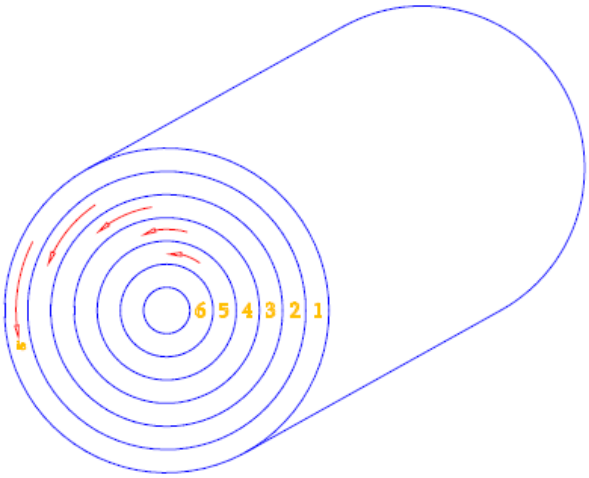
توزیع جریان های گردابی در یک استوانه ی فلزی **Eddy current distribution in a Solid bar**

تهیه کننده : مهندس ولی اله ورمزیار (مدیر تحقیق و توسعه)

میزان جریان گردابی القایی شده در یک استوانه تو خالی نازک، با توجه به شکل فیزیکی همگون و جریان کویل، تقریبا ثابت در نظر گرفته می شود. در صورتی که یک استوانه ی توپر فلزی داخل کویل قرار گرفته باشد، تحلیل رفتارهای جریان گردابی قدری پیچیده و مشکل خواهد بود.

در تصویر شکل ذیل این وضعیت به ساده ترین روش تحلیل و نشان داده شده است. در این شکل استوانه ی توپر به لایه های نازک تو در تو تبدیل شده است. بیشترین میزان شدت میدان مغناطیس در فضای حد فاصل کویل و بار استوانه ای دیده می‌شود، لذا بیشترین دامنه جریان گردابی القایی در سطح اولیه بار ایجاد می‌گردد.



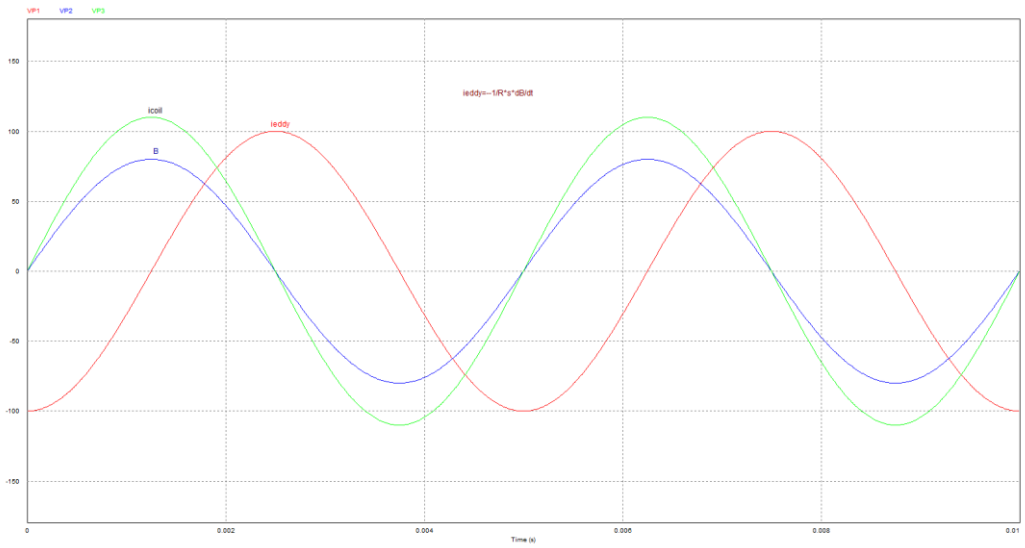
هر چه به سمت مرکز استوانه می رویم دامنه جریان القایی کمتر خواهد شد و جهت جریان تغییر نخواهد کرد، اما تأخیر فازی اتفاق می افتد.

