



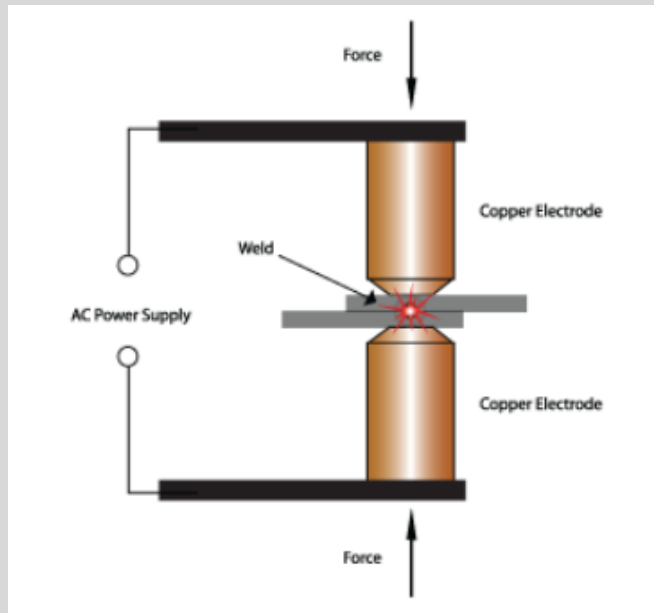
בדיקות לא הורסות לריתוכי התנגדות

רון נקב
מהנדס חומרים ופיזיקה

תהליך הריתוך

- תהליך הריתוך מורכב משלושה פרמטרים:
 - זרם – תלוי בעובי החלקים וברמת ההתנגדות של החלקים המרותכים (1.5+1.5 לפלדה כ - 15KA ולאומיניום כ – 40KA).
 - לחץ – לחץ הינו מרכיב "טריקי", לחץ גבוה מקטין את ההתנגדות בין החלקים ופוגם באיכות הריתוך, לחץ נמוך מידי אינו מסוגל לשמור על נקודת הריתוך ועלול להתנתק במהלך המחזור או ליצור התזות של חומר.
 - זמן – (0.01s-0.63s) טווח זמן הריתוך
 - מחזור הריתוך מורכב ממספר מרכיבים: סגירת אלקטרודות הריתוך, "חימום מוקדם" אם הוגדר, ריתוך (אם פולסים או ללא), קירור נקודת הריתוך, פתיחה.
- מגבלות טכניות לריתוך:
 - סוג החומרים המשודכים (נחושת, אלומיניום, מגלון, פח שחור).
 - עובי החלקים (תלוי בהספקי הרתכת).
 - גיאומטריה פיזית (נגישות אלקטרודות הריתוך).
 - מרחק בין ריתוכים (ריתוכים קרובים מידי פוגמים באיכות הריתוך).

ריתוך בהתנגדות



- ריתוך בהתנגדות הינה טכניקה המחברת שניים או יותר "פחים" ממתכת על ידי הפעלת חום ולחץ בנקודה ספציפית.
 - ריתוך נקודות (כל דבר עולה על הדעת בעוביים 0.2-6.4 מ"מ, פחות 0.2 מ"מ קריטריון שונה)
 - [ריתוך תפר](#) (טבעות, צנרת איוורור...)
 - [ריתוך "פלאש"](#) (דחיפה, מסילות רכבת, משורי סרט, מוטות...)
-
- בזכות היותו חסכוני מאוד, מהירות פעולה ובעל יכולת הטמעה קלה בקו הייצור תהליך ריתוך בהתנגדות מאוד נפוץ בתעשייה.

ריתוך בהתנגדות

◦ הפוקוס בתעשייה בארץ הוא על ריתוכי התנגדות לתעשיית "החלל"

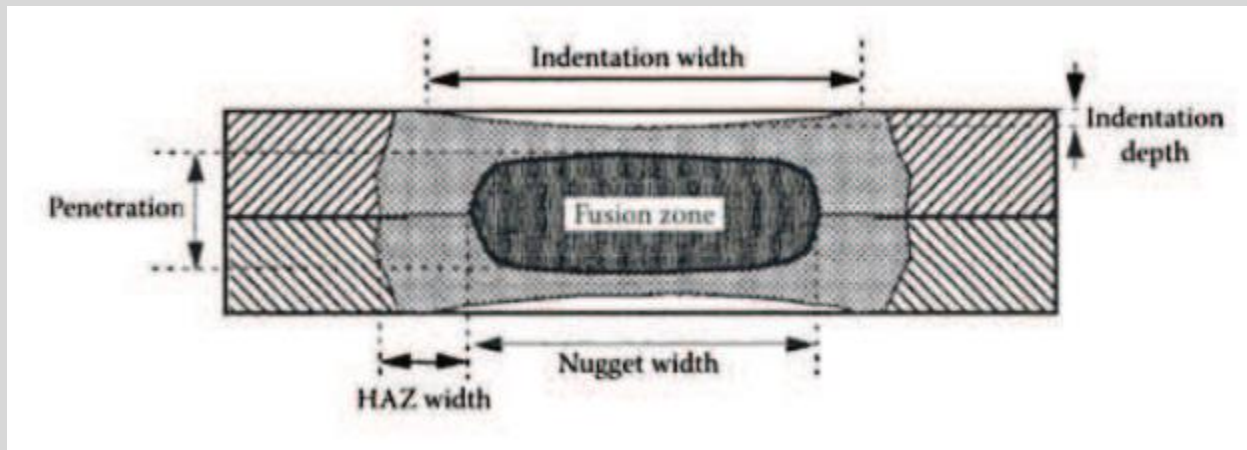
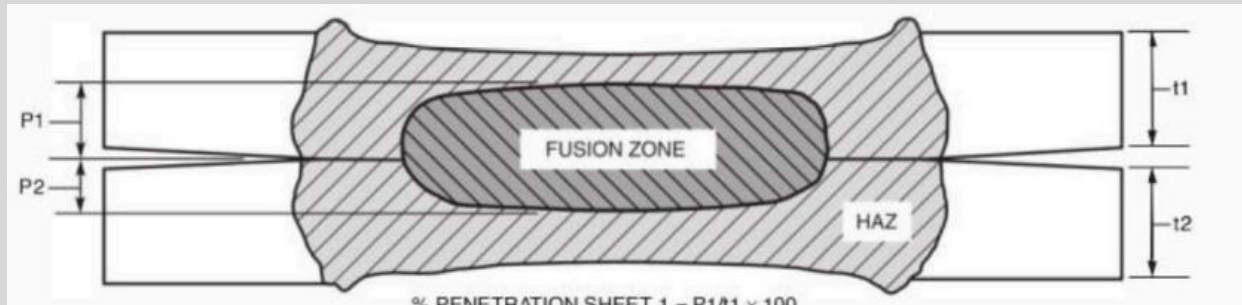
◦ Specification for Resistance Welding for Aerospace Applications **AWS D17.2/D17.2M**

◦ **ולא** על ייצור מנגלים, תעלות אוורור, דלתות ממ"ד...

◦ מושג בסיסי לריתוכי התנגדות וכיוונים כללים ניתן לקבל בתקן הבא: **Recommended AWS C1.1M/C1.1 practice for resistance welding**

◦ **AWS D8.1M:2021 -SPECIFICATION FOR AUTOMOTIVE WELD QUALITY - RESISTANCE SPOT WELDING OF STEEL**

כשלי ריתוך נפוצים



- חוסר התכה - מגוון סיבות
- רתכת ישנה - ללא בקרת ריתוך
- רתכת חדשה - כוללת בקרת ריתוך
- גיאומטריה לא מתאימה
- עומק לחיצה גדול מהמותר
- קוטר נגט קטן/גדול
- סידוק - חיצוני / פנימי
- התזת חומר / "ריתוך קר"
- בועיות / חללים
- חוזק ריתוך נמוך
- הפרדות הפחים או עיוותים

כשלים ריתוך נפוצים

Lobe Curve (Simulation)

Cycle	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13000
17	4.4	4.8	5.2	5.6	6.0	6.4	6.8	7.2	7.6	8.0	8.4	8.8	9.2	9.6	10.0	10.4
16	4.3	4.7	5.1	5.5	5.9	6.2	6.6	7.0	7.4	7.8	8.2	8.6	9.0	9.4	9.7	10.1
15	4.2	4.5	4.9	5.3	5.7	6.0	6.4	6.8	7.2	7.5	7.9	8.3	8.7	9.1	9.4	9.8
14	4.0	4.4	4.7	5.1	5.5	5.8	6.2	6.6	6.9	7.3	7.7	8.1	8.4	8.8	9.1	9.5
13	3.9	4.2	4.6	4.9	5.3	5.6	6.0	6.3	6.7	7.0	7.4	7.7	8.1	8.4	8.8	9.1
12	3.7	4.1	4.4	4.7	5.1	5.4	5.7	6.1	6.4	6.8	7.1	7.4	7.8	8.1	8.4	8.8
11	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.2	5.5	5.8	6.1	6.5	6.8	7.1	7.4	7.8	8.1	8.4
10	3.4	3.7	4.0	4.3	4.6	4.9	5.2	5.5	5.8	6.2	6.5	6.8	7.1	7.4	7.7	8.0
9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	5.0	5.3	5.6	5.9	6.1	6.4	6.7	7.0	7.3	7.6
8	3.0	3.3	3.6	3.9	4.1	4.4	4.7	5.0	5.2	5.5	5.8	6.1	6.3	6.6	6.9	7.2
7	2.8	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4	4.6	4.9	5.2	5.4	5.7	5.9	6.2	6.4	6.7
6	2.6	2.9	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.5	4.8	5.0	5.3	5.5	5.7	6.0	6.2
5	2.5	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5	3.7	3.9	4.1	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.7
4	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5	3.7	3.9	4.1	4.3	4.5	4.7	4.9	5.1
3	1.9	2.0	2.2	2.4	2.5	2.7	2.9	3.0	3.2	3.4	3.5	3.7	3.9	4.1	4.2	4.4

Weld Time, Cycle (50Hz)

Weld Current, A

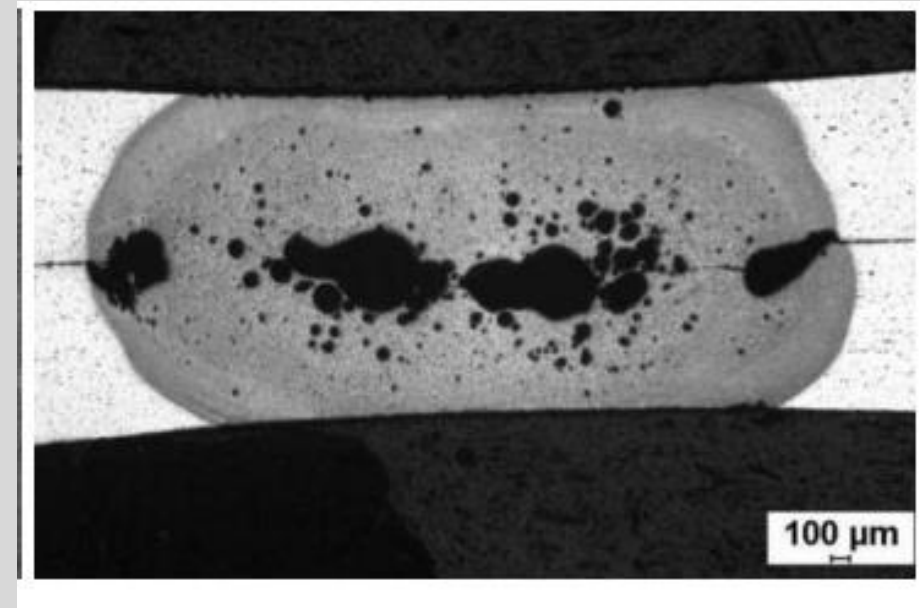
Large Nugget Diameter & Expulsion

Acceptable Nugget Diameter

Small Nugget Diameter

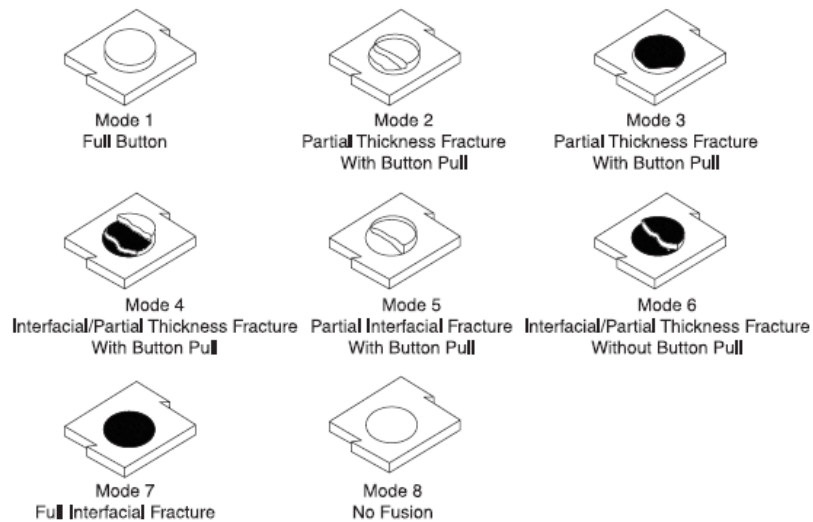
הקשר בין קוטר הריתוך לעובי הפח ניתן בנוסחה $4 \cdot t^{1/2} - 5 \cdot t^{1/2}$

כשלים ריתוך נפוצים



בדיקת "Peel test"

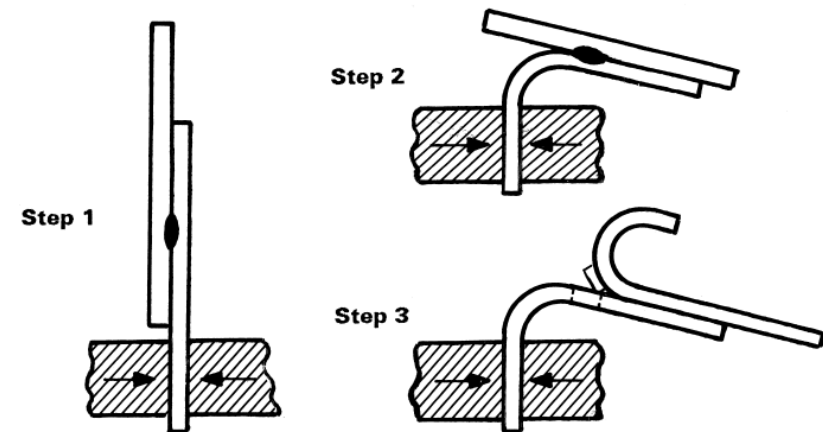
- תהליך בדיקת איכות הריתוך לפי התקן הינו תהליך הרסני הנקרא "peel test"
- מינימום (וממוצע) עומס המתיחה תלוי באופן ישיר בחוזק החומר המרותך.



Source: Adapted from AWS D8.1M:2007, Figures 10–17, American Welding Society.

Figure 7—Fracture or Pullout Modes of Weld Buttons

Figure QW-462.8.1
Spot Welds in Sheets



Peel Test

Step 1 - Grip in vise or other suitable device.

Step 2 - Bend specimen.

Step 3 - Peel pieces apart with pincers or other suitable tool.

רגע לפני בדיקות הורסות...איפה הכסף?

◦ קיום בתעשיית הרכב:

- בכל רכב יש כ 10,000 ריתוכי התנגדות.
- 98% מכח העבודה בתעשיית הרכב כיום רובוטים.
- 100% בקרה על איכות הריתוך בזמן תהליך הריתוך ועצירה בכל חריגה – מספר אפסי של חריגות
- 100% בדיקות לאחר הריתוך באופן אוטומטי
- הכנסת כח אדם לבדיקות איכות לא נראית ראלית ולכן יש מגוון פתרונות.

◦ קיום בתעשיית החלל

- מאות בודדות של ריתוכי ההתנגדות למטוס – מבוצעים ידנית
- רוב המטוס מורכב במסמרות מסיבות הנדסיות
- בדיקות תקן והרחבה – חובה
- שילוב של מספר בדיקות באופן ידני.

בדיקות ללא הרס – בקו ייצור תהליכי

- להלן מספר דרישות מתהליך הבדיקה ברצפת הייצור:
 - זול
 - מהימן
 - מהיר
 - בעל יכולת זיהוי גבוה של פגמים – או לא (false alarm – 0)
 - כמה שיותר אוטומטי (בשני העשורים האחרונים יש קפיצת דרך משמעותית בנושא)
 - פשוט לתפעול

בדיקות לא הורסות סיור בחברת פולקסוואגן



א'/ניסן/תשפ"ד

בדיקות ללא הרס – אוטומציה



א'/ניסן/תשפ"ד

בדיקות ללא הרס – אוטומציה

- קיום בדיקות ויזואליות אנושיות מוחלפות במצלמות בעלות רזולוציה גבוה עם אלגוריתמים מתקדמים שמסוגלים לזהות ולאבחן תקלות בקו הייצור בלי לעצור אותו.
- X-Ray – קיום יש מערכות ממוחשבות בתעשיית הרכב והחלל in-line פחות נדבר עליהם.
- בדיקות מ"לכלכות" פחות ופחות נכנסות כסטנדרט לרובוטיקה – זה לא אמר שאין אבל כל ההתעסקות מסביב יוצרת כאב ראש שיש פתרונות יותר נקיים.
- UT – רב סנסורים קיים גם כן בשוק שוב פחות בתחום העניין שלנו בהרצאה הזו.
- תרמוגרפיה לבדיקה לא הרסנית אוטומטית – בדיקה חדשה בתעשיית הרכב עדין האינפורמציה על איכות הביצועים שלה נמוכה מאוד.

בדיקות ללא הרס – ויזואלית - אנושית

◦ יתרונות

- ניתן לזהות מגוון רחב של פגמים על פני השטח
- קל להדרכה
- אין צורך בציוד יקר
- זול לתפעול
- אין צורך בהכנות מיוחדות

◦ בעיות טכניות:

- זמן עיבוד גבוה מאוד כאשר יש הרבה ריתוכים – עלות מספר העובדים קופץ
- תלוי בכושר העיבוד של העובד, ורמת הריכוז שלו.
- ניתן לזהות רק פגמים הנמצאים על פני השטח.

בדיקות ללא הרס – רדיוגרפיה (X-Ray)



יתרונות

- מגוון החומרים הנבדק כמעט ואינו מוגבל.
- בעל יכולת לעבד נתונים גם מחומרים עבים – לא רלוונטי.
- אינו דורש הכנות מיוחדות על החלק
- ניתן לקבל תמונה שניתן לתעד אותה

חסרונות

- מוגבל ביכולות לזהות פגמים מישוריים או על פני השטח
- הקרינה מגבילה את סביבת העבודה – או שמביאים את החלק או שמבודדים את הסביבה
- נדרש טכנאי בעל הכשרה ייעודית לעיבוד התמונה
- ציוד יקר מאוד
- נדרש מתח גבוה להפעלת הציוד (אם מגיעים עם מקור רדיואקטיבי הבעיות טיפה שונות)

בדיקות ללא הרס – MT מגנטיות

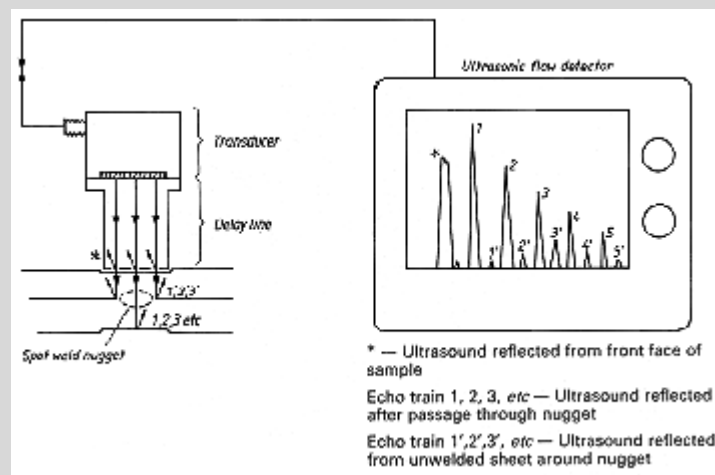
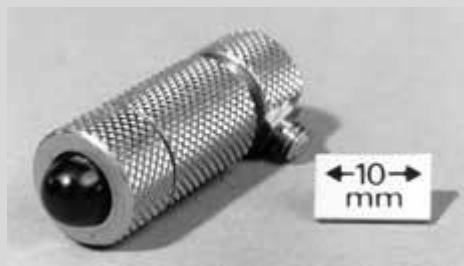
יתרונות:

- קל לתפעול
- זול באופן יחסי
- מזהה פגמים אפילו קטנים (בחומר רטוב) בקלות, וברגישות גבוה
- מזהה בקלות פגמים לא רגילים

חסרונות:

- פועל רק אל מתכות פרו-מגנטיות
- לעיתים יש צורך בהסרת המגנטיות הנשארת על גבי המוצר
- מוגבל רק לפני השטח וטיפה מתחת, לא נותן מענה לבדיקה נפחית.

בדיקות ללא הרס – אולטרסאונד UT



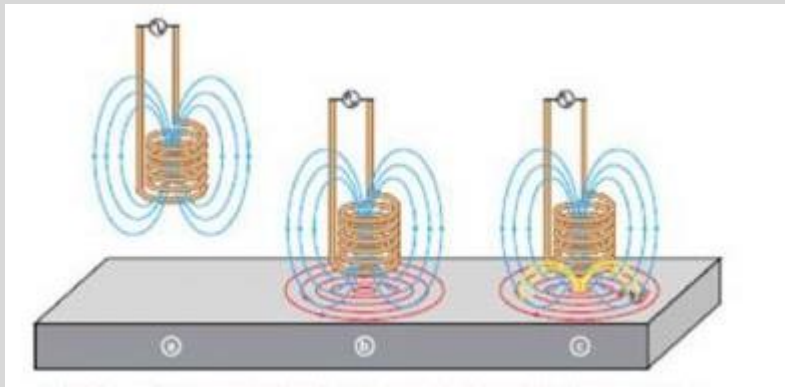
יתרונות:

- קל לניוד
- עקבי בתוצאות
- ניתן לזהות פגמי שטח ופגמי עומק
- לא צריך גישה ישירה לחלק הנבדק
- תוצאות מידיות

חסרונות

- נדרש תרגול רב לטכנאי הבודק
- יקר באופן יחסי
- קשה לשימוש בחומרים דקים
- גיאומטריות מורכבות מקשה על הבדיקה, הטכנאי צריך להכיר את החלק ולדעת לאיזה תוצאה לצפות
- חייב חומר מתווך על מנת להפעיל את המכשיר מגע רציף עם החלק.
- חייבים חלק לכיול התוצאות במעבר בין חומרים שונים

בדיקות ללא הרס – EDDY



יתרונות:

- בעל יכולת לזהות פגמים קטנים מאוד
- מהיר ופשוט
- אינו צורך מגע ישיר או תווך
- ניתן שמור את הנתונים ולתעד אותם
- ציוד קל ולכן נייד

חסרונות:

- מוגבל לעוביים גדולים, בעיקר לפני השטח
- פגמים המקבילים לפני השטח לא יתגלו על ידי זרמי המערבולת
- לא מיועד לשטחים גדולים
- גיאומטריות מורכבות יוצרות סיבוכיות בעיבוד הנתונים.

בדיקות ללא הרס - EMAT

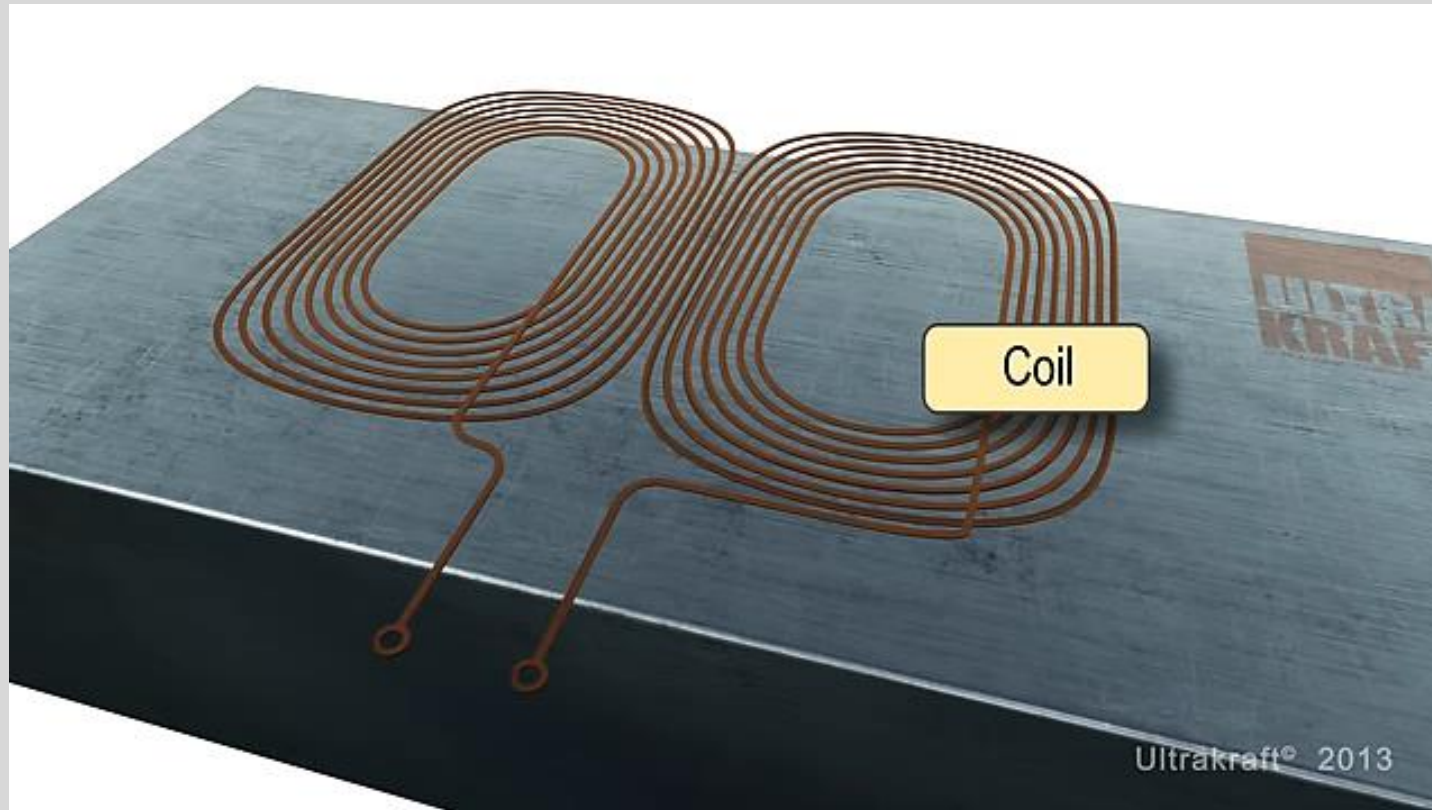
יתרונות:

- יכולת חדירת אות גבוה יותר מאפשר זיהוי פגמים בעומק החלק.
- רגישות גבוהה יותר מאפשרת זיהוי אפילו פגמים קטנים במיוחד.
- דיוק גבוה יותר משאר טכניקות הבדיקה הלא הרסניות האחרות למציאת פגמים פנימיים וכן עובי משטחים מקבילים.
- בעל יכולת להעריך את הכיוון, הגודל, והצורה של הפגמים.
- בעל יכולת להעריך את המבנה של סגסוגות שונות של רכיבים בעלי תכונות אקוסטיות שונות.
- אינו מסוכן לתפעול או לאנשים בקרבת מקום ואינו משפיע על החומרים והציוד בסביבה.
- התוצאות המתקבלות הן מיידיות.

חסרונות:

- נדרש כח אדם מיומן מאוד להפעלת הבדיקה
- נדרש ידע הנדסי רב על מנת לפתח בדיקה סדירה
- חלקים שאינם אחידים בצורתם, מחוספסים, דקים מאוד או קטנים, ואינם הומוגניים - מסובכים לבדיקה

בדיקות ללא הרס - EMAT



תודה רבה על ההקשבה – רונן נקב



א'/ניסן/תשפ"ד