



## בדיקות ללא הרס- NDT בתעופה

הבדיקות ללא הרס (nondestructive test -NDT) מאורגנות לאחרונה מחדש על מנת להמשיך ולהבטיח את אמינות המוצר תחת המטריה המתרחבת של NADCAP. השם בדיקות ללא הרס ניתן לתהליך שתוכנן לאמת את שלמותו של חלק סטרקטורלי בדרך שבה תהליך הבדיקה לא יזיק למוצר. יש לו יישומים בתחומי תעשייה רבים ומגוונים כמו, רפואה, בנייה ותעשיית הרכב. תמיד הבדיקה היא חיונית להבטיח את אמינות המוצר וזו חשובה במיוחד בתעשיית האיירוספייס.

בתחילת הדרך ה NDT נחשב לטכנולוגיה גולמית וחסרת דיוק. אם נחזור בזמן מאות שנים לחרשי המתכת, הנפחים ויצרני פעמוני הכנסיות נגלה שהם "האזינו" לאחידות החזר ההד מנקישות ולאיכות הצליל שהופק וכך למעשה למדו קדמונינו על איכות המוצר וחוזקו. כמו בעבר עדיין בתחילת המאה העשרים הבדיקות המיתולוגיות היו עדיין בשימוש, אנשים הועסקו ב – wheel tapper לבדיקת שלמות של מוצרים בעיקר גלגלי רכבת, כאשר הכו במקצועיות והאזינו לצליל החוזר וכך קבעו אם יש סדקים או לא וקבעו את שלמותו של המוצר שסבל בדרך כלל מעייפות החומר. תתפלאו, מבחן זה עדיין מבוצע אם כי על ידי מכשור ושמו העכשווי – טכניקת השפעה אקוסטית.

בבדיקת חלות דבש במבנים תעופתיים הגיבוי הוא " הקשת מטבע" לודא שאין מצב של אי הדבקה. במהלך השנים פותחו מספר רב של טכניקות לבדיקות ללא הרס ( NDT ) ולמטרות שונות. לדוגמא, למרות שה x-ray התגלה בשנת 1895 והשתמשו בגילוי זה בשדה הרפואה, רק בשנות ה-20 של המאה הקודמת הסתבר למהנדסים והחוקרים שקרני X אפקטיביות גם לבדיקת חומרים דוממים. בדיקה רדיוגרפית יכולה להצביע ביעילות על פגמים בחומר, היות ובדיקה זו יקרה ויש לה השלכות בטיחותיות רבות היא בשימוש באפליקציות שונות ואי לכך התעשייה פיתחה מבחני בדיקה נוספים.

בדיקה ללא הרס מודרנית משמשת בייצור ממספר סיבות שקשורות להוכחת אמינות במוצר ושיפור התכן או בקרת תהליך הייצור והפחתת עלויות. פקטור אחר המשפיע על ה NDT היום הוא הגברת קצב החיים: העולם המודרני דורש יעילות ונוחיות מרובה וזה ניכר בצידוד וגם באנשים. מוצרים הופכים לקלים יותר וקטנים יותר אך הם עדיין נושאים את אותו העומס או אפילו מעבר לו.





## בדיקות ללא הרס- NDT בתעופה

האירוספייס הוא אכן אחד השטחים שבו שיטות NDT משמשות לזיהוי פגמי חומר. מסיבות מובנות, זה עניין חיוני לזהות פגמים מהותיים ללא פגיעה במוצר במהלך הבדיקה. אמינות של חלקים אינדבדואליים תורמת בסופו של דבר לבטיחותו של המוצר המורכב והשלם ( מבנה מטוס או מנוע ) .

כעיקרון, אם למוצר או חלק יש סיכוי לכשל של 1:1000 והוא מורכב מ 99 חלקים נוספים שלכלם יש את אותו סיכוי כשל, אזי למוצר הסופי יהיו 10% סיכויי כשל שמשמעותו 1:10. ניתן לזהות כאן בודאות סיכון הדורש הקלה ( MITIGATION ) כמו NDT במטרה לצפות מראש ולהקטין את פוטנציאל הכשל האפשרי.

מסתבר שלסקטור התעופה והחלל לא מספיק לבצע בדיקה ללא הרס, חשוב וחיוני גם לנתר, לפקח ולנהל בדיקות אלו על מנת שפונקציית הבדיקה תתבצע כהלכה תדווח ותירשם. תפקיד הניהול הוקצה על ידי תעשיית התעופה והחלל למכון לבדיקת ביצועים אשר מבצע בקרות וסיקורים על בסיