



دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی مکانیک

# آزمون های غیر مخرب: آزمایش با جریان های گردابی (EC)

دکتر عبدالواحد کمی

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه سمنان

جریان گردابی (Eddy Current): سرگردان، فوکو

■ جریان های گردابی از طریق القای الکترومغناطیس

ایجاد می شوند.

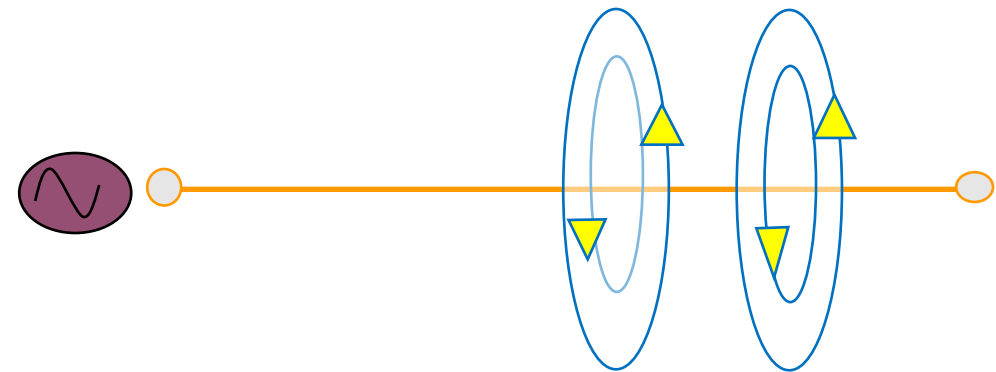
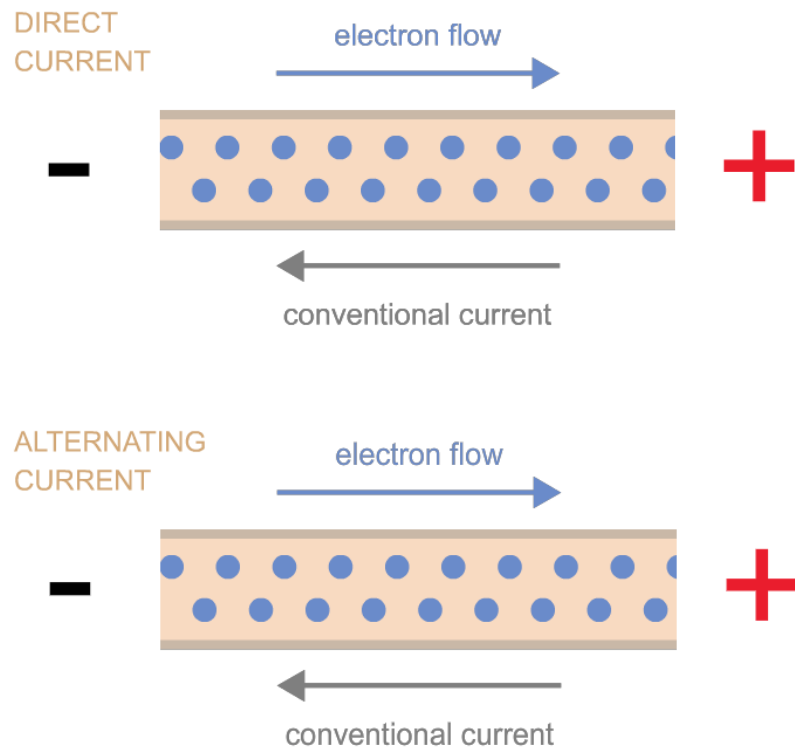
■ جریان های گردابی، جریان های **الکتریکی القا شده** ای

هستند که در مسیرهای دایروی جریان دارند.



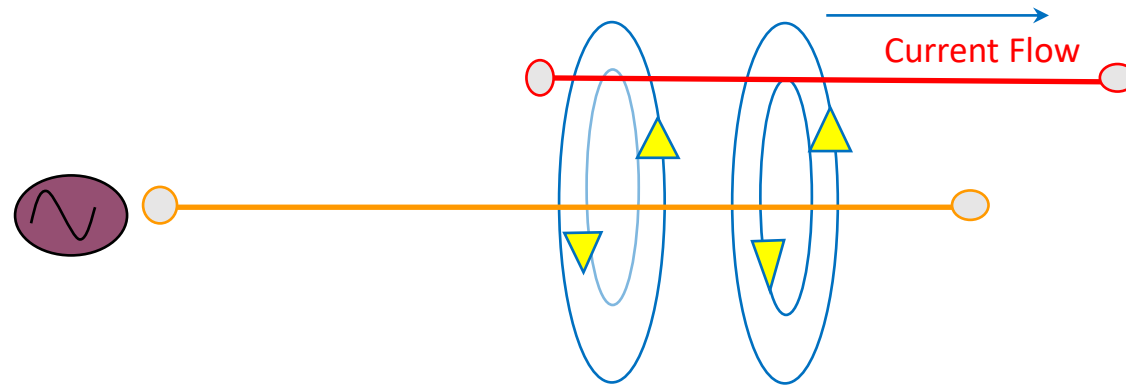
# القای الکترومغناطیس

■ هرگاه از یک سیم (مسی) جریان الکتریکی متناوب (AC) عبور کند، میدان مغناطیسی اطراف آن چگونه تغییر می کند؟



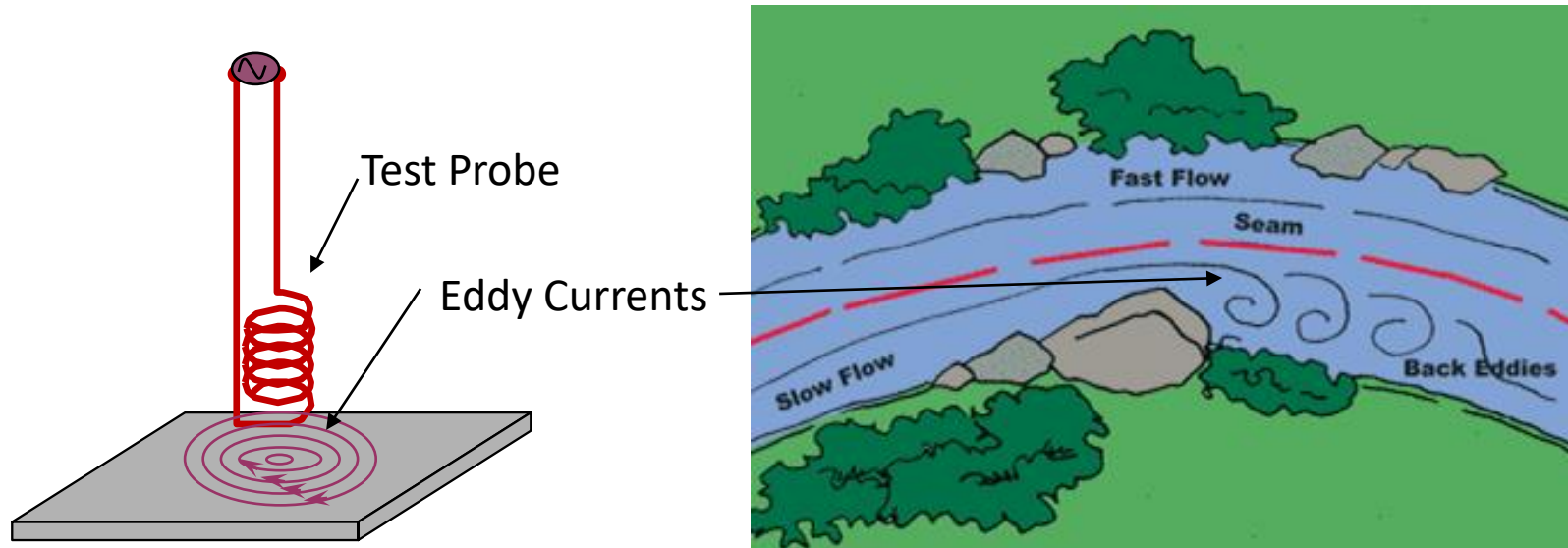
# القای الکترومغناطیس

- اگر یک رسانای الکتریسیته به میدان مغناطیسی سیم وارد شود، در آن رسانا جریان الکتریکی القا می شود.



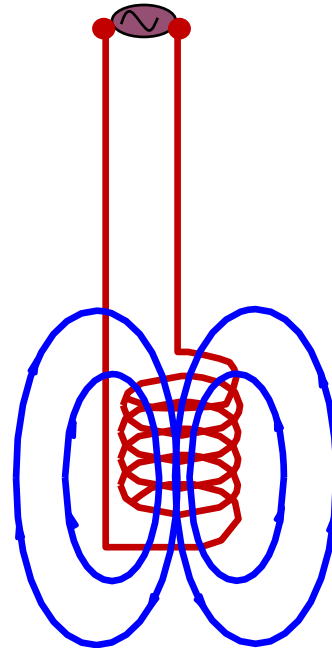
# تشکیل جریان گردابی

- به منظور تشکیل جریان گردابی برای بازرسی از یک پروب استفاده می شود. درون این پروب یک سیم هادی به شکل کویل (سیم پیچ) وجود دارد.



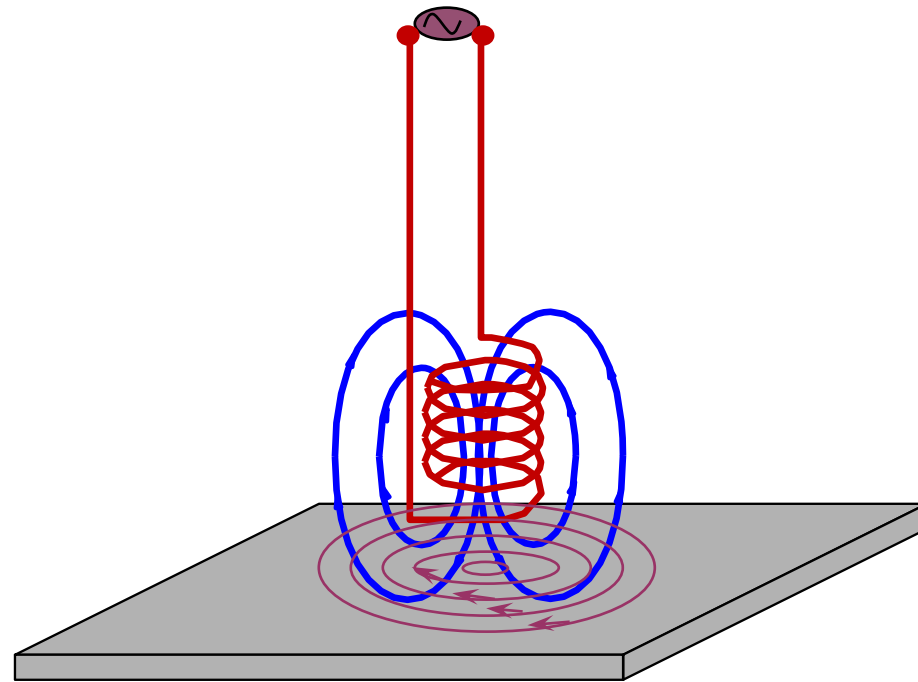
# تشکیل جریان گردابی

- اگر یک جریان متناوب از داخل پروب (سیم پیچ) عبور کند، یک میدان مغناطیسی متغیر (در حال افزایش و در حال کاهش) در داخل و اطراف سیم پیچ تشکیل می شود.



# تشکیل جریان گردابی

■ وقتی یک رسانای الکتریکی در میدان مغناطیسی سیم پیچ قرار داده شود، القای الکترومغناطیس رخ داده و جریان گردابی در رسانا تشکیل می شود.



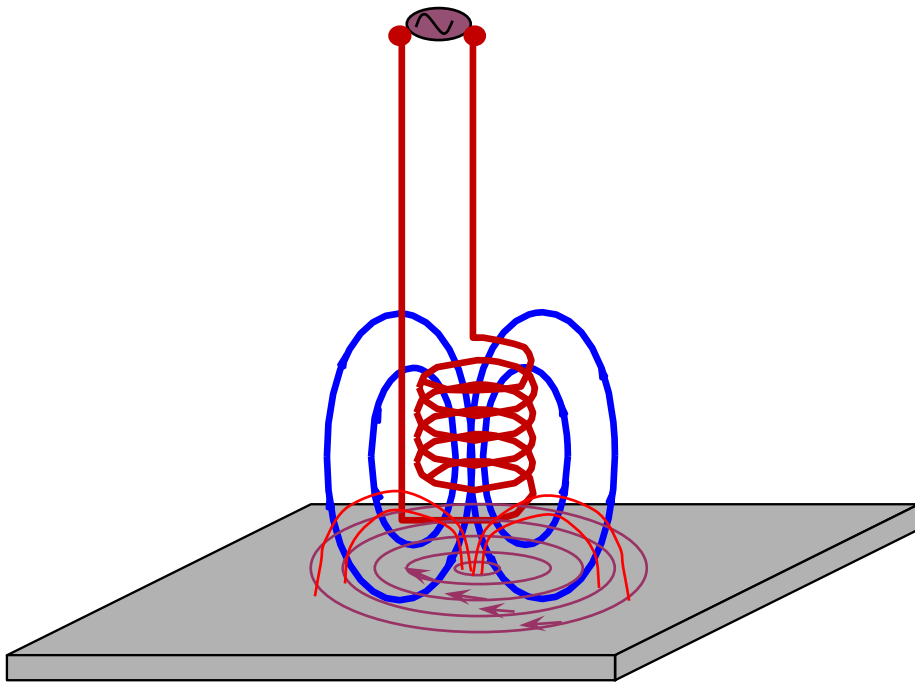
# تشکیل جریان گردابی

■ تشکیل جریان گردابی باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی ثانویه می شود که با میدان مغناطیسی اولیه مخالفت می کند.

■ بسته به مقدار فرکانس جریان متناوب پروب

پروسه القای الکترومغناطیس بین چندصد تا

چند میلیون بار در ثانیه رخ می دهد.

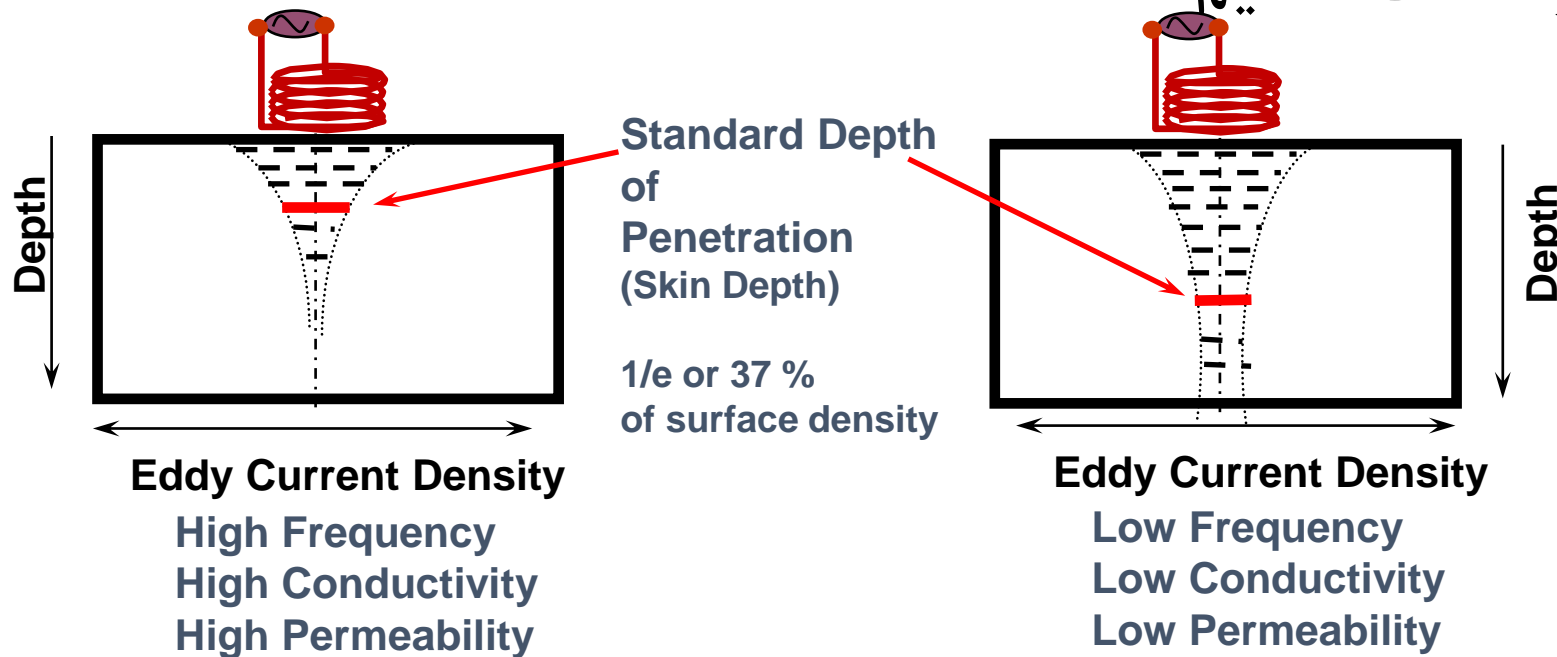




# تشکیل جریان گردابی

■ قوی ترین جریان های گردابی در سطح تشکیل می شوند و بصورت توانی با افزایش عمق کاهش می یابد. عمقی که در آن چگالی جریان گردابی ۳۷٪ مقدار در سطح قطعه است تحت عنوان عمق استاندارد نفوذ جریان گردابی شناخته می شود. **بازرسی حجمی در قطعات**

**نازک، بازرسی سطحی در قطعات ضخیم**



# داده های بازرسی

■ سه مشخه ماده مورد بازرسی که در قدرت جریان های القایی اثرگذار هستند، عبارتند از:

۱- هدایت الکتریکی ماده

۲- نفوذپذیری مغناطیسی ماده

۳- مقدار ماده حجمی در اطراف سیم پیچ

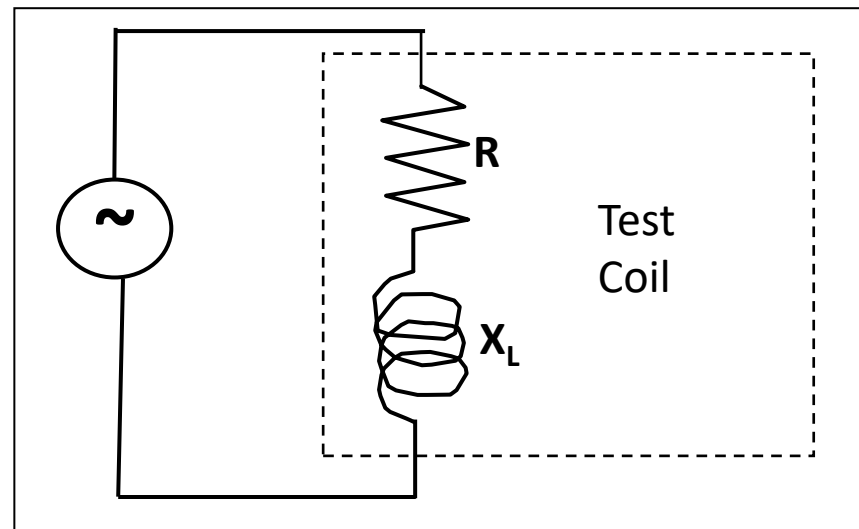
• میزان قدرت جریان های القایی ایجاد شده را چگونه می توان اندازه گیری کرد؟

با اندازه گیری میزان ولتاژ و جریان سیم پیچ



# داده های بازرسی

- جریان گردابی باعث تغییر امپدانس (مقاومت ظاهری) سیم پیچ می شود.
- امپدانس ( $Z$ ) در یک سیم پیچ جریان گردابی برابر است با: مقاومت کلی در برابر عبور جریان
- امپدانس شامل دو مولفه مقاومت ( $R$ ) و راکتانس القایی ( $X_L$ ) است.



## داده های بازرسی

- **مقاومت (R):** مقاومتی است که در برابر عبور جریان الکتریکی (حرکت الکترون ها) وجود دارد. این مقاومت سبب تبدیل انرژی الکتریکی به گرما یا صورت های دیگری از انرژی می شود.
- **راکتانس القایی (XL):** مقاومت در برابر عبور جریان الکتریکی متناوب (AC). این مقاومت ناشی از القای الکترومغناطیس در سیم پیچ است.
- **امپدانس (Z):** مقاومت کلی در مقابل عبور جریان الکتریکی که شامل دو مولفه مقاومت R و راکتانس القایی XL است.



# داده های بازرسی

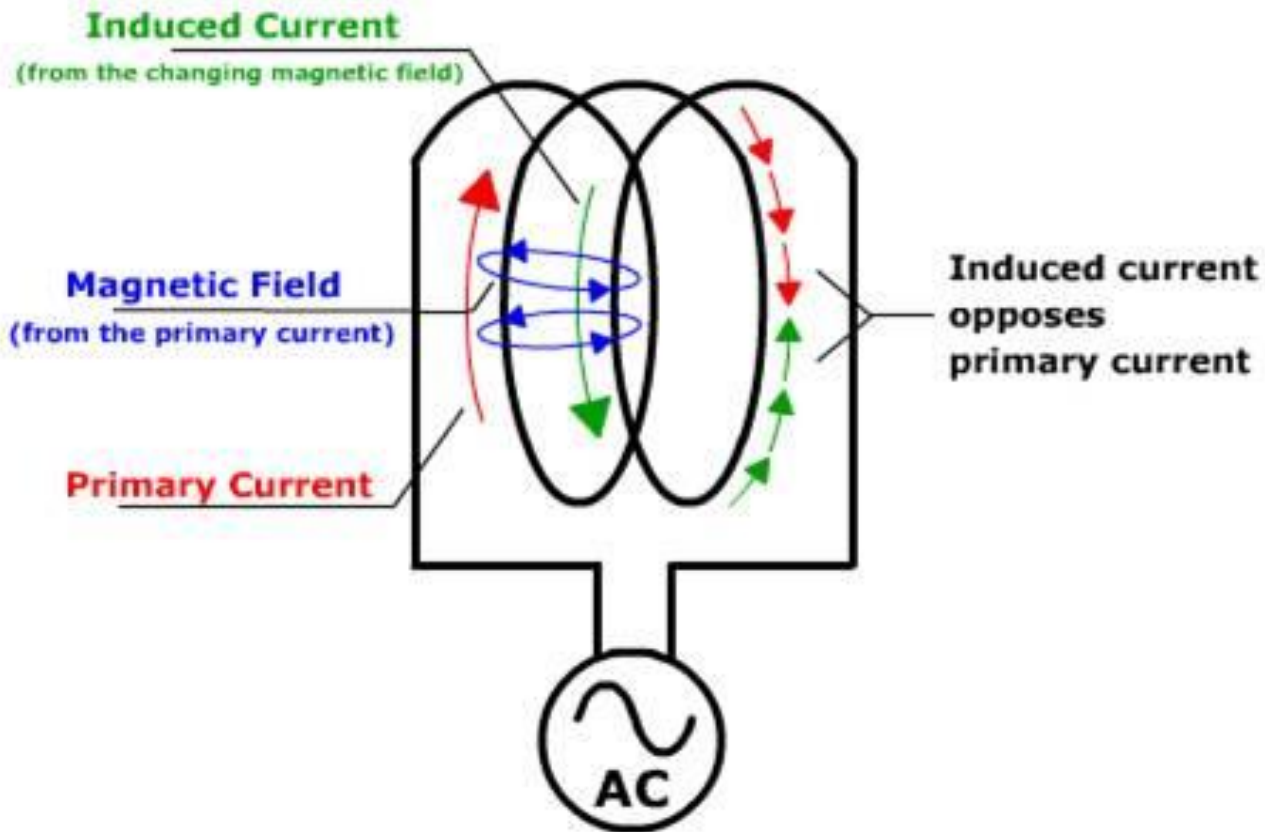
■ در یک سیم پیچ با جریان متناوب،

القای حاصل از میدان مغناطیسی یک

حلقه سبب تشکیل جریان ثانویه در سایر

حلقه می شود. این جریان ثانویه با جریان

اولیه مخالفت می کند.



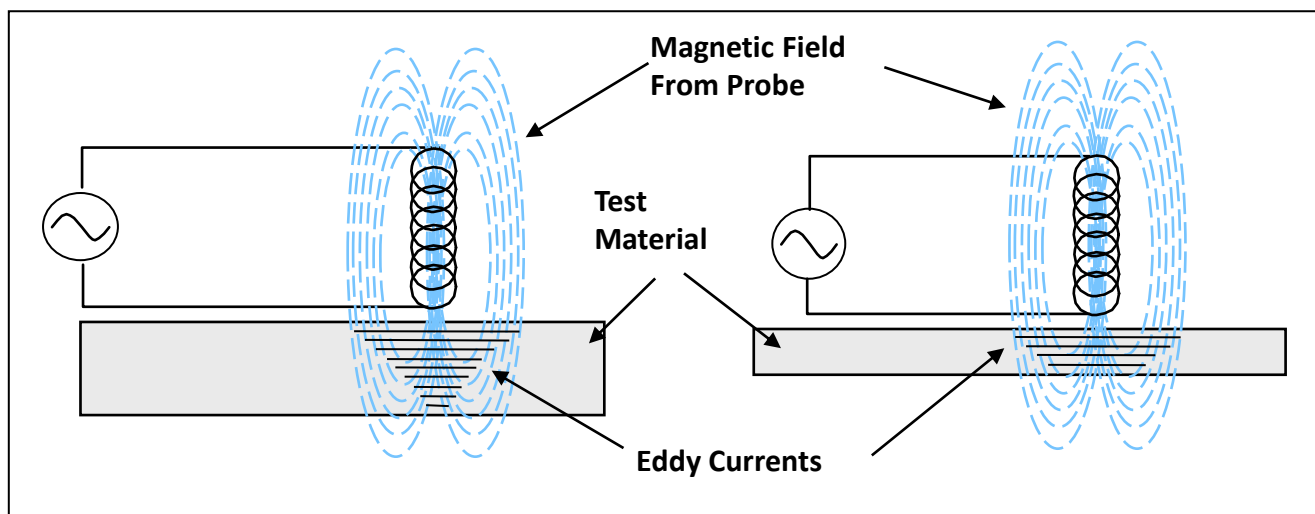
# بازرسی جریان گردابی: کاربردها

■ به کمک جریان گردابی انواع متنوعی از بازرسی های غیرمخرب را انجام داد. به همین دلیل یکی از روش های بازرسی مهم محسوب می شود. در شکل های زیر دو مثال از بازرسی غیر مخرب جریان گردابی شامل بازرسی لوله های مبدل حرارتی و بازرسی بدنه هواپیما آمده است.



# بازرسی جریان گردابی: کاربردها، ۱- اندازه گیری ضخامت

- در یک حجم مشخص از ماده مورد آزمایش، تنها مقدار مشخصی جریان گردابی تشکیل می شود.
- مقدار جریان های گردابی بیشتری در مواد ضخیم تر تشکیل می شود.
- با اندازه گیری مقدار (قدرت) جریان گردابی و مرتبط کردن آن با ضخامت، می توان ضخامت را محاسبه نمود.



# بازرسی جریان گردابی: کاربردها، ۱- اندازه گیری ضخامت

■ در صنایع هوایی از جریان گردابی برای تشخیص کاهش ماده به دلیل خوردگی و سایش

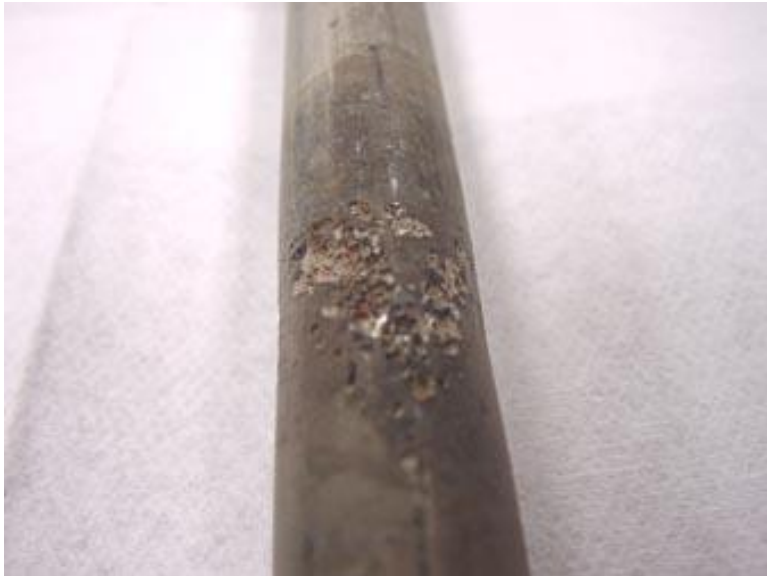
استفاده می شود.





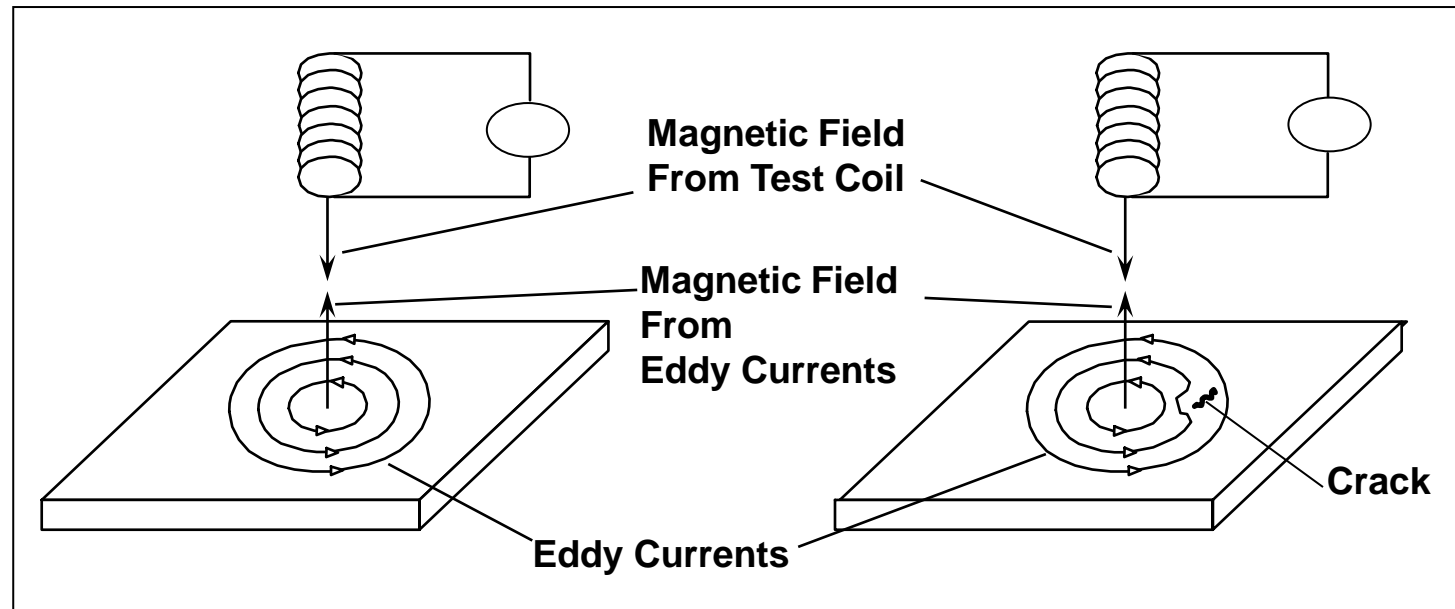
# بازرسی جریان گردابی: کاربردها، ۱- اندازه گیری ضخامت

■ از جریان گردابی به صورت گسترده در تشخیص خوردگی و سایش لوله ها در مبدل های حرارتی و تجهیزات پتروشیمی استفاده می شود.



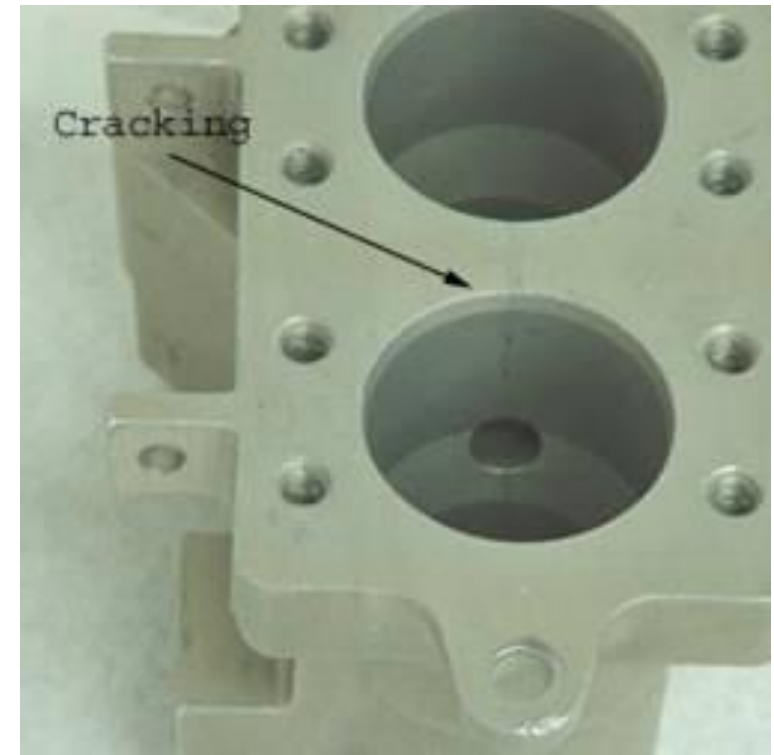
## بازرسی جریان گردابی: کاربردها، ۲- تشخیص ترک

- یکی از مهم ترین کاربردهای جریان گردابی تشخیص ترک در قطعات است. وجود ترک سبب تغییر در خطوط جریان گردابی و تضعیف قدرت آن می شود. بر اساس این تغییرات می توان ترک های سطحی و نزدیک سطح را تشخیص داد.



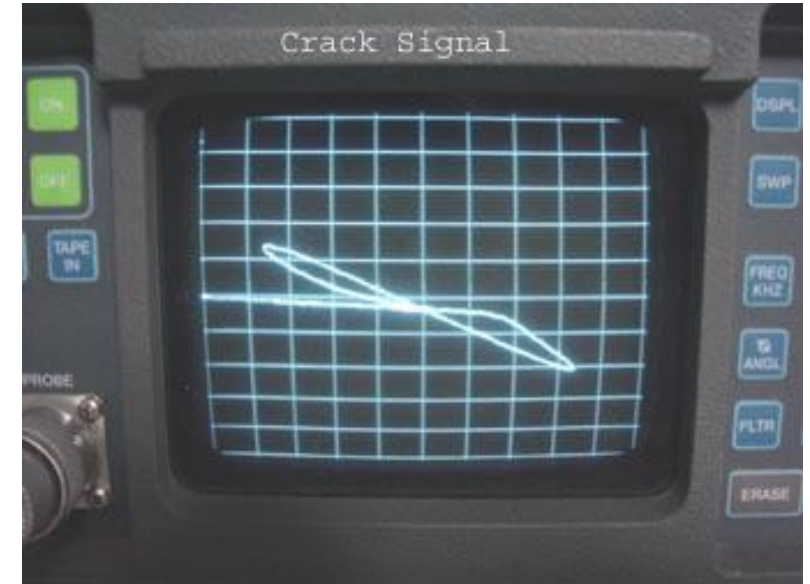
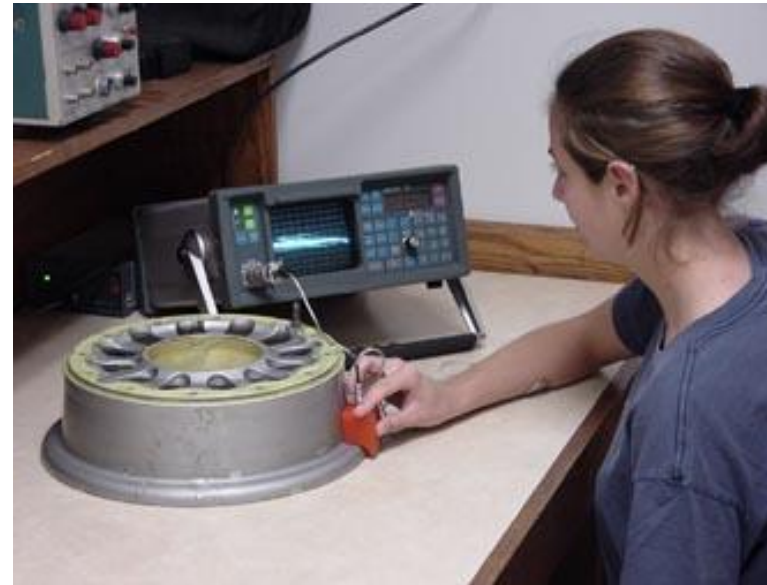
# بازرسی جریان گردابی: کاربردها، ۲- تشخیص ترک

■ جریان گردابی حساسیت بالایی به ترک های سطحی دارد.



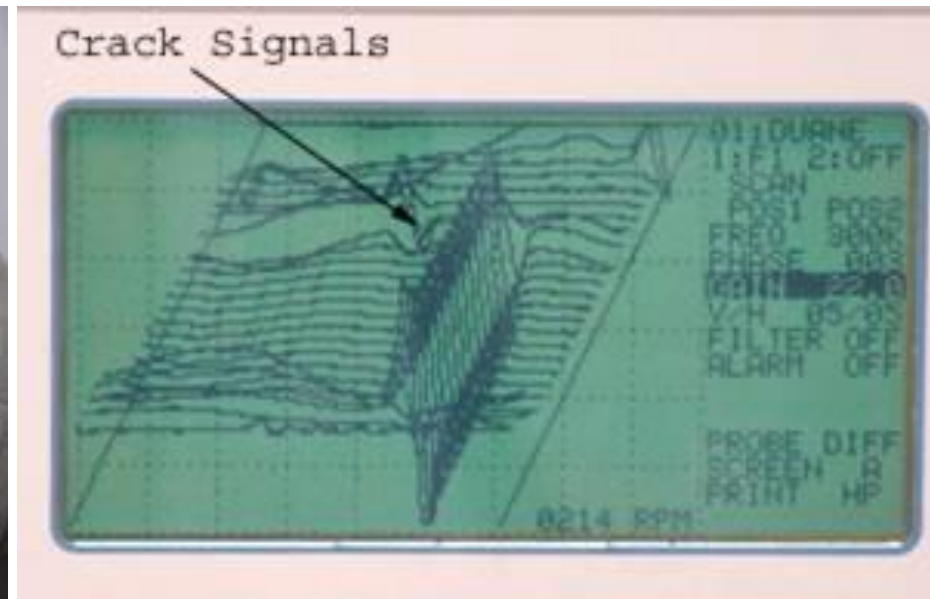
## بازرسی جریان گردابی: کاربردها، ۲- تشخیص ترک

- بازرسی و تشخیص ترک در سطح بیرونی رینگ چرخ هواپیما با استفاده از یک پروب ویژه که فرم انحنای رینگ را دارد، انجام می شود.



## بازرسی جریان گردابی: کاربردها، ۲- تشخیص ترک

■ مناطق بارگذاری مانند سوراخ های پیچ، جزء نقاط پرتنش هستند و احتمال ایجاد ترک های خستگی در آنها وجود دارد. برای بازرسی این سوراخ ها از پروب های تفنگی دوار استفاده می شود. بدین ترتیب می توان تعداد زیادی سوراخ را در زمان کم مورد بازرسی قرار داد.



■ هر خط افقی:

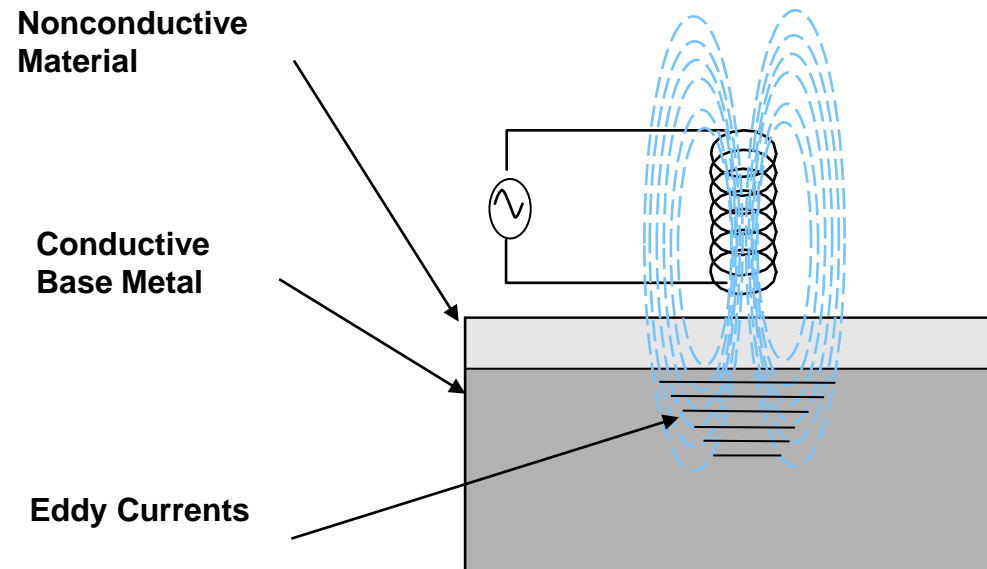
یک چرخش تفنگ

خط قائم: ترک



# اندازه گیری ضخامت مواد نارسانا

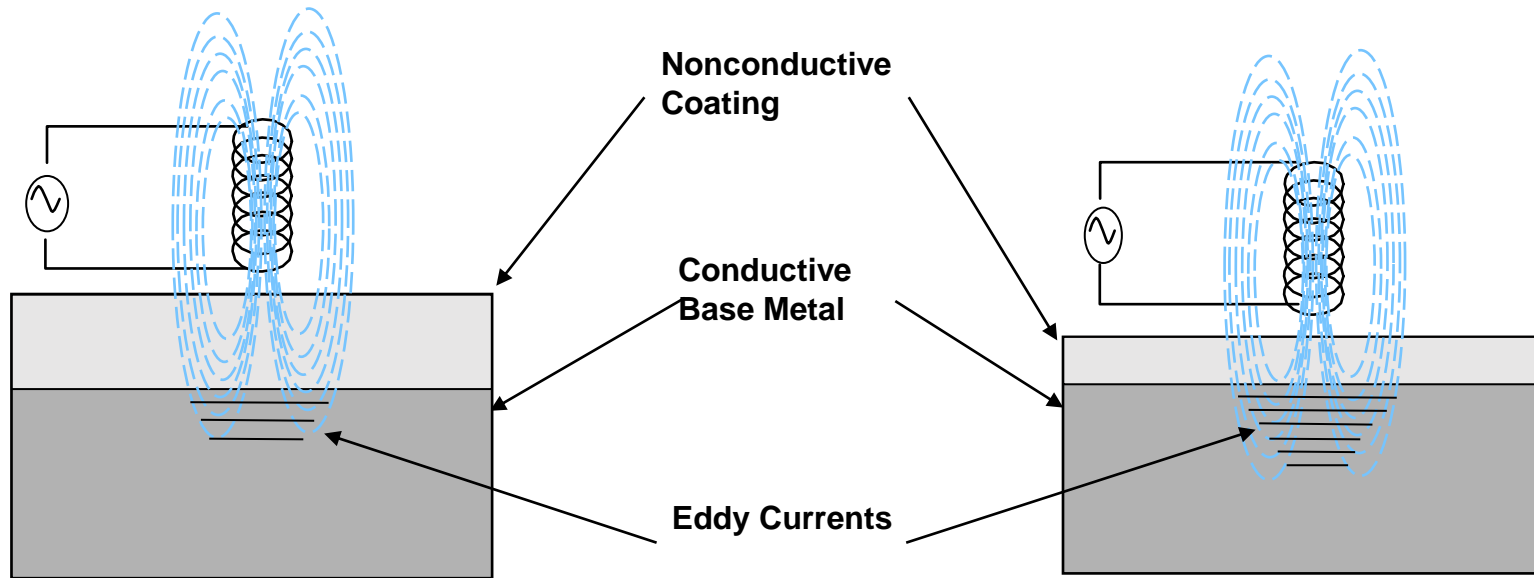
**سوال:** چگونه می توان ضخامت یک ماده نارسانا را به کمک آزمون جریان گردابی بدست آورد؟



# بازرسی جریان گردابی: کاربردها، ۳- اندازه گیری ضخامت پوشش نارسانا

■ ضخامت پوشش های نارسانا روی مواد رسانا را می توان با دقت بالا به کمک روش جریان گردابی محاسبه نمود.

■ وجود پوشش نارسانا سبب فاصله گرفتن پروب از ماده رسانا و تضعیف جریان گردابی می شود.



# بازرسی جریان گردابی: کاربردها، ۳- اندازه گیری ضخامت پوشش نارسانا

■ اندازه گیری ضخامت رنگ در نقاط مختلف از بدنه بیرونی هواپیما (۸ نقطه)





# بازرسی جریان گردابی: کاربردها، ۴- اندازه گیری خواص الکتریکی

■ جریان گردابی به تغییرات هدایت الکتریکی و نفوذ مغناطیسی حساس است. این ویژگی این امکان را فراهم می کند تا بتوان بازرسی های زیر را انجام داد:

■ تشخیص مواد

■ دسته بندی مواد

■ تشخیص آسیب های حرارتی

■ اندازه گیری ضخامت روکش ها و پوشش ها (Plating & Cladding)

■ نظارت عملیات حرارتی



# بازرسی جریان گردابی: کاربردها، ۴- اندازه گیری خواص الکتريکی

- اندازه گیری میزان هدايت الکتريکی نقاط مختلف ناقوس ليبرتی (Liberty Bell) توسط مهندسان بويینگ برای ارزیابی یکنواختی خواص ناقوس (ريخته گری شده از جنس برنز)



## تجهیزات

■ تجهیزات بسیار متنوعی برای بازرسی جریان گردابی توسعه پیدا کرده است. برای بازرسی صحیح انتخاب ابزار مناسب ضروری است.

■ حداقل تجهیزات لازم برای بازرسی به روش جریان گردابی عبارتند از:

■ تجهیزات اندازه گیری

■ پروب

■ نمونه های مرجع (استاندارد)



# تجهيزات: تجهيزات اندازه گیری دیجیتال



- دستگاه‌های اندازه‌گیری بر دو نوع دیجیتال و آنالوگ هستند.
- نوع دیجیتال معمولاً برای اندازه‌گیری یک متغیر مانند هدایت الکتریکی یا ضخامت پوشش نارسانا طراحی شده‌اند. این نوع اندازه‌گیر معمولاً دقت بالاتری نسبت به نوع آنالوگ دارد.



# تجهیزات: تجهیزات اندازه گیری آنالوگ



▪ دستگاه‌های اندازه گیری آنالوگ برای بازرسی‌های متنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله:

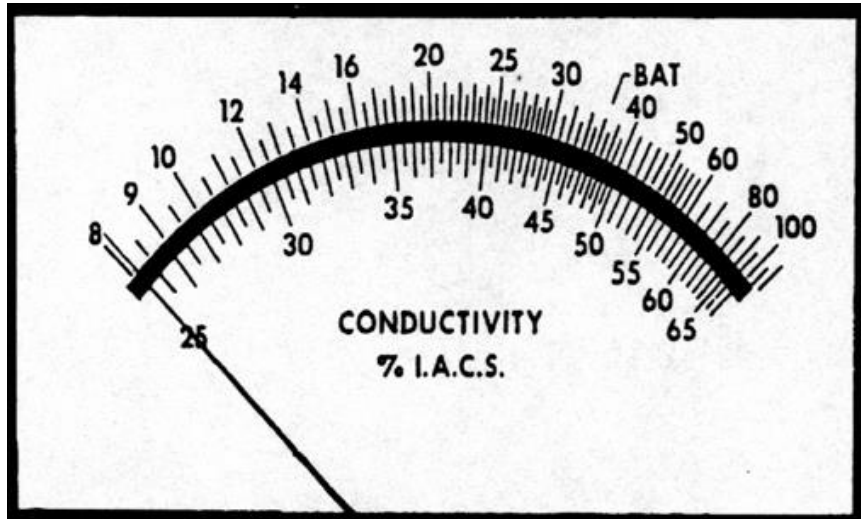
▪ تشخیص ترک

▪ اندازه گیری ضخامت قطعات

▪ اندازه گیری پوشش‌های نارسانا و رسانا



## تجهیزات: تجهیزات اندازه گیری آنالوگ



■ دستگاه‌های اندازه‌گیری آنالوگ در دو نوع کالیبره شده و غیر کالیبره موجود هستند.

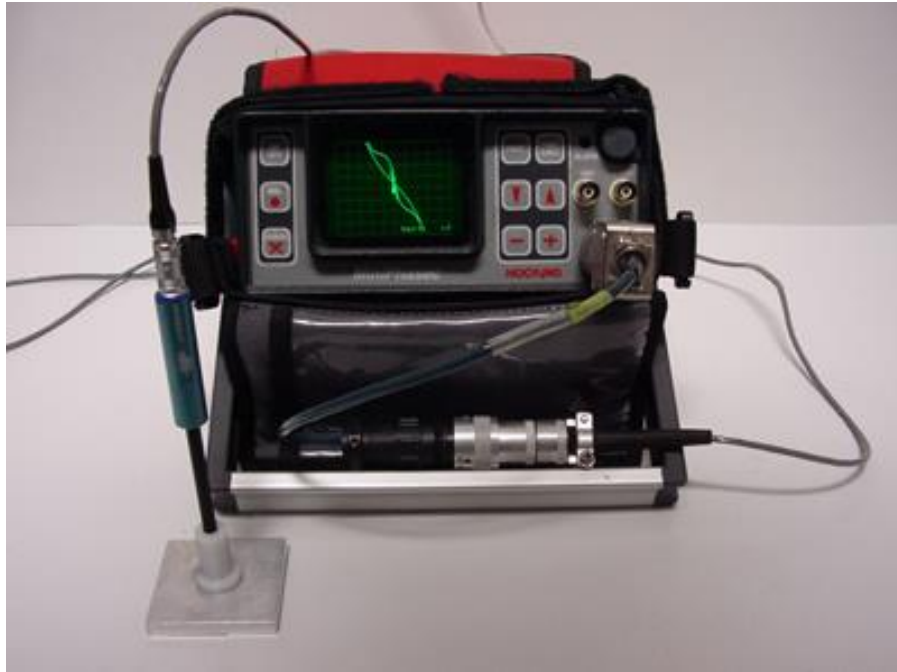
■ نوع کالیبره شده: بصورت مستقیم متغیر مورد اندازه‌گیری را نمایش می‌دهد.

■ نوع غیرکالیبره: انعطاف پذیری بیشتری داشته و در آزمایش‌های متنوع‌تری می‌توانند استفاده شوند.

**نیاز به داده‌های برون‌یابی دارد.**



# تجهیزات: آشکارسازهای قابل حمل گردابی

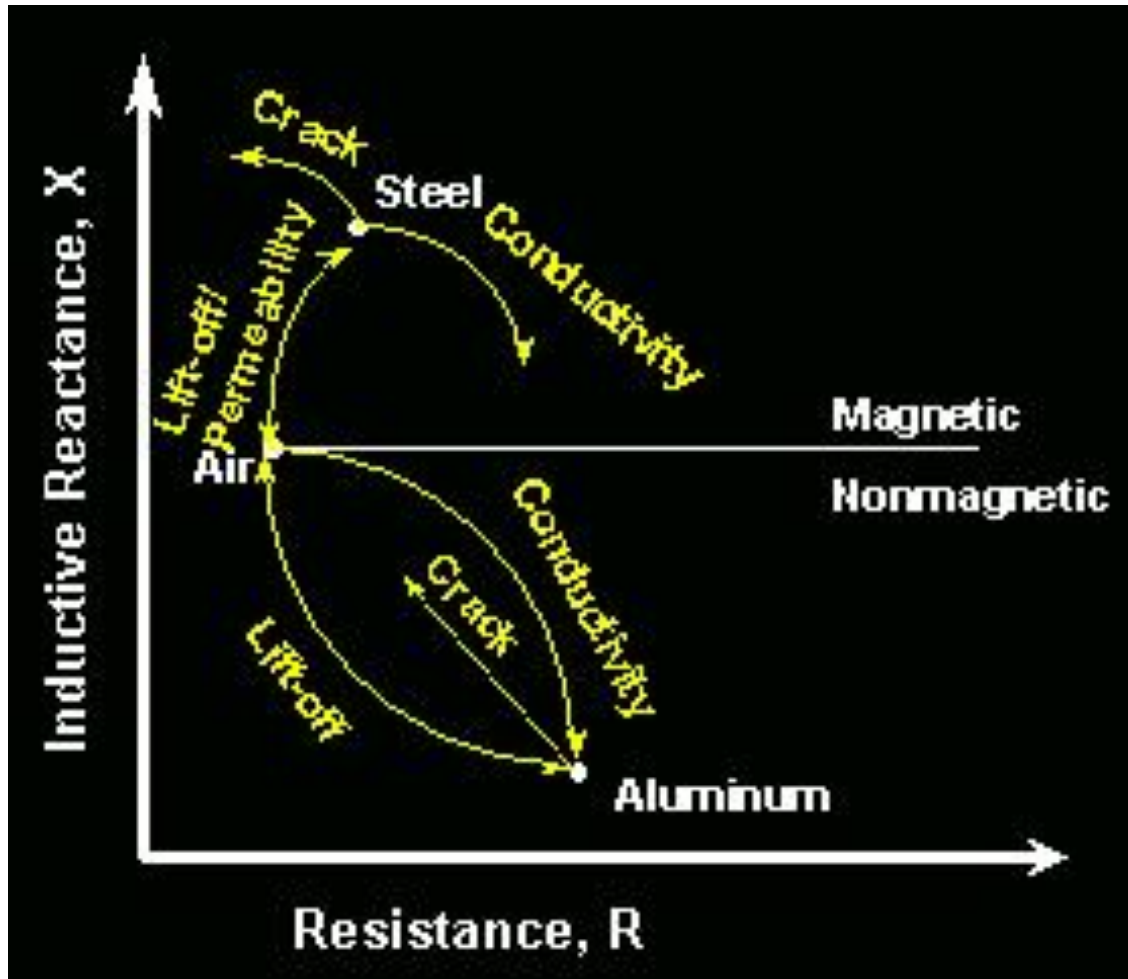


▪ دسته دیگری از تجهیزات اندازه‌گیری گردابی آشکارسازهای گردابی هستند که داده‌های بازرسی را به صورت نمودارهای امپدانس صفحه‌ای نمایش می‌دهند.



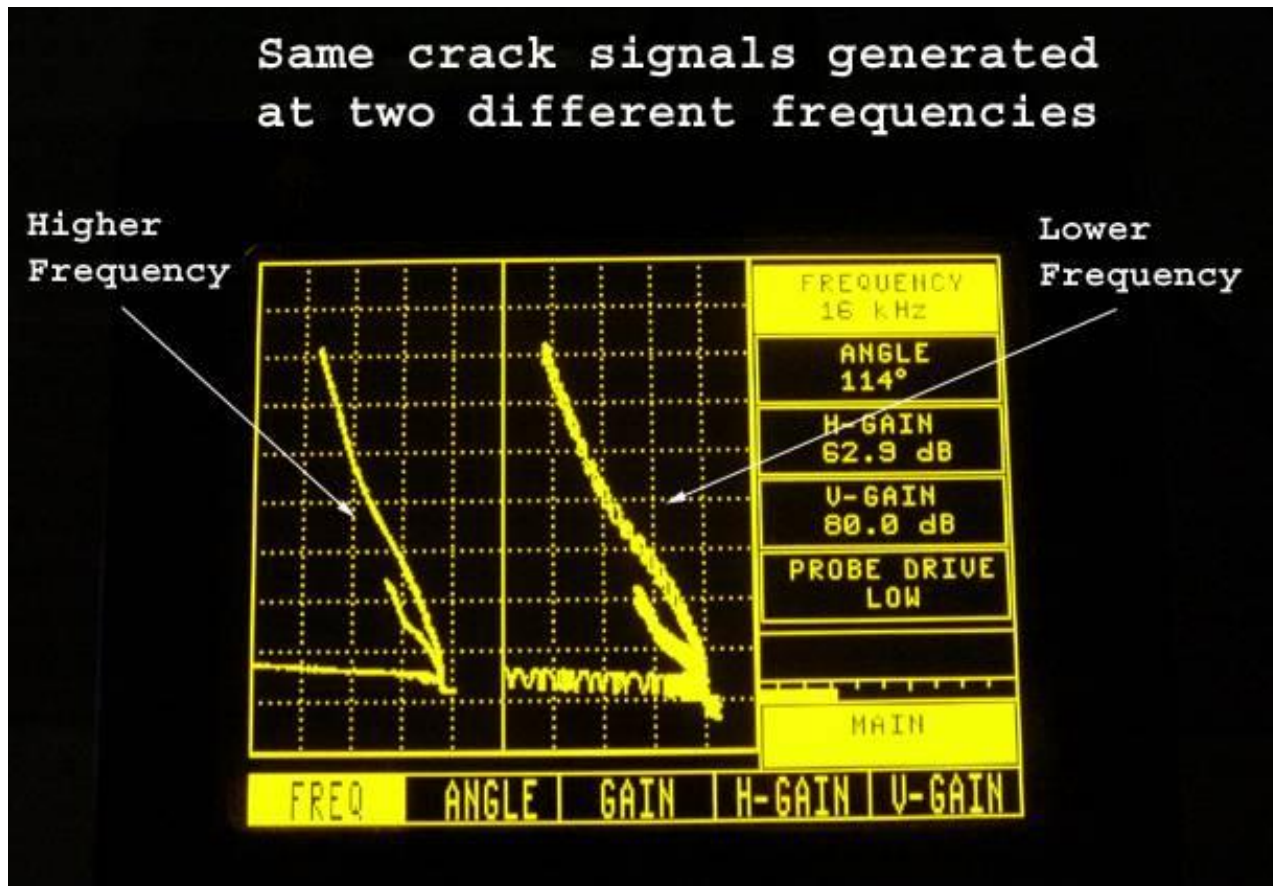
# تجهیزات: آشکارسازهای قابل حمل گردابی

- در آشکارسازهای گردابی، نمودار امپدانس برآیند بر حسب مقاومت و اندکتانس القایی نمایش داده می شود.





