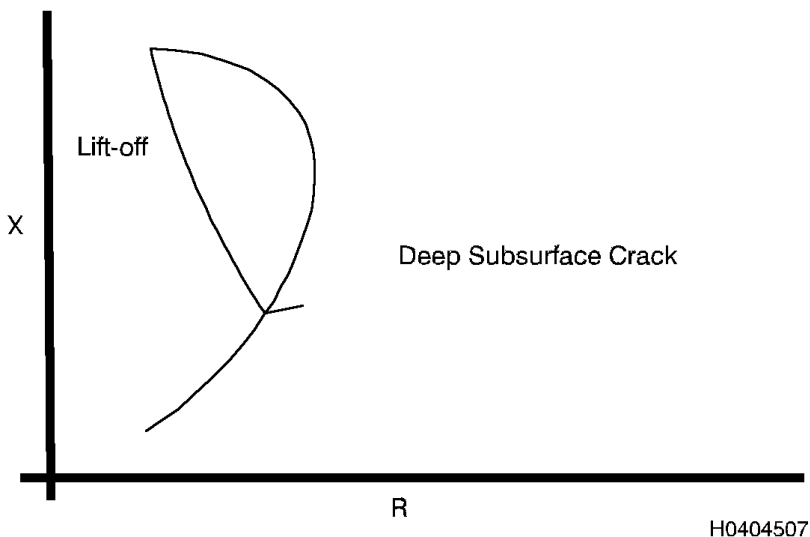
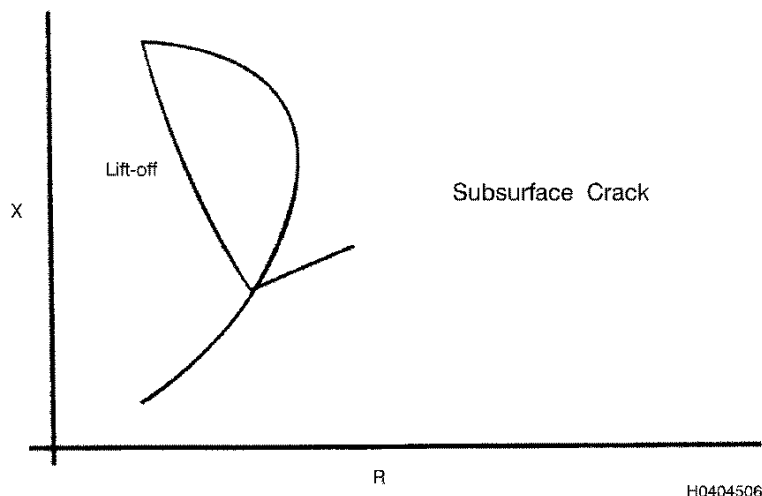
پاسخ یک ترک سطحی با عمیق تر شدن ترک افزایش می یابد. هنگامی که ترک به سه برابر عمق استاندارد می رسد اساساً تمام جریان گردابی را قطع می کند و با عمیق تر شدن آن هیچ افزایشی در دامنه مشاهده نمی شود.

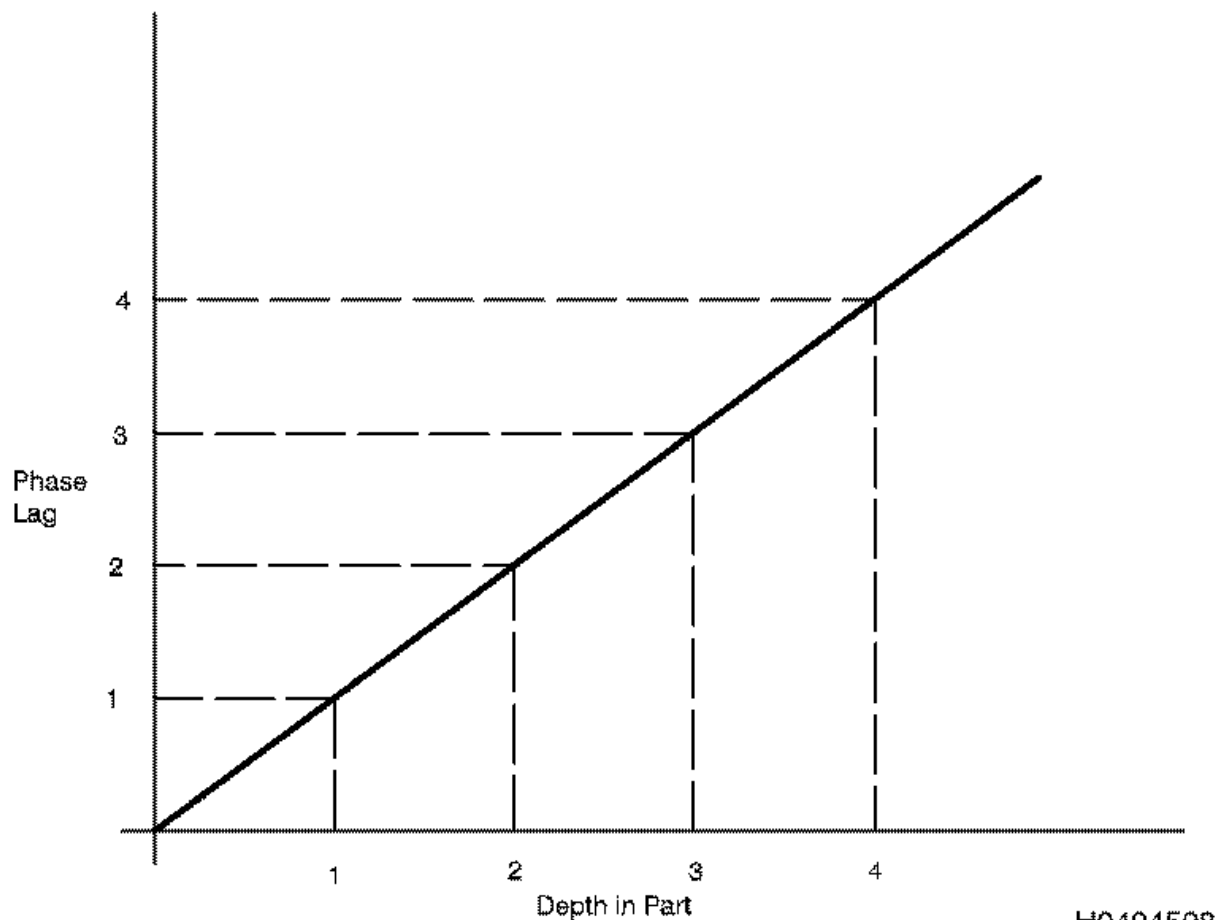
علاوه بر افزایش دامنه برای ترک های عمیق تر، زاویه فاز نشانگر ترک تغییر می کند. یک ترک کم عمق جریان گردابی را قطع می کند، بنابراین دامنه سیگنال آن کم است. همچنین، اساساً یک وضعیت سطحی است، بنابراین جهت (فاز) پاسخ سیگنال بسیار نزدیک به حالت خیز است. یک ترک عمیق تر جریان گردابی بیشتری را قطع می کند، بنابراین سیگنال آن دامنه بیشتری دارد. به خوبی زیر سطح گسترش می یابد، جهت (فاز) سیگنال آن دورتر از خیز است. ترک سه برابر عمق استاندارد بیشترین پاسخ دامنه را دارد. این ترکها جریانهای گردابی را تا جایی که آزمایش می تواند حس کند در فلز قطع می کند، و به نظر می رسد شبیه تغییر در خاصیت رسانایی مه مقادیر پایین تر است، و جهت سیگنال ترک (فاز) در امتداد منحنی رسانایی است.

ترک زیر سطحی

ترک عمیق تر در سه برابر عمق استاندارد پاسخ سیگنال را تغییر نمی دهد زیرا جریان گردابی برای قطع شدن آن وجود نخواهد داشت. با این حال، تغییر در پاسخ سیگنال برای یک ترک زیرسطحی وجود خواهد داشت. اول، جریان های گردابی از بالای ترک (در سطح) جریان می یابند، ترک زیرسطحی به همان اندازه جریان EC را مسدود نمی کند و دامنه سیگنال باید کاهش یابد. ثانیاً، ترک اکنون از سطح دورتر است، بنابراین زاویه فاز آن باید همچنان دورتر از منحنی خیز باشد.

پاسخ سیگنال با افزایش عمق ترک در زیر سطح کاهش می یابد. با دورتر شدن نقص زیرسطحی از سطح، دامنه سیگنال کوچک تر می شود و زاویه فاز در جهت عقربه های ساعت می چرخد، به دور از منحنی خیز.

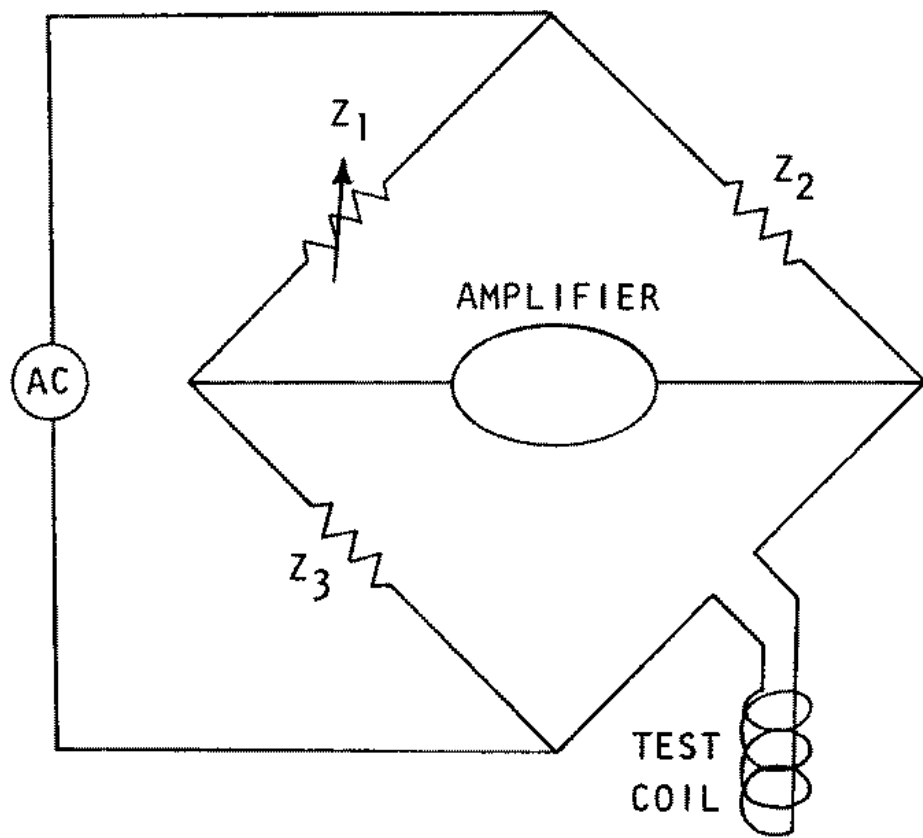




H0404508

تاخیر فاز در عمق

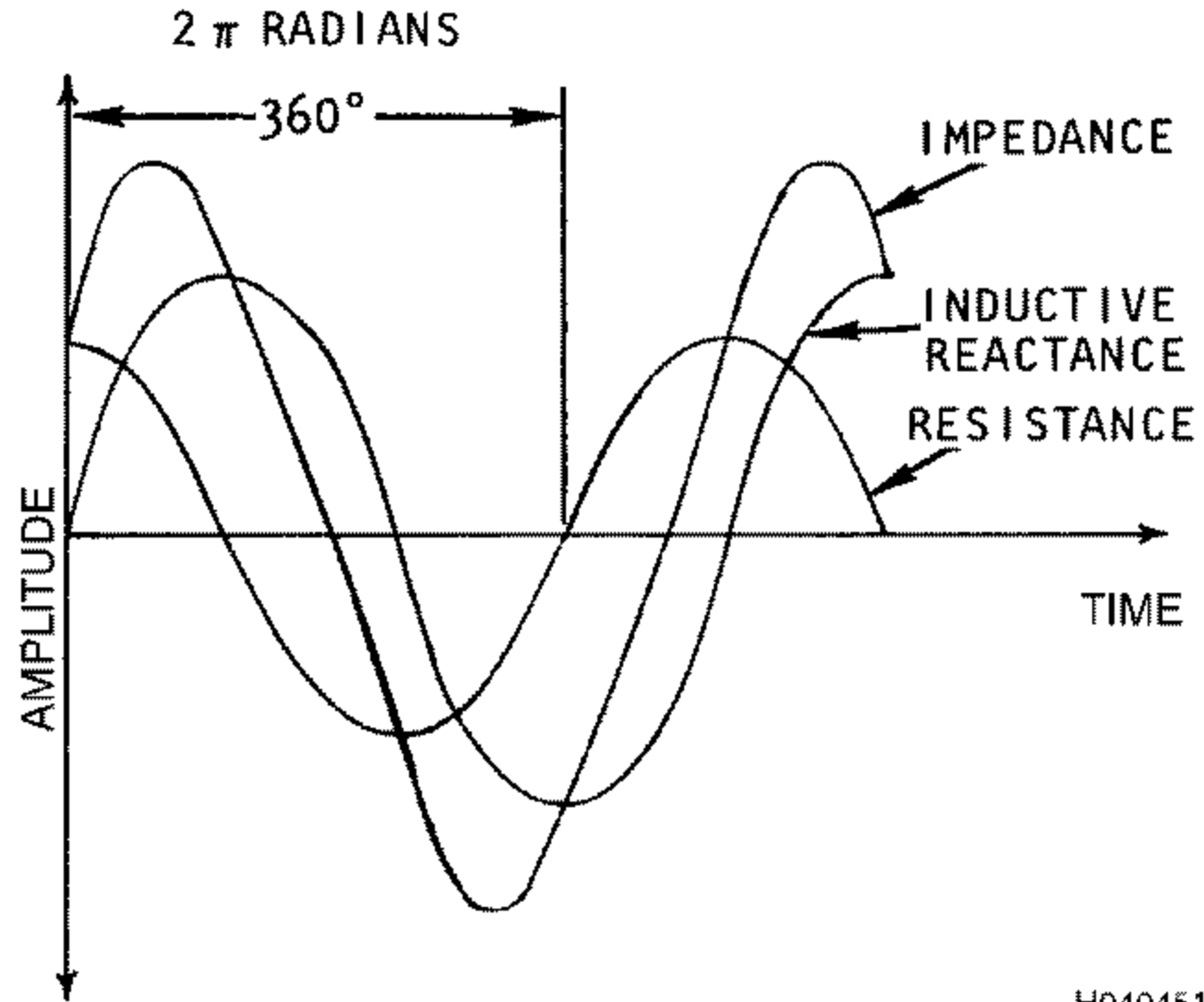
زاویه فاز می تواند با زمان تغییر میدان جریان گردابی و فاصله رفت و برگشت سیگنال را تغییر کند. تغییرات در سطح قطعه بلافاصله توسط سیم پیچ مشاهده می شود، در حالی که اختلالات در میدان در برخی از اعماق قطعه نیازمند مقداری زمان سفر برای بازگشت به سطحی است که توسط سیم پیچ دیده می شود. از نظر الکتریکی، این به عنوان تاخیر فاز در عمق توصیف می شود و مقدار تاخیر فاز ۱ رادیان (۵۷ درجه) در هر عمق استاندارد نفوذ است. این تاخیر فاز از سیگنال خیز (سطح) ممکن است برای اندازه گیری عمق عیوب استفاده شود. زاویه فاز سیگنال نقص با عمق نقص ارتباط دارد.



تشخیص سیگنال

یک تکنیک ساده اما موثر تشخیص سیگنال استفاده از مدار پل است. با عبور جریان از سیم پیچ آزمایش و قرار گرفتن سیم پیچ در یک منطقه بدون نقص یا مرجع، امپدانس متغیر Z_1 را می توان تنظیم کرد تا جریان صفر از تقویت کننده عبور کند. این تعدیل یا "تعادل" یا «نال» پل نامیده می شود. هنگامی که سیم پیچ بر روی یک ناحیه معیوب یا آسیب دیده قرار می گیرد، تغییر حاصل در جریان عبوری از سیم پیچ، پل را نامتعادل می کند و جریان از طریق تقویت کننده جریان می یابد. این جریان همان سیگنال بازرسی است. سیگنال دارای فرکانس یکسانی با جریان عبوری از سیم پیچ است. فاز و دامنه این سیگنال حاوی اطلاعاتی در مورد شرایطی است که باعث عدم تعادل پل شده است.

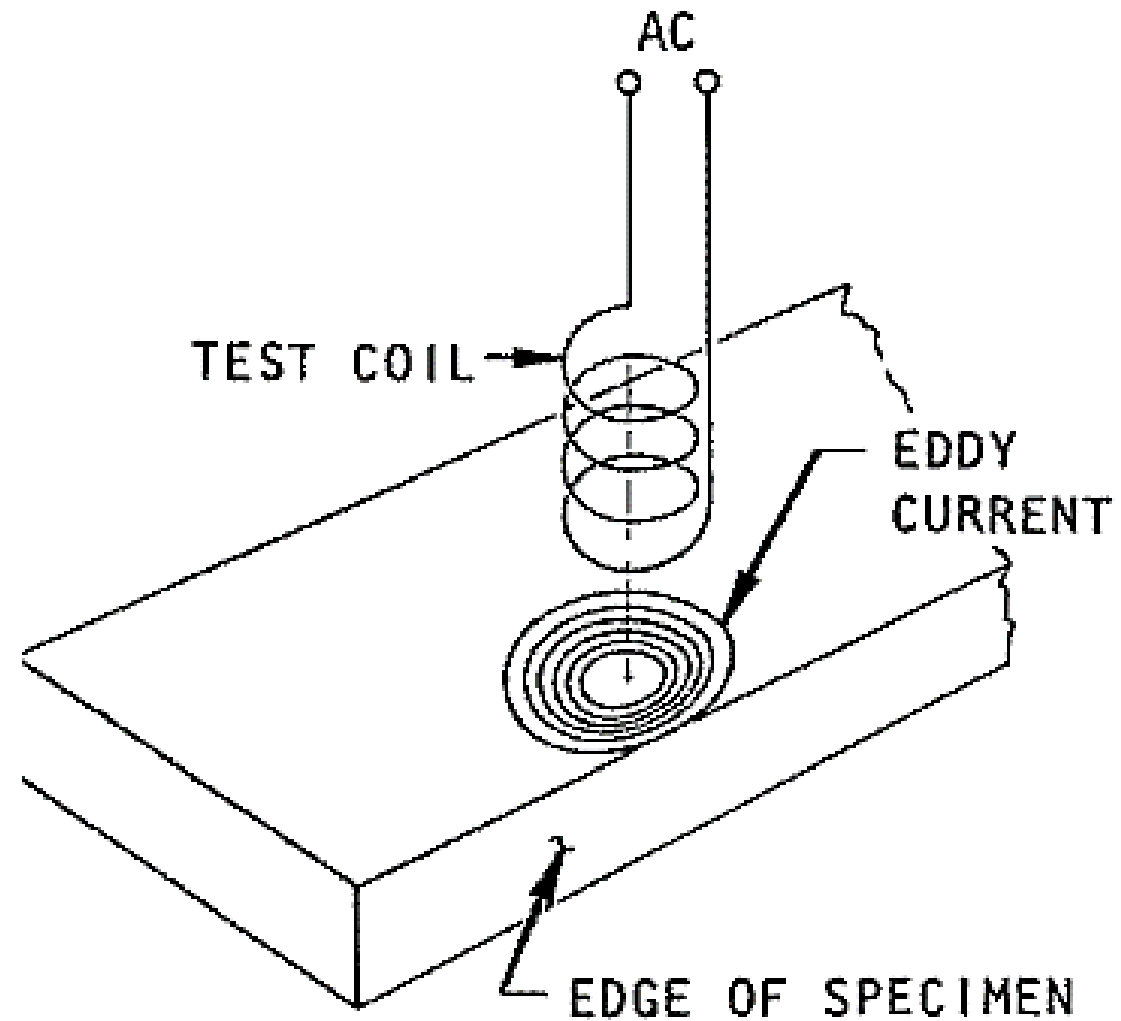
Advanced NDT



H0404511

کاربردهای ET

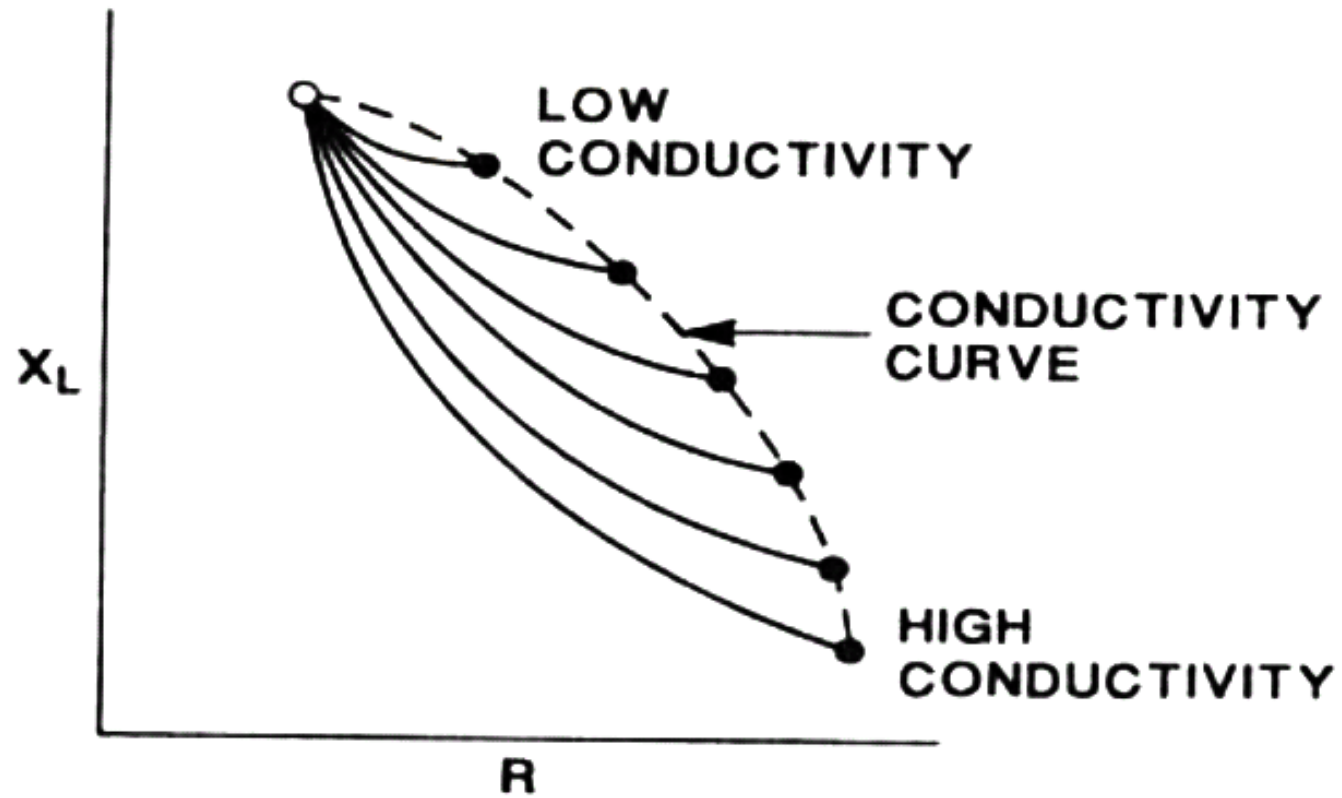
- اندازه گیری هدایت الکتریکی، تراوایی
مغناطیسی، اندازه دانه بندی، چگونگی عملیات
حرارتی، سختی و ابعاد فیزیکی
- تشخیص عیوبی چون ترک، مک، آخال و ...
- جدا کردن قطعات غیر همجنس از هم
- اندازه گیری پوشش غیررسانا بر روی جسم
رسانا یا پوشش غیرمغناطیسی روی سطح
مغناطیسی



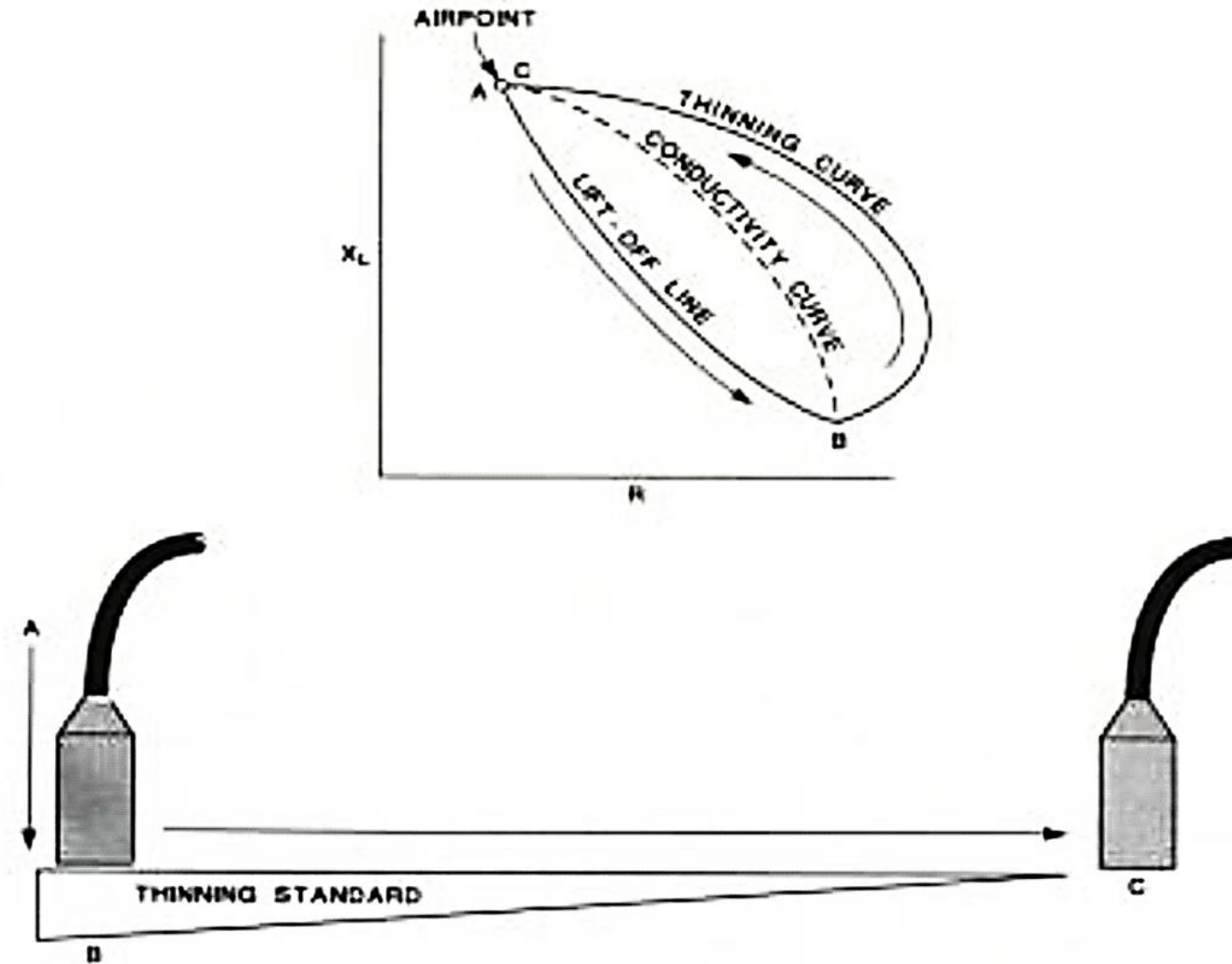
H0404536

Distortion of Eddy Current Flow at the Edge of a Part

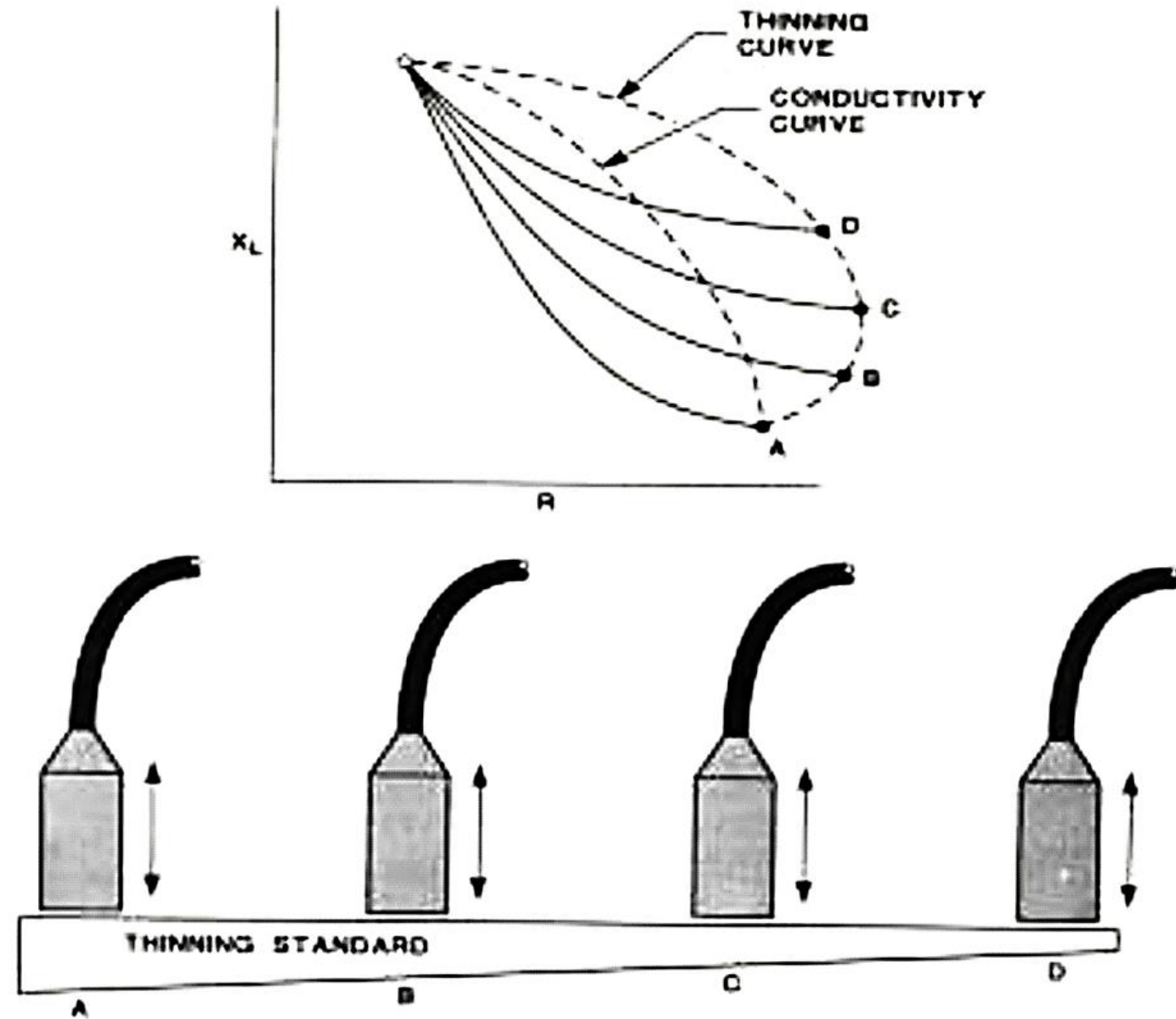
Advanced NDT



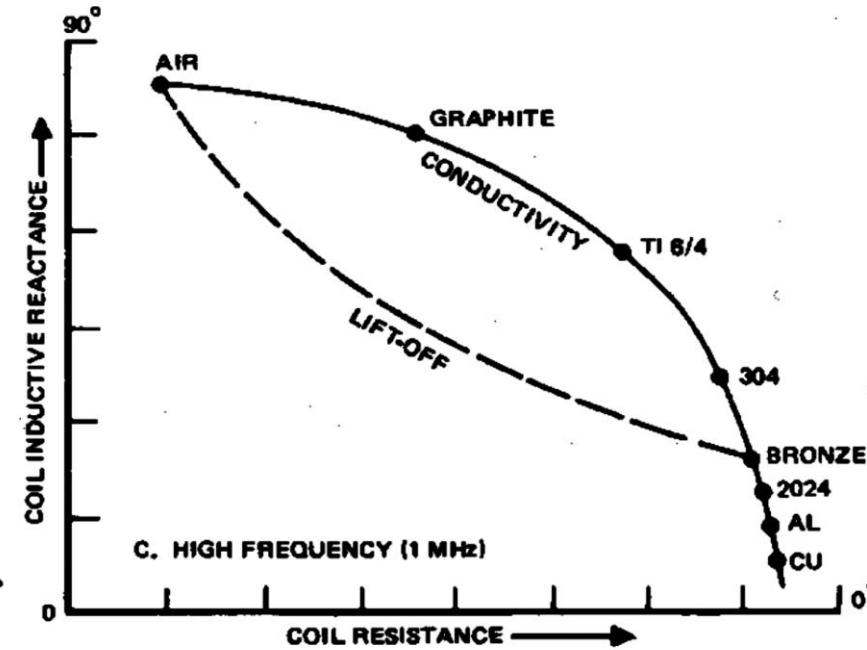
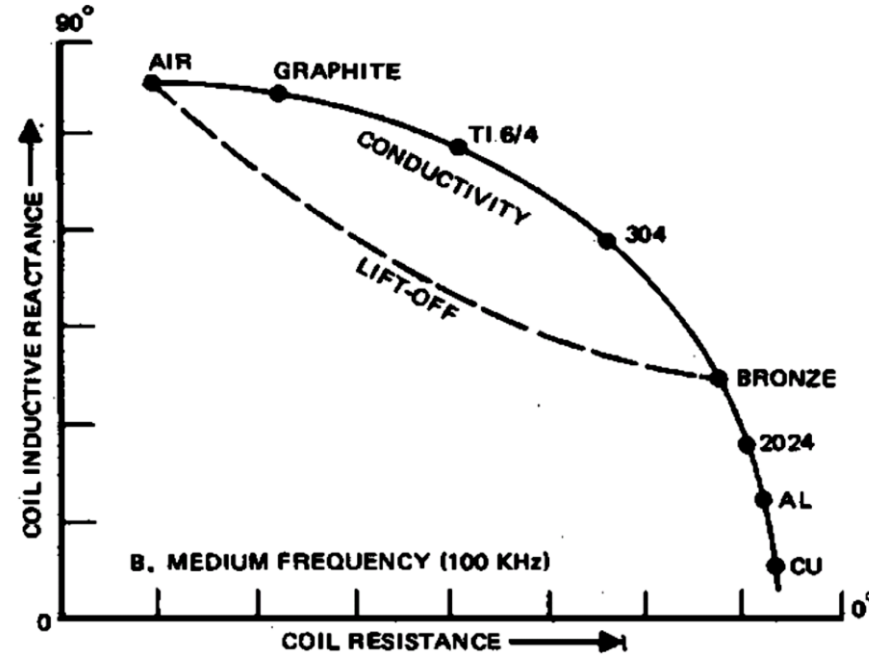
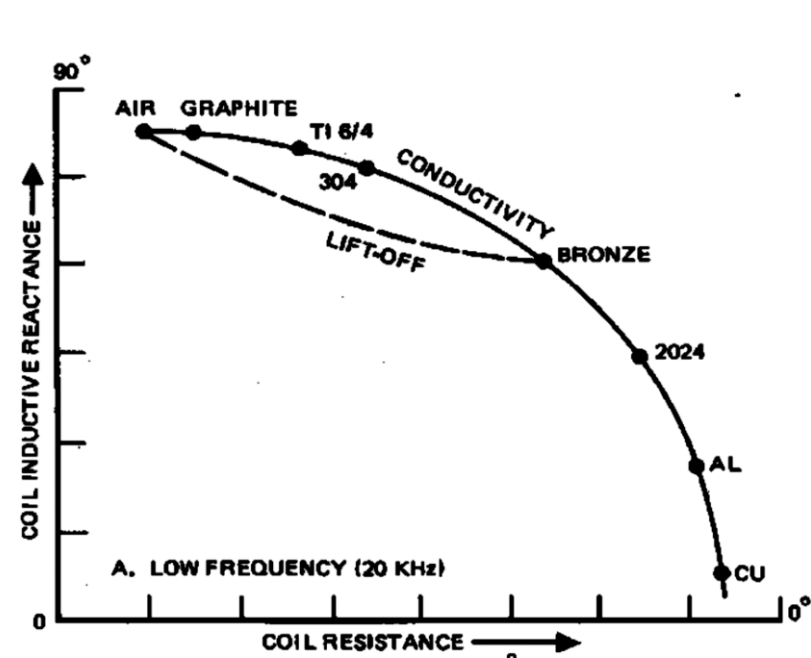
Advanced NDT



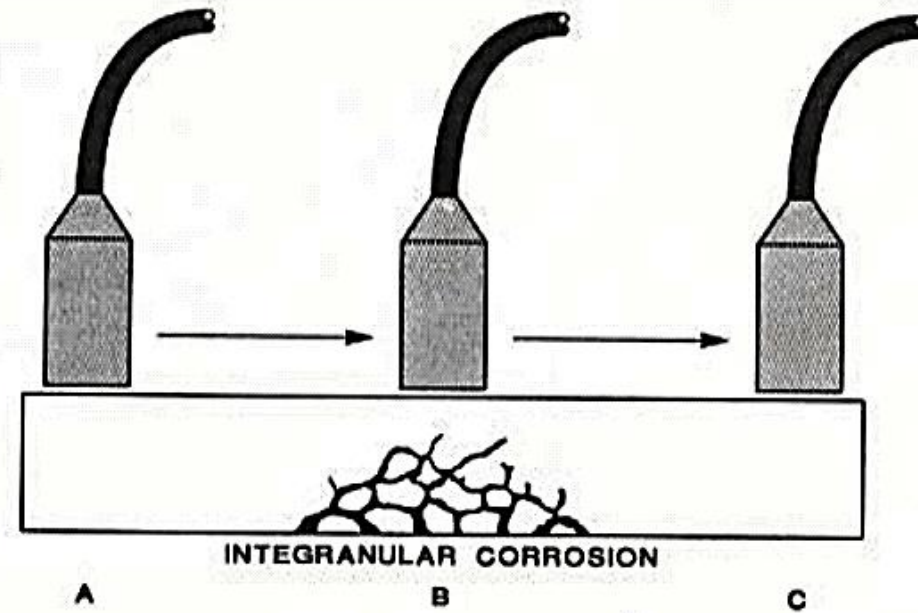
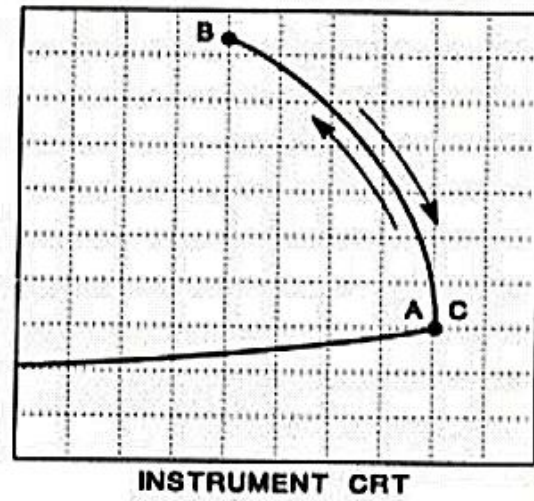
Advanced NDT



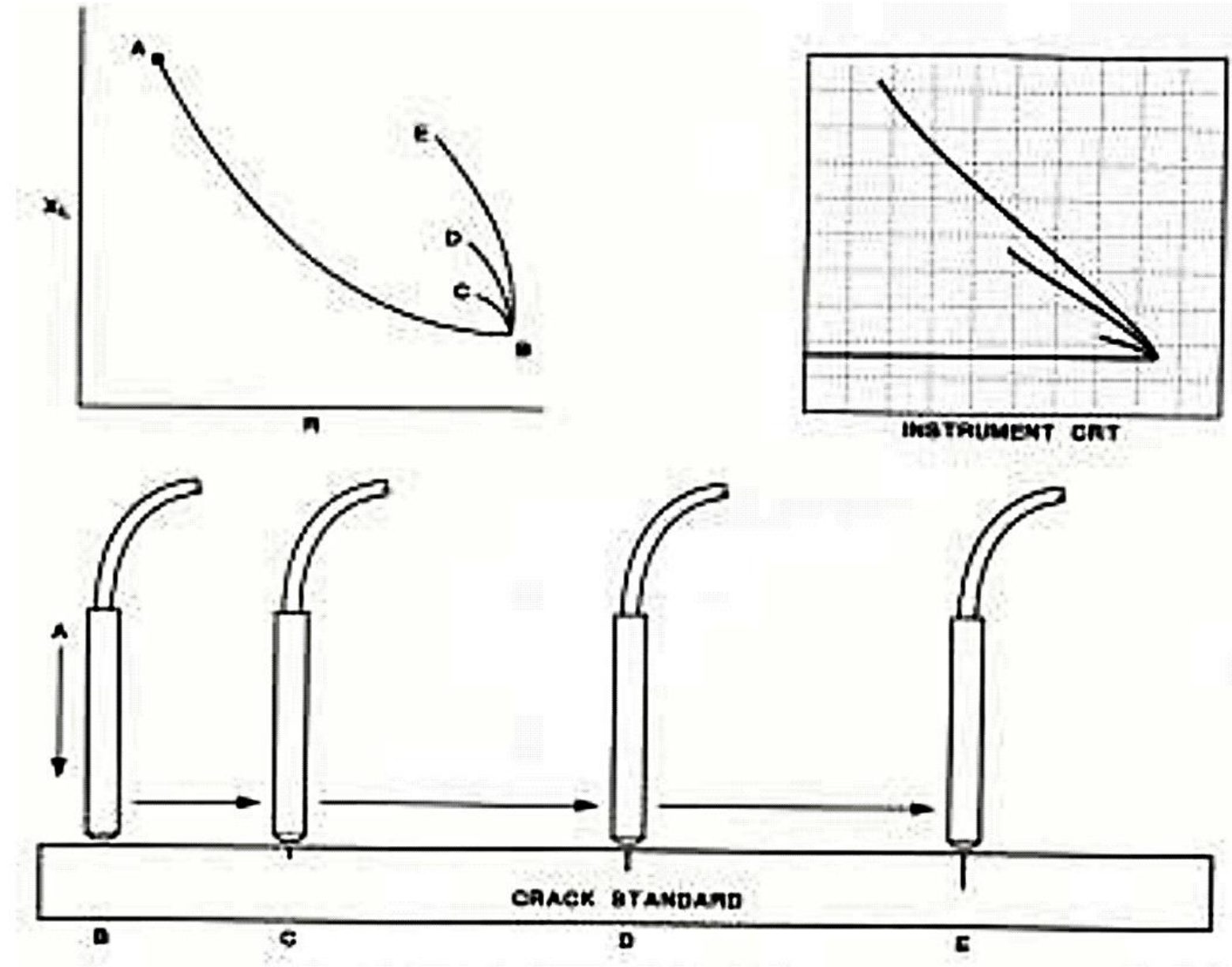
تأثير افزایش فرکانس *Advanced NDT*



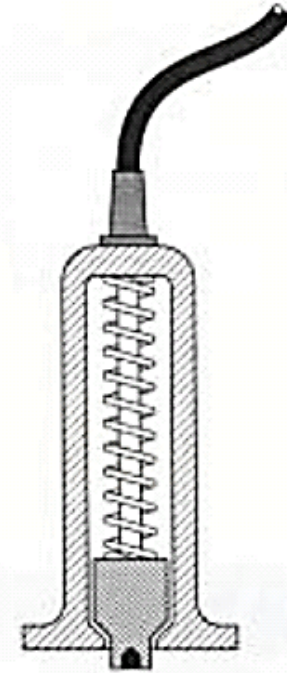
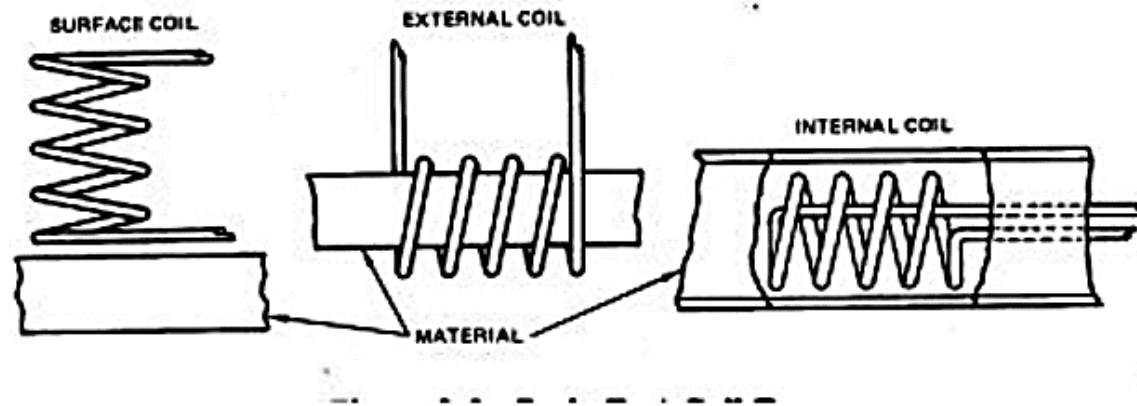
وجود عيب



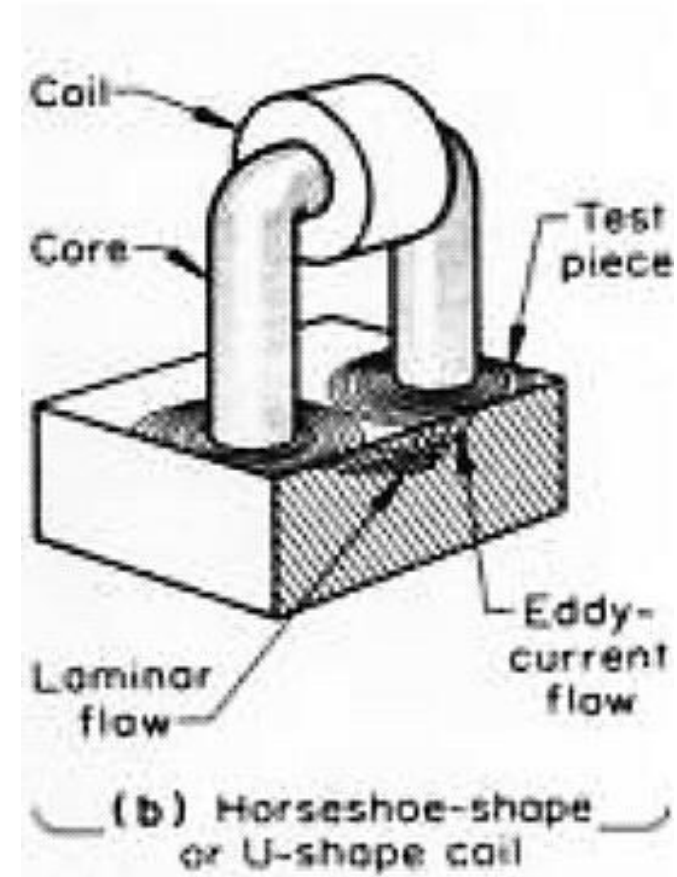
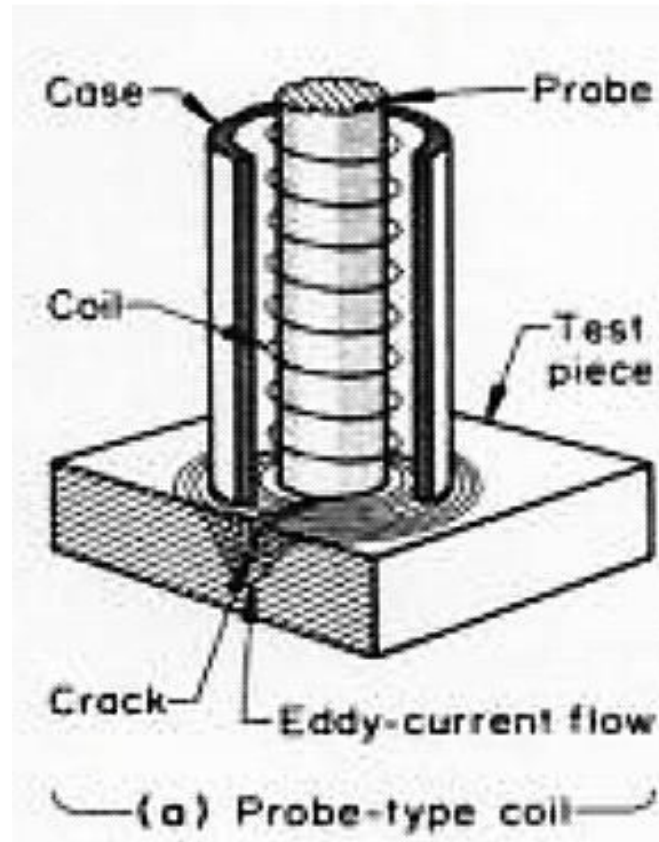
Advanced NDT



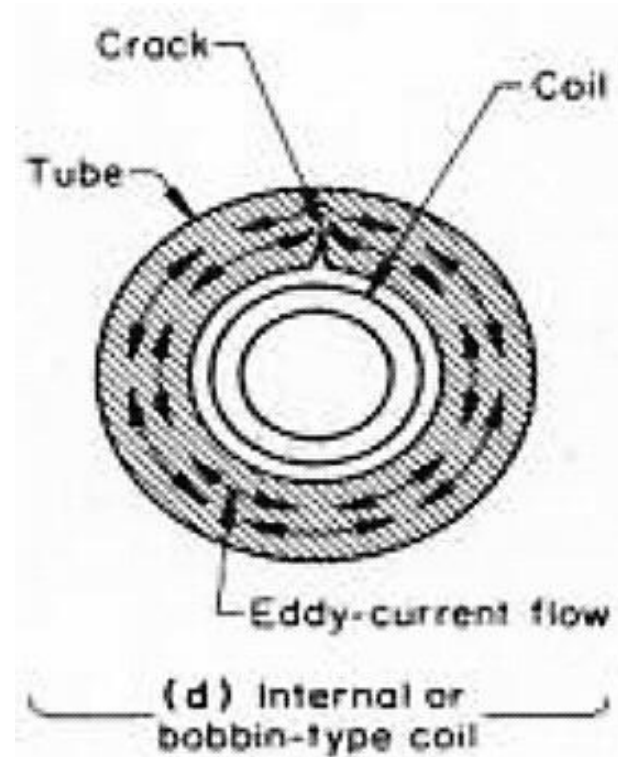
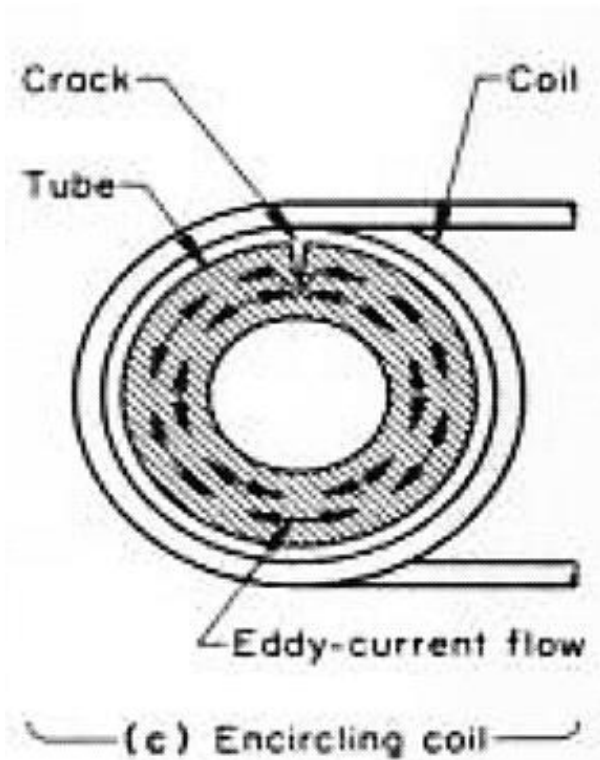
پروبھا



پروب ET



Advanced NDT



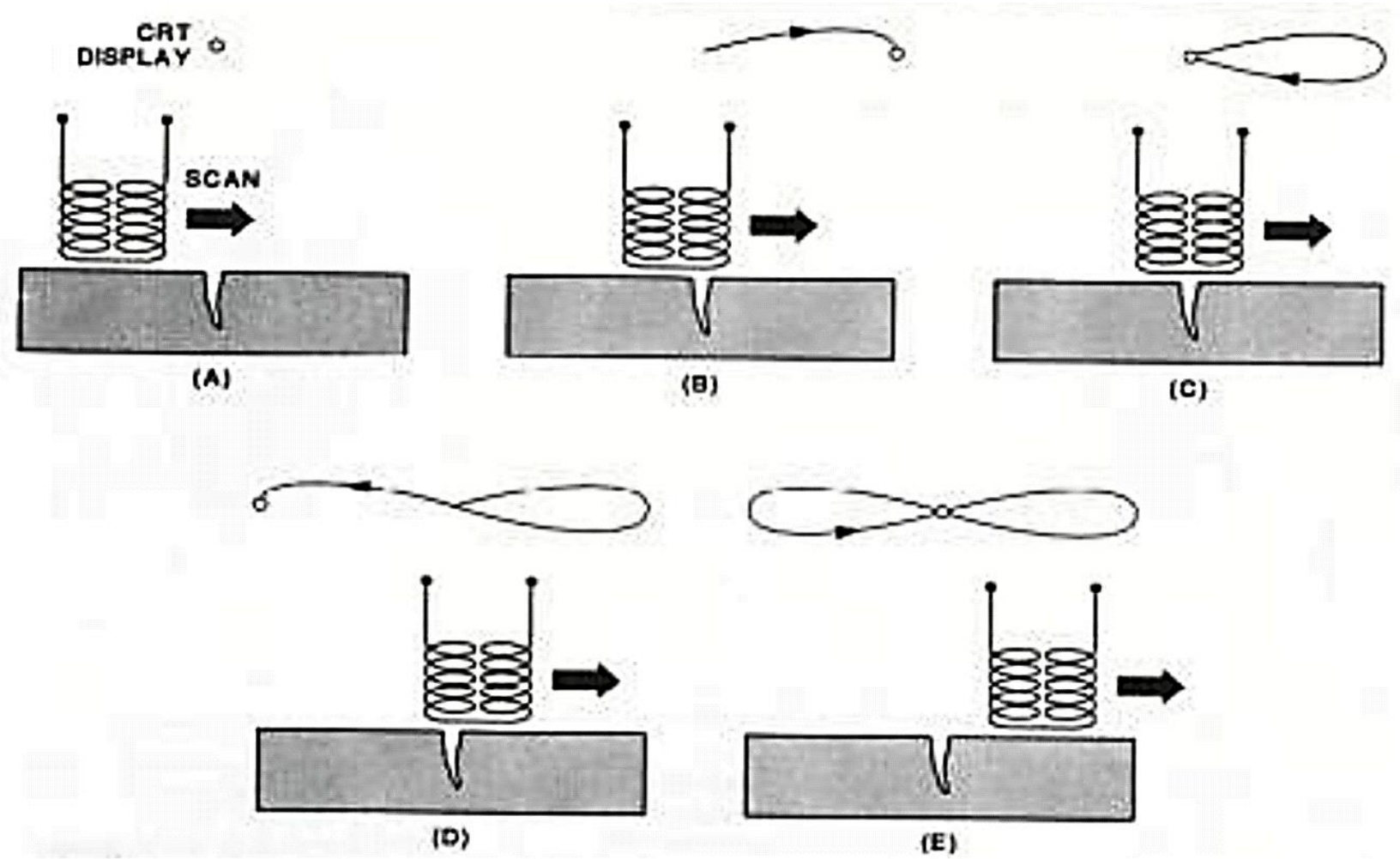
Types and applications of coils used in eddy current inspection. (a) Probe-type coil applied to a flat plate for detection of a crack. (b) Horseshoe-shaped or U-shaped coil applied to a flat plate for detection of a laminar flow. (c) Encircling coil applied to a tube. (d) Internal or bobbin-type coil applied to a tube

پروپھا



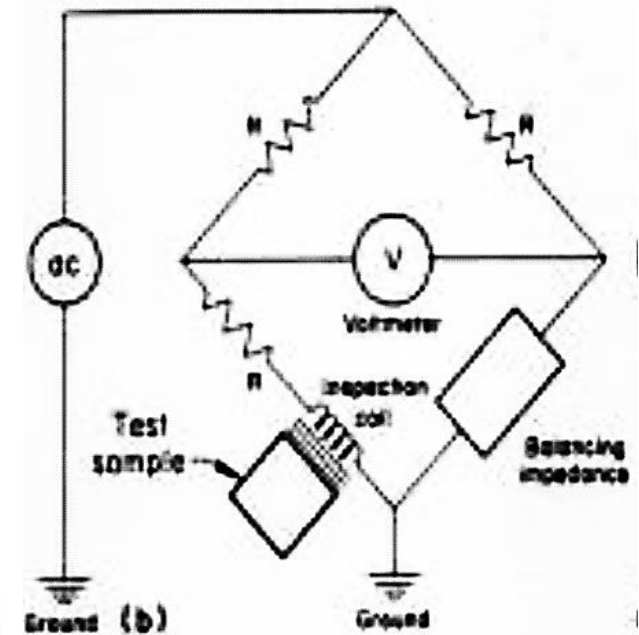
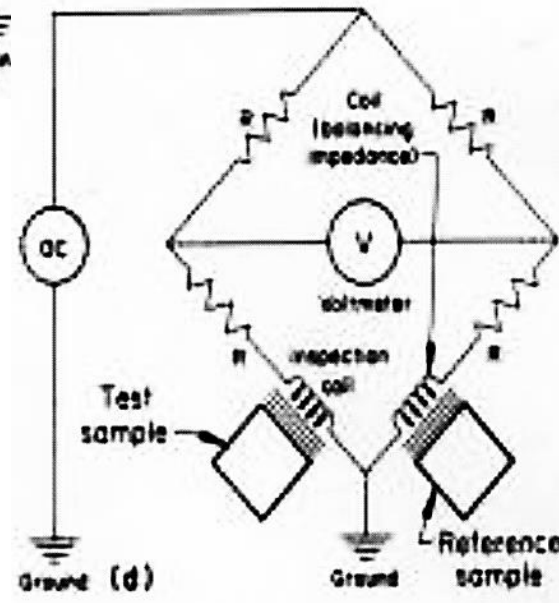
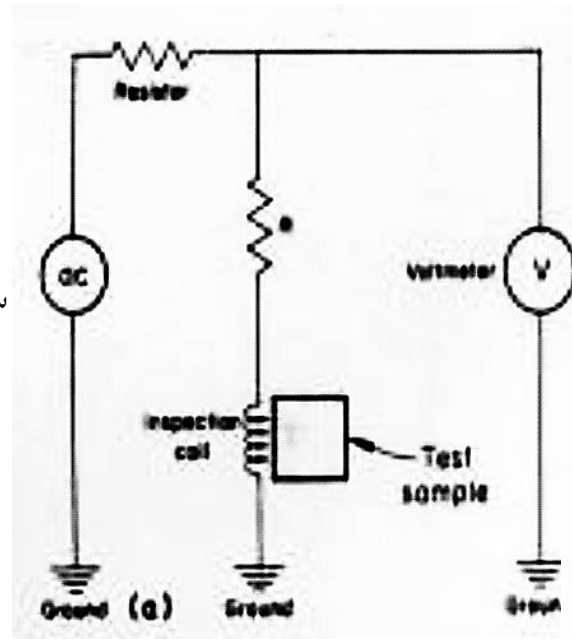
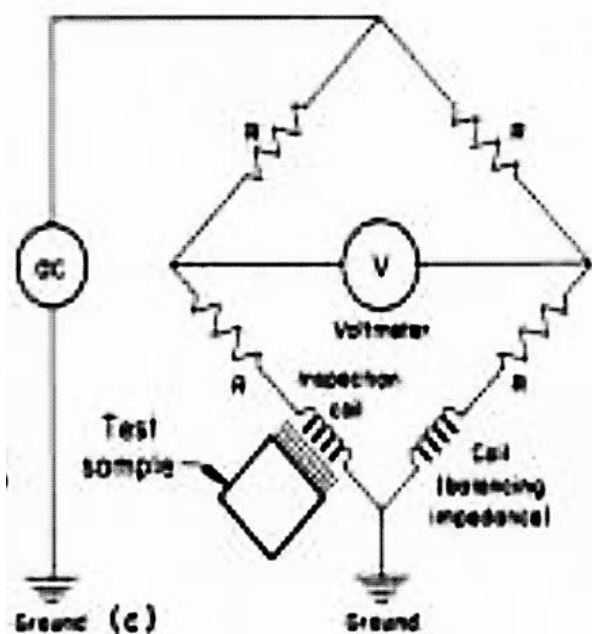
Acknowledgements to Iowa
State Univ.

Advanced NDT



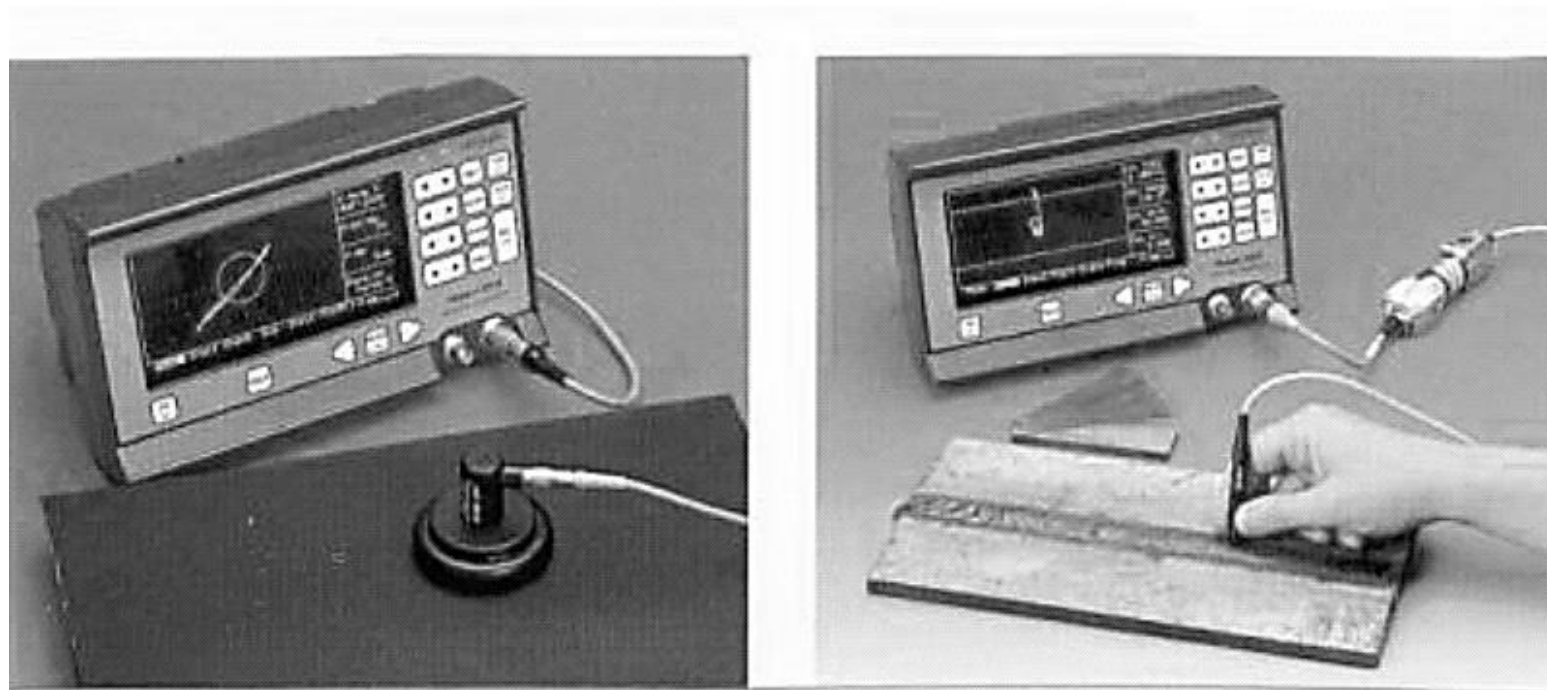
Advanced NDT

ساختمان دستگاههای ET

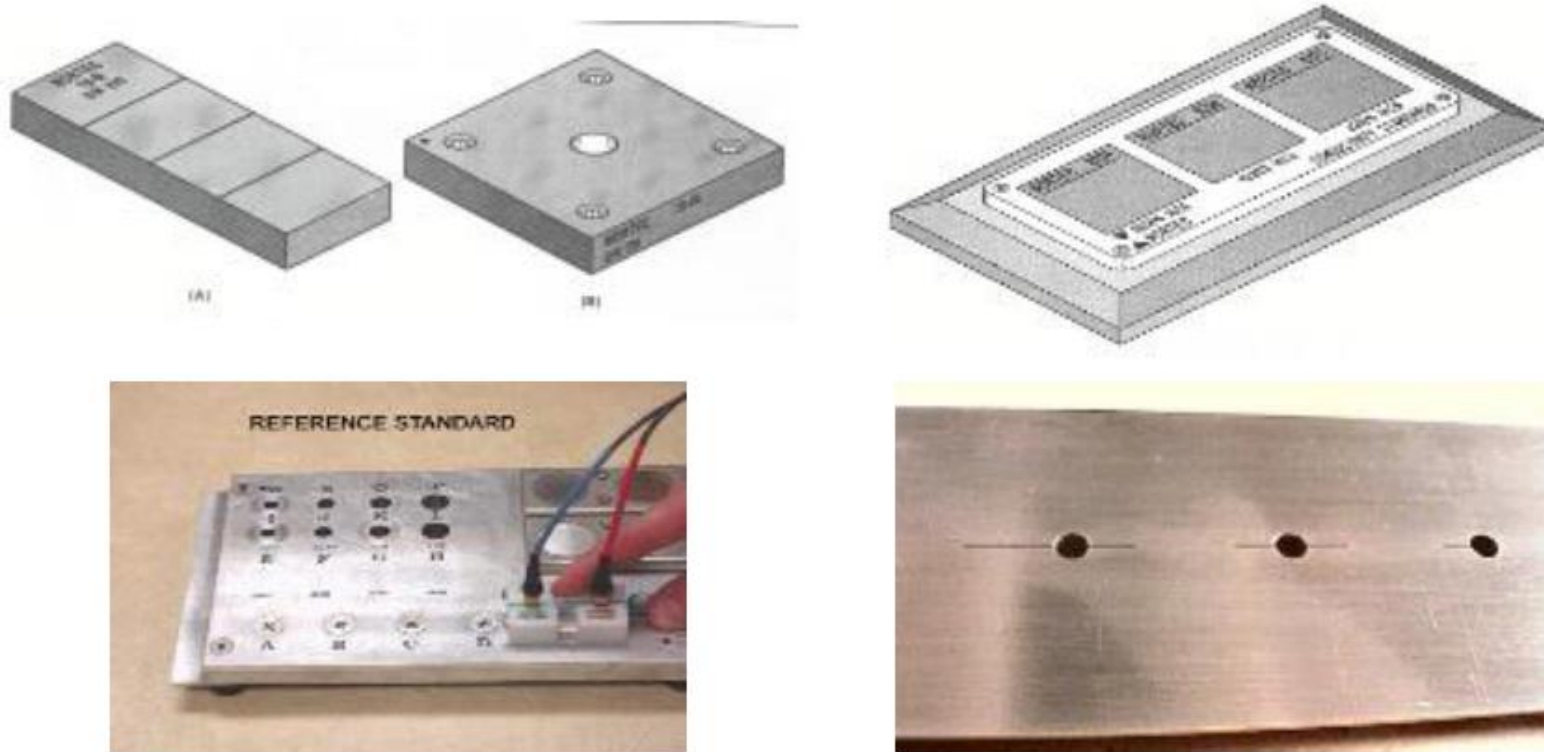


Four types of eddy current instruments. (a) A simple arrangement, in which voltage across the coil is monitored. (b) Typical impedance bridge. (c) Impedance bridge with dual coils. (d) Impedance bridge with dual coils and a reference sample in the second coil

دستگاه ET

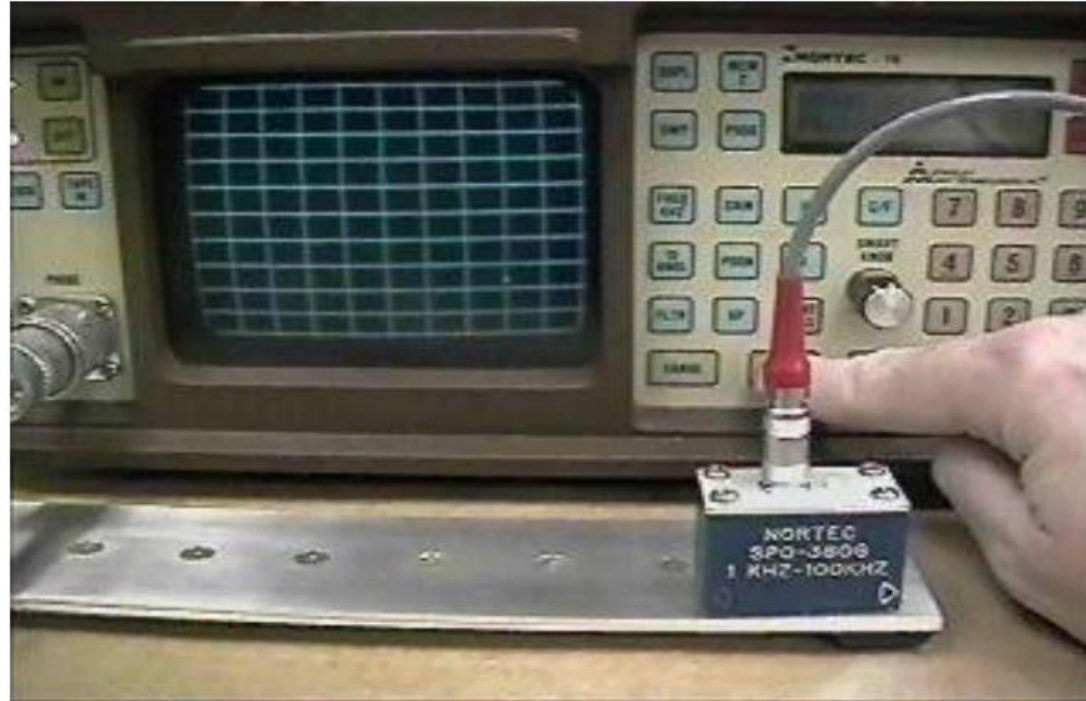


صفحات مرجع



Acknowledgements to Iowa
State Univ.

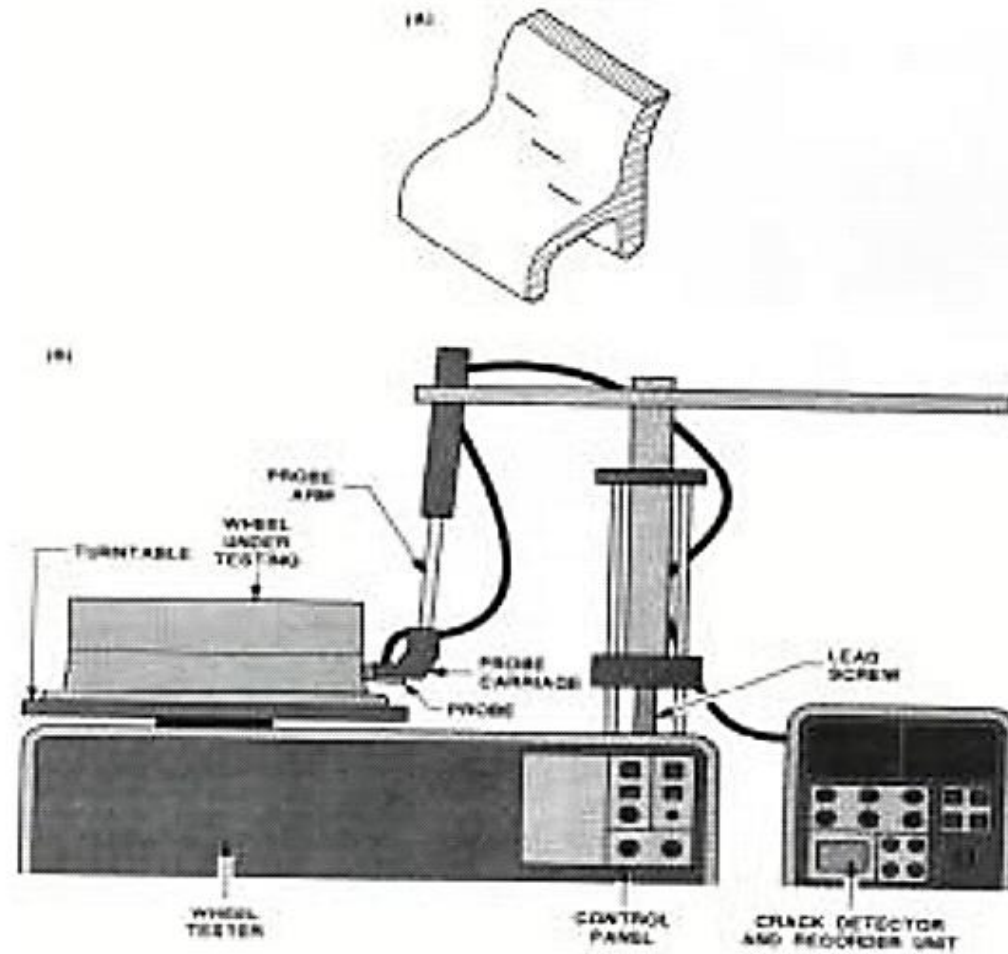
انجام ET



بازرسی لوله های بویلر



آزمون اتوماتیک



Advanced NDT

Advantages

Inspects conductors

No safety concerns

Rapid Inspection

Sensitive to a large number of parameters related to conductivity, magnetic permeability, and geometry (e.g., flaws, thickness, coatings, hardness, proximity, and edges)

Wide operating temperature range.

Specialized off-the-shelf probes for high temperature applications

Small probe size

Light weight and portable

Relatively low cost

Can be configured in arrays

Mature technology

Disadvantages

Only inspects conductors

Surface or near surface detection only (specialized forked probes for thin sheet and RFEC probes for tubing are through thickness devices. The latter is capable of inspecting carbon steel tubing thickness up to 6–10 mm thick).

Sensitivity to a wide range of parameters increases complexity of interpretation

Sensitive to liftoff variations

Only sensitive to cracks perpendicular to the interrogating surface

مزایای ET

- عدم نیاز به تخصص بالا
- غیر تماسی بودن و عدم نیاز به ماده واسط
- حساسیت زیاد نسبت به عیوب سطحی
- امکان اتوماتیک نمودن آزمون
- سرعت زیاد و هزینه کم

محدودیت‌های ET

- فقط مواد هادی الکتریسیته (ترجیحاً غیر فرومغناطیس)
- امکان ایجاد جریانهای گردابی توسط سایر عوامل و مشکل شدن تفسیر نتایج
- فقط عیوب سطحی و زیر سطحی
- نیاز به پروبهای مخصوص برای قطعات پیچیده
- نیاز به قطعات استاندارد