با توجه به قانون القای فارادای ولتاژ القایی در بار استوانه ای

$E = -\frac{d\phi}{dt}$ اگر جریان کویل $ic = Im \sin\omega t$ ، شارژ مغناطیس ϕ نیز سینوسی و هم فاز با جریان کویل خواهد بود . جریان گردابی القایی استوانه از قانون اهم تبعیت می کند.

$$E = Rie \rightarrow ie = -\frac{1}{R}\frac{d\phi}{dt}$$

$$ic \propto -k \cos wt$$



دقت نمایید در قله‌ی موج سینوسی جریان، که میدان تقریبا ثابت و تغییراتی ندارد، جریان گردابی القایی صفر می شود و در شیب دامنه‌ی موج سینوسی میدان مغناطیسی که بیشترین تغییرات را داریم، جریان گردابی فوکو به حداکثر خود می رسد. شدت میدان مغناطیسی در لایه های زیرین به تدریج کمتر خواهد شد. به تبع آن میزان جریان فوکو (گردابی) نیز کاهش می‌یابد. دامنه‌ی جریان گردابی در لایه‌های نزدیک-تر به مرکز استوانه، صرف نظر از این که جنس بار استوانه ای مغناطیس یا غیر مغناطیس باشد، به طور پیوسته کاهش می‌یابد و این پدیده اثر پوستی (Skin effect) شناخته شده است. تحلیل ریاضی توزیع و نفوذ جریان گردابی در بار استوانه ای بسیار پیچیده و نیازمند مطالعه ی فیزیک کوانتوم می باشد.

حالا برای ساده شدن مسئله با فرض اینکه شدت جریان القایی گردابی در عمق بار استوانه ای به صورت نمایی (Exponentially) کاهش می‌یابد به ارزیابی روابط مربوط می‌پردازیم. بهترین نتیجه‌ی حاصل از پیشنهاد فوق، این است که می توانیم یک عمق نفوذ مؤثر برای جریان گردابی تعریف کنیم.

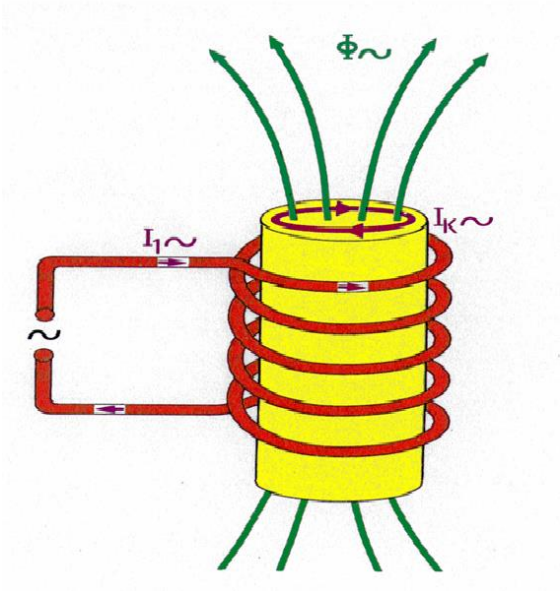
این عمق، نفوذ مرجع یا نفوذ پوستی " d " به فرکانس جریان متناوب کویل، مقاومت الکتریکی و خاصیت نفوذ پذیری مغناطیسی باربستگی دارد.

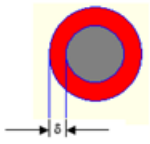
$$d = 500\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

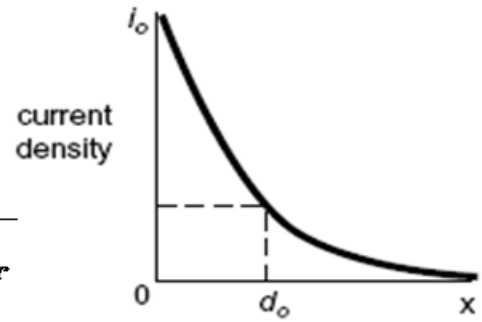
$\rho = \Omega.cm$

f = HZ

$\mu = \mu r \mu 0$ (Dimensionless)







$$\delta = 503\sqrt{\rho / \mu_r \cdot f}$$

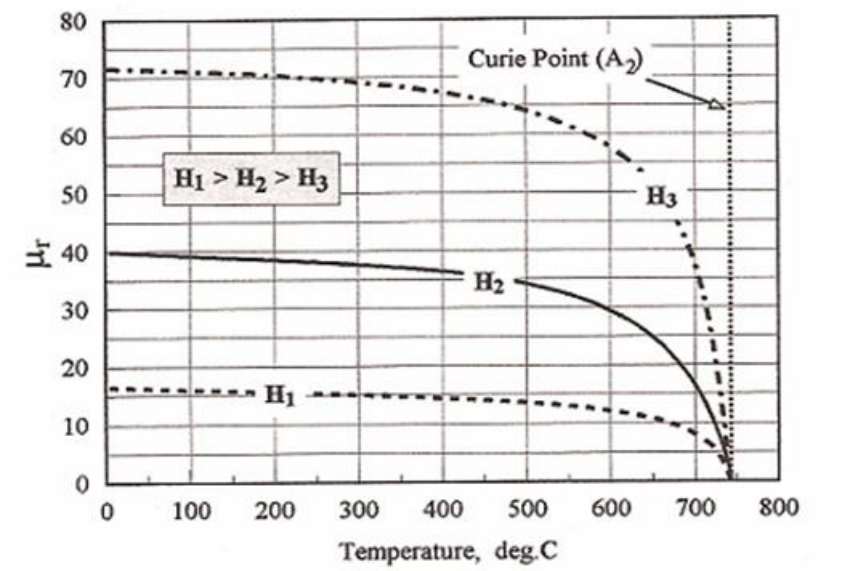
$$i_x = I_0 e^{-x/d_0}$$

عمق نفوذ مرجع از سطح قطعه کار فلزی تا جایی از عمق می باشد که میدان مغناطیس و جریان به حد $\frac{1}{e}$ یا 37% مقدار خود برسند. چگالی توان در این نقطه به میزان $\frac{1}{e^2}$ یا 14 % مقدار خود می رسند.

در شکل زیر منحنی عمق نفوذ در فرکانس های مختلف برای مواد آورده شده است. توجه نمایید در یک فرکانس ثابت با تغییرات دما، هدایت الکتریکی فلزات تغییر نموده زیرا عمق نفوذ تغییر خواهد کرد. البته پرمابیلتی فولادهای مغناطیس نیز با تغییر دما، تغییر خواهد نمود. بگونه ای که در دمای نقطه‌ی کوری پرمابیلتی این فولاد ها (μr) یک خواهد شد، و در دماهای بالاتر از نقطه ی کوری یک در نظر گرفته می-شود.

$\mu = \mu r \mu 0 \rightarrow \mu r = 1 \quad , \quad \mu = \mu 0$

همچنین در این فلزات، عمق نفوذ در دماهای کمتر از کوری، با افزایش توان در سطح بار، افزایش یافته، تا جایی که فلز از نظر مغناطیسی اشباع شده و پرمابیلتی آن کاهش یابد.



A). Effect of temperature and magnetic field intensity on relative magnetic permeability of medium carbon steel

گرمایش القایی بر پایه ی دو مکانیسم تلفات الکتریکی و پس ماند مغناطیس (هیسترزیس)

خاصیت هیسترزیس : (Hysteresis)

هنگامی که ماده در میدان مغناطیسی متغییر با زمان قرار می گیرد ، در اثر تغییر مداوم دو قطبی های داخل کریستال آن ، مقداری انرژی تلف می شود که به آن تلفات هیسترزیس می گویند . این تلفات ناشی از پسماند مغناطیسی و حدود 10 % کل تلفات القایی می باشد.

$$Pn = Kh\, B^{N} max\, f \;(\, n = 1.5 - 2.5\,)$$

اثر دوم تلفات اهمی که بر اثر القای جریان های گردابی (فوکو) در فلزات ایجاد می شود. و حدود 90 % کل تلفات را شامل می گردد .

$$Pe = Rie^2 = Ke\, B^2 max\, f^2$$