# تجهیزات: آشکارسازهای قابل حمل گردابی



■ آشکارسازی های پیشرفته گردابی  
عموماً دیجیتالی بوده و به دو صورت  
تک فرکانس و دو فرکانس موجود  
هستند.

■ نوع دو فرکانس می تواند در حین  
آزمایش دو فرکانس مختلف را به  
صورت متوالی ایجاد کند.



# تجهیزات: ابزارهای چند فرکانسی جریان گردابی



- ابزارهای چند فرکانسی جریان گردابی ابزارهایی هستند که سیم پیچ آن ها با بیش از دو فرکانس کار می کند.
- فرکانس های مختلف جریان می توانند همزمان یا بصورت متوالی اعمال شوند.



# تجهیزات: ابزارهای چند فرکانسی جریان گردابی



- این ابزارها به صورت گسترده در بازرسی لوله های مبدل های حرارتی، صنایع شیمیایی و پتروشیمی مورد استفاده قرار می گیرند.
- همچنین قابلیت اتصال به شبکه کامپیوتری و استفاده همزمان چندین پروب (تا ۴ پروب) را دارند.



# تجهیزات: ابزارهای چند فرکانسی جریان گردابی

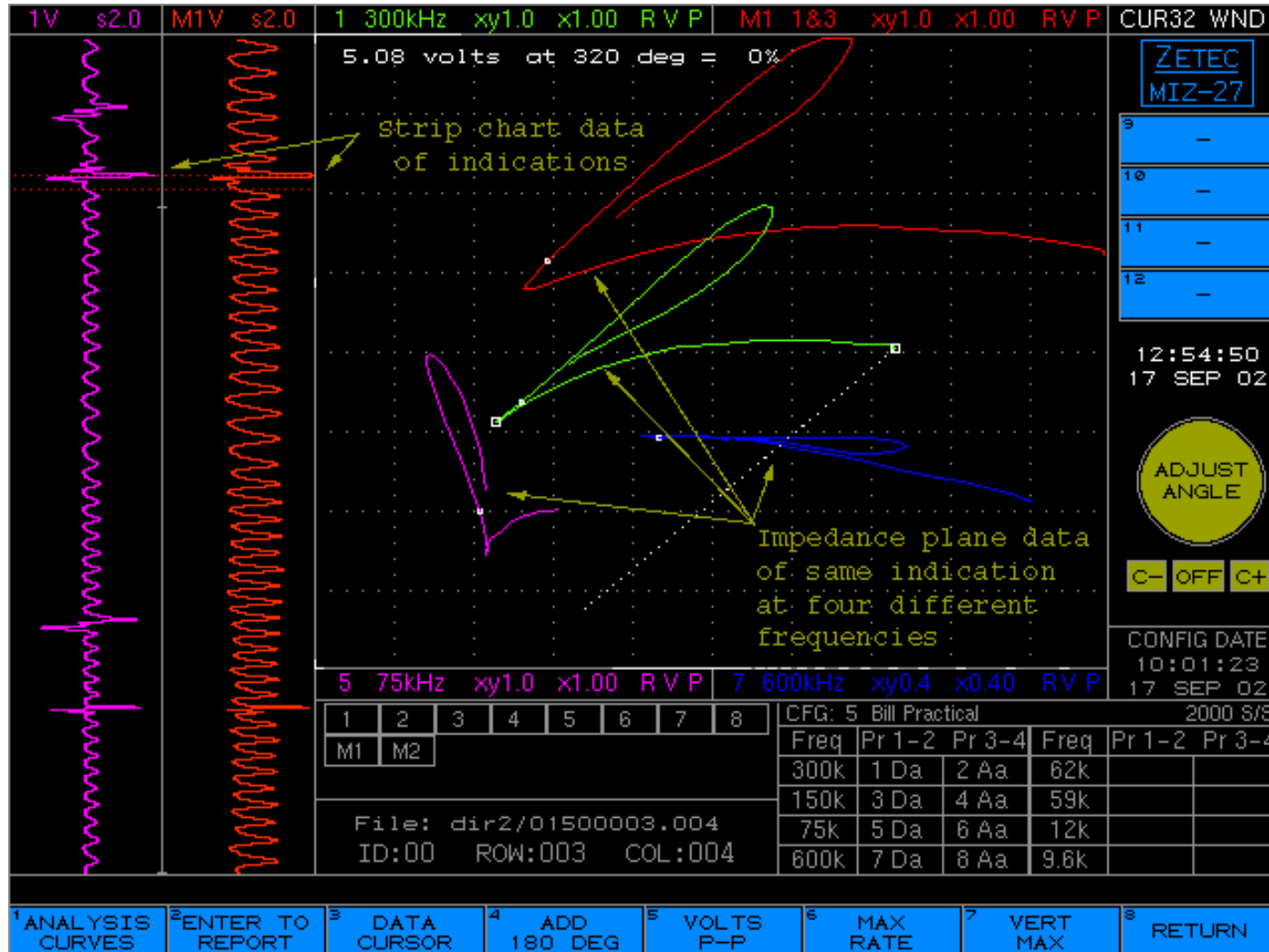
■ مزایای بازرسی چند فرکانسی:

- امکان جمع آوری داده های بیشتر با یکبار استفاده از پروب
- امکان مقایسه سیگنال یک ناپیوستگی در فرکانس های مختلف
- امکان ترکیب کردن فرکانس های مختلف که به کاهش یا حذف منابع نویز منجر می شود.
- بهبود آشکارسازی عیوب و تفسیر علائم اندازه های مختلف عیوب



# تجهیزات: ابزارهای چند فرکانسی جریان گردابی

- صفحه یک ابزار بازرسی چند فرکانسی در حین آزمایش



# تجهیزات: پروب های جریان گردابی

- یکی از نکات بسیار مهم جهت جمع آوری داده های کافی برای بازرسی گردابی، انتخاب پروب مناسب است.



# تجهیزات: پروب های جریان گردابی

- موارد زیر در انتخاب پروب باید مورد توجه قرار گیرد:
- چه مقدار نفوذ در داخل ماده لازم است (سطحی یا زیر سطحی)
- مقدار حساسیت آزمایش
- نوع اتصال پروب به وسایل اندازه گیری گردابی
- اندازه پروب (پروب کوچکتر: نفوذ کمتر)
- نوع پروب (مطلق، نسبی، بازتابشی یا هیبریدی)



# تجهيزات: پروب های جریان گردابی

■ سه دسته اصلی پروب ها:

■ پروب های سطحی

■ قطر داخلی (ID) یا پروب بوبین (Bobbin probe)

■ قطر خارجی (OD) یا پروب محیطی (Encircling probe)





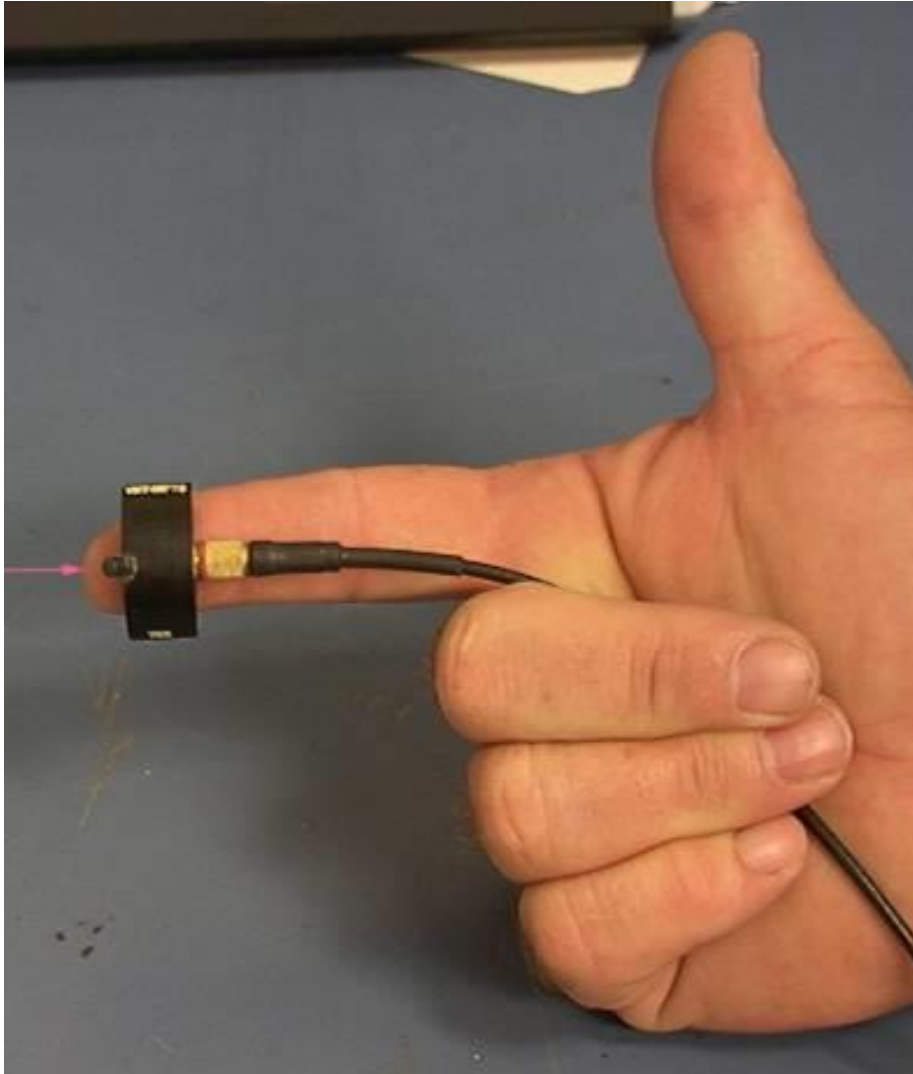
# تجهيزات: پروب های جریان گردابی

- پروب های سطحی سیم پیچ هایی هستند که داخل یک محفظه پلاستیکی قرار دارند. اپراتور پروب را روی سطح قطعه حرکت می دهد.



## تجهیزات: پروب های جریان گردابی

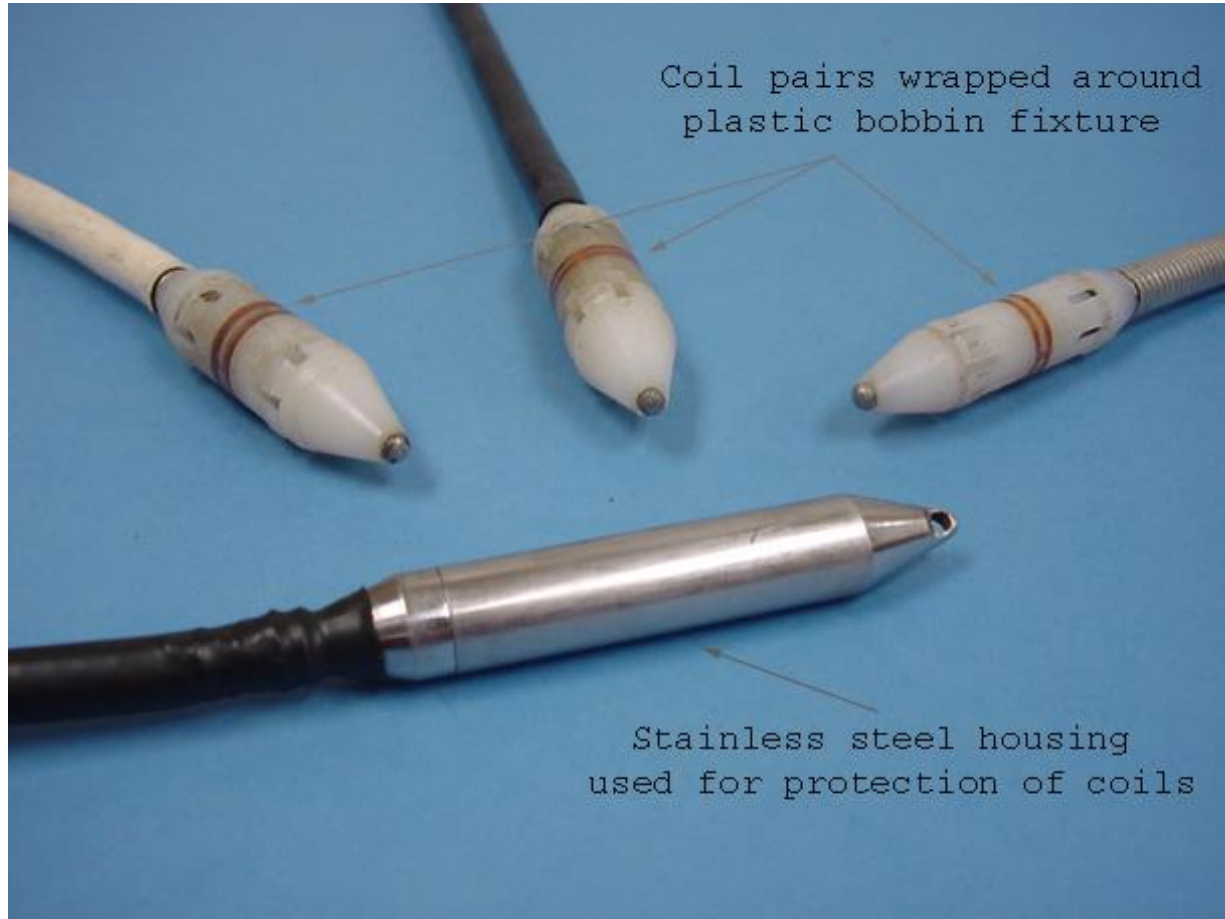
■ برخی از پروب های سطحی ممکن است اندازه خیلی کوچک داشته باشند تا دسترسی به نواحی محصور امکان پذیر شود.



پروب انگشتی



# تجهیزات: پروب های جریان گردابی



- پروب های ID یا بوبین، سیم پیچ هایی هستند که به محیط بیرونی یک مغزی پلاستیکی پیچیده شده اند.
- این پروب ها برای بازرسی سطوح داخل لوله ها طراحی شده اند.



## تجهیزات: پروب های جریان گردابی

- پروب های OD سیم پیچ هایی هستند که به محیط بیرونی یک گیره استوانه ای (توخالی) پلاستیکی پیچیده شده اند.
- در حین آزمایش، نمونه از داخل سیم پیچ عبور می کند.
- این پروب ها برای بازرسی میله ها و لوله ها استفاده می شوند.



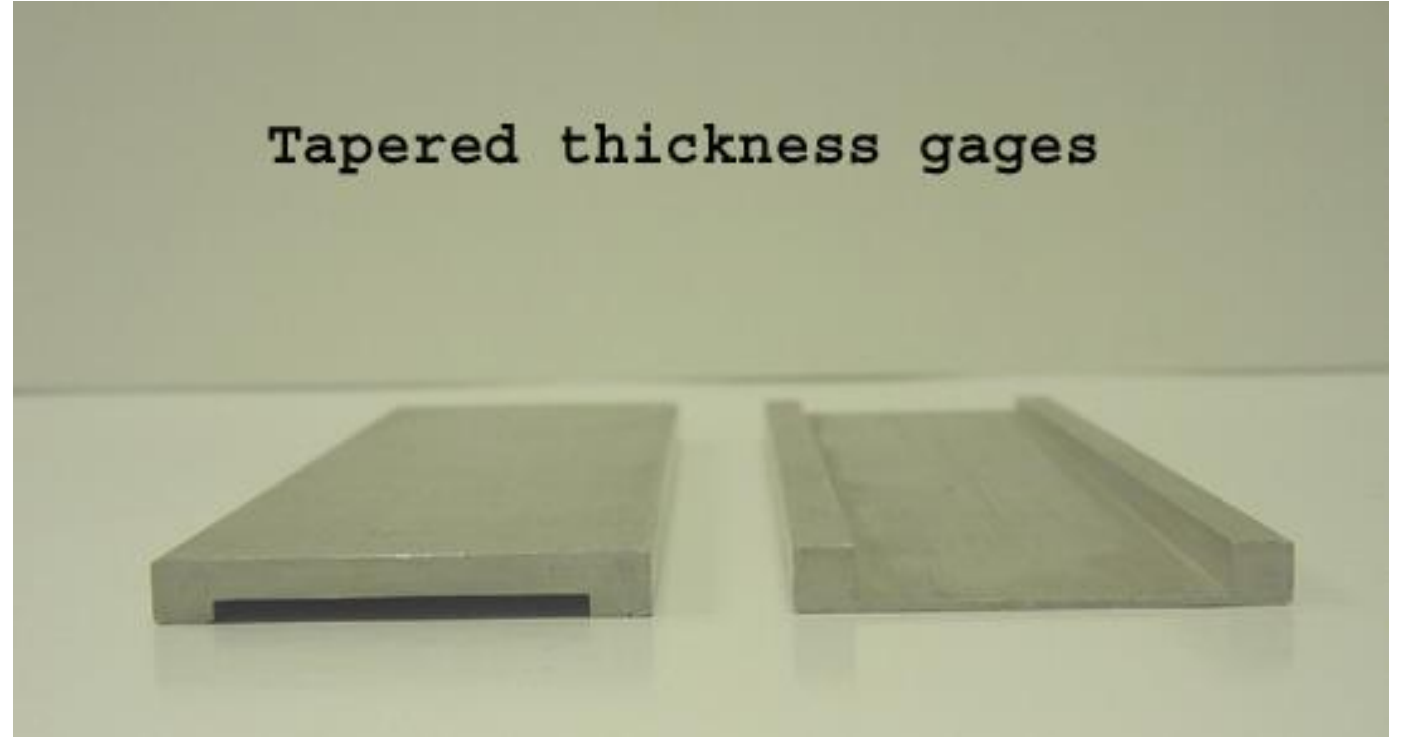
## تجهیزات: نمونه های مرجع (استاندارد)

- برای اینکه بازرس جریان گردابی داده های مفیدی در حین آزمایش بدست آورد، لازم است سیگنال های دریافتی از آزمایش با مقادیر شناخته شده مقایسه شود.
- نمونه های مرجع از مواد مشابه (یا بسیار نزدیک) به ماده مورد آزمایش ساخته شده اند.
- برای انواع مختلف آزمایش های جریان گردابی نمونه های مرجع مختلفی ارائه شده است.
- چند نمونه مرجع خاص در ادامه معرفی شده است.

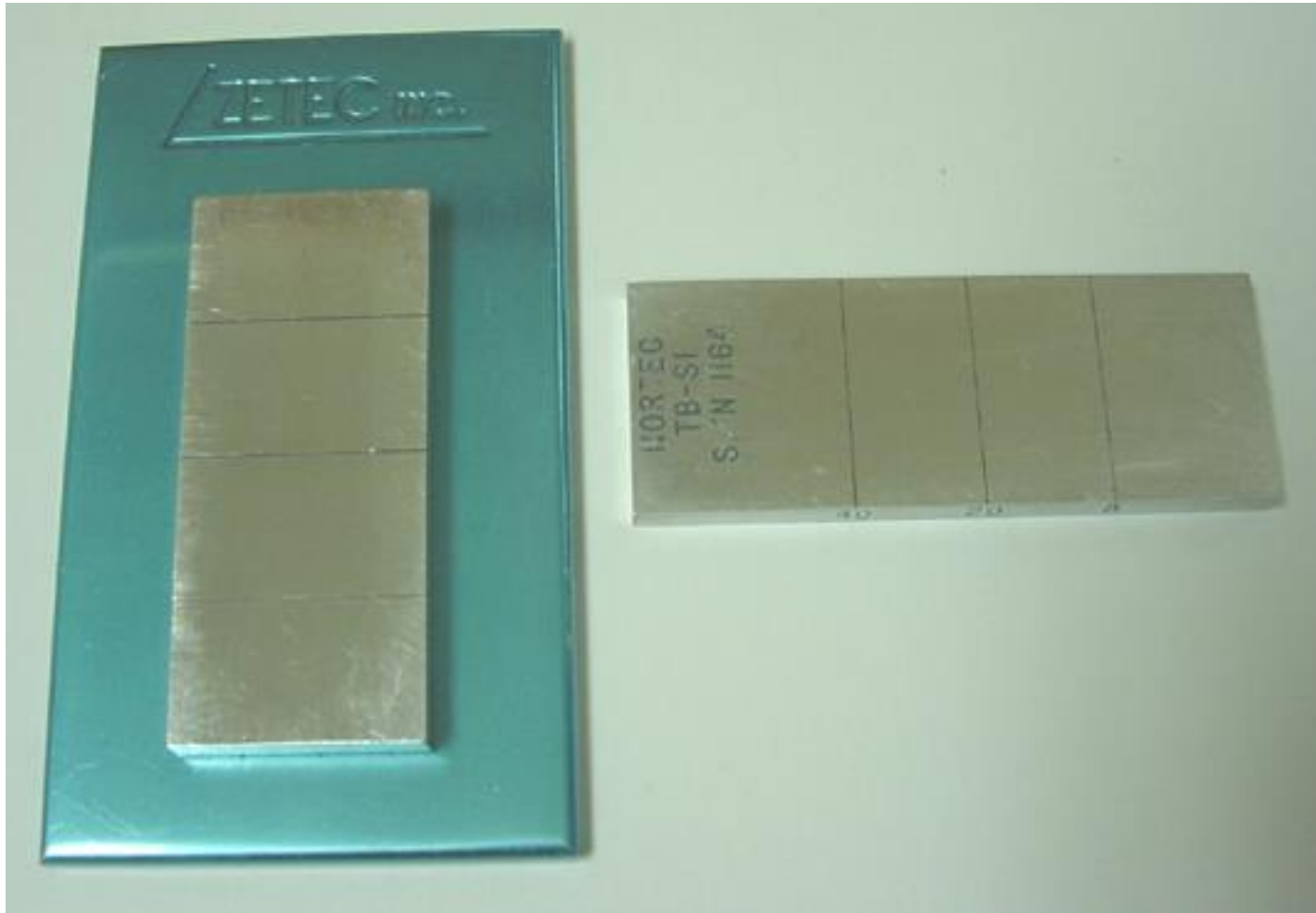


## تجهیزات: نمونه های مرجع (استاندارد)

- نمونه های استاندارد ضخامت برای کمک به اندازه گیری میزان نازک شدگی ناشی از خوردگی و سایش استفاده می شوند.



## تجهیزات: نمونه های مرجع (استاندارد)

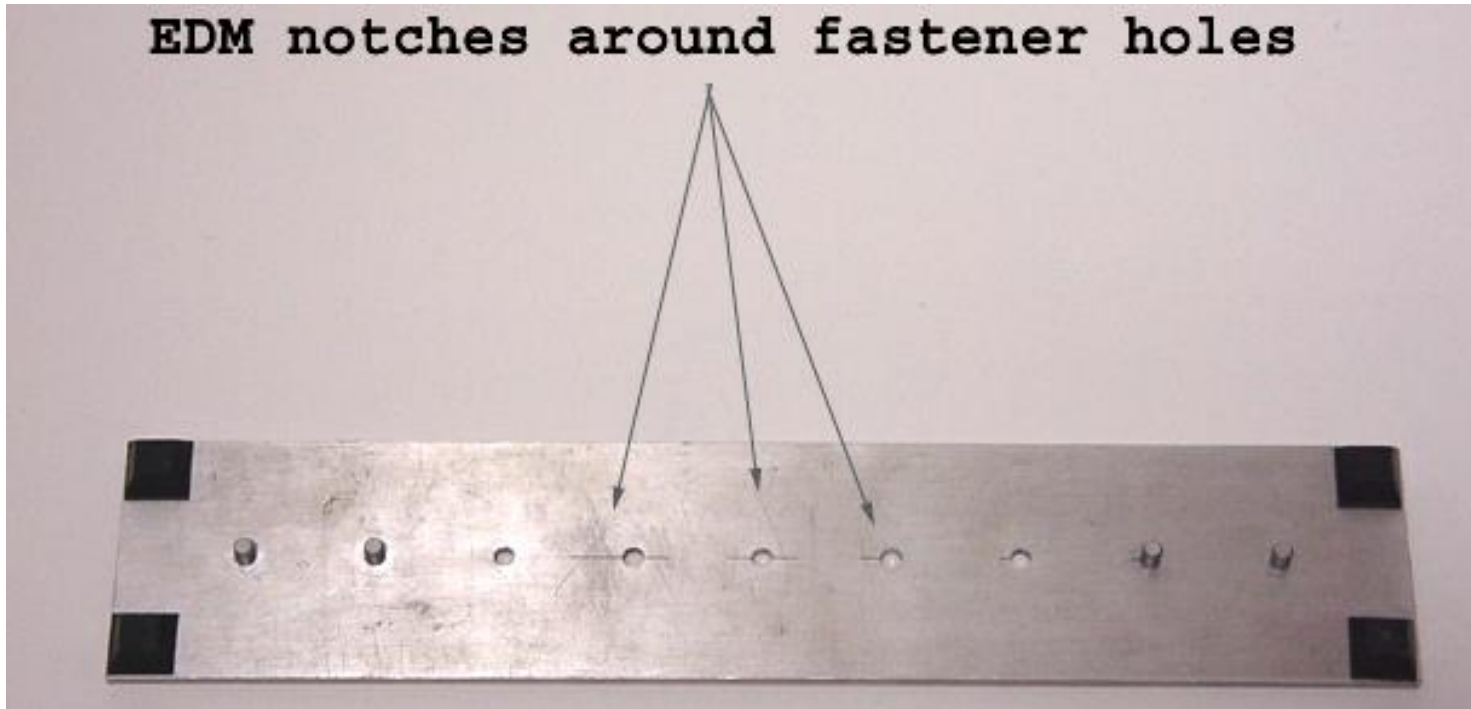


■ نمونه های استاندارد ترک: با استفاده از EDM شیارهای مختلف با عمق های مختلف روی نمونه ایجاد می شود.

■ توجه: سیگنال های دریافتی از نمونه استاندارد از سیگنال ترک قوی تر هستند.

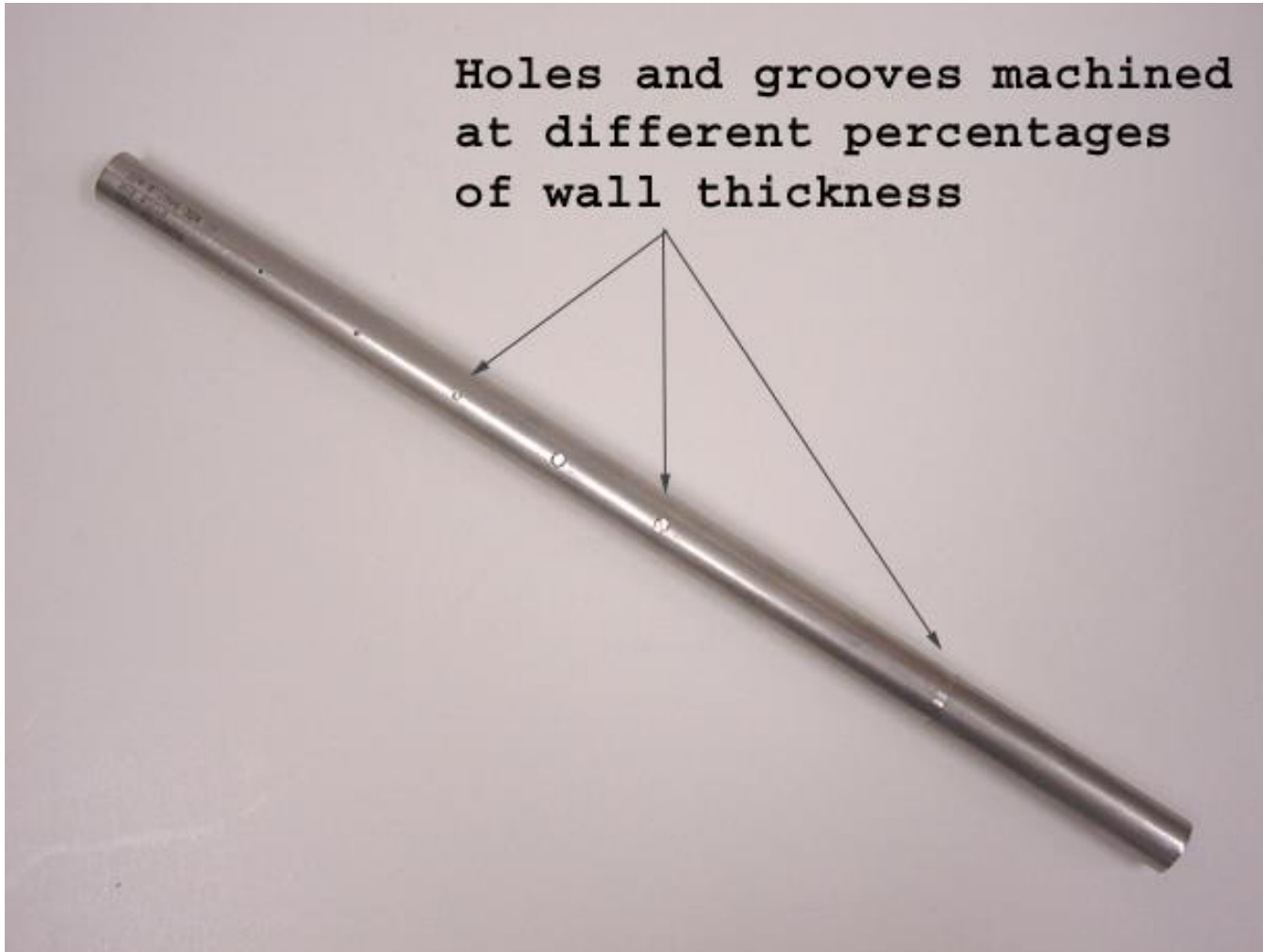
## تجهیزات: نمونه های مرجع (استاندارد)

- نمونه استاندارد برای اندازه گیری ترک در لبه سوراخ های گیره بندی (شیارهایی با طول های مختلف در لبه سوراخ توسط EDM ایجاد شده است).



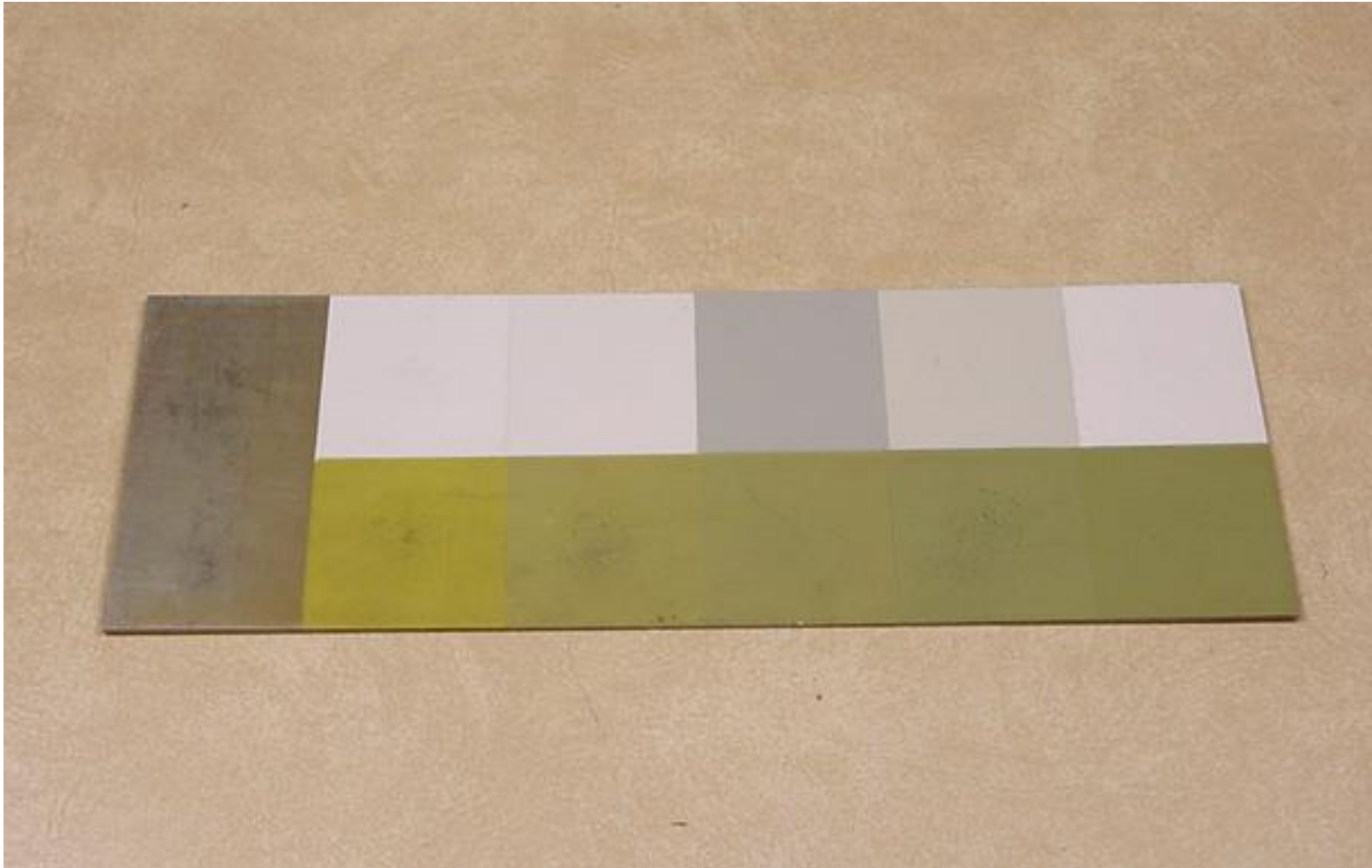


## تجهیزات: نمونه های مرجع (استاندارد)



- نمونه استاندارد ASME برای خوردگی (چاله شدن) سطح لوله
- شیارها و سوراخ هایی با عمق های مختلف در سطح لوله ایجاد شده است.

## تجهيزات: نمونه های مرجع (استاندارد)



- نمونه استاندارد پوشش نارسانا (رنگ) با ضخامت های مختلف روی سطح آلومینیوم



# مزایای روش جریان گردابی

- حساس به ترک ها و سایر عیوب کوچک
- آشکارسازی عیوب سطحی و نزدیک سطح
- دریافت داده های آنی از آزمایش
- تجهیزات قابل حمل
- برای مواردی غیر از تشخیص عیب قابل استفاده است.
- آماده سازی حداقلی نمونه
- عدم نیاز به تماس پروب با قطعه
- بازرسی شکل های پیچیده و اندازه های مختلف مواد رسانا



# محدودیت های روش جریان گردابی

- فقط برای مواد هادی جریان الکتریکی قابل استفاده است.
- سطح مورد آزمایش باید در دسترس باشد.
- آموزش و مهارت بسیار بیشتری نسبت به سایر روش های بازرسی لازم است.
- زبری سطح ممکن است باعث خطا شود.
- نمونه های استاندارد برای تنظیم و مقایسه داده ها نیاز است.
- عمق نفوذ محدود است.
- ترک هایی که موازی سیم پیچی پروب باشند یا موازی جهت اسکن پراب باشند شناسایی نمی شوند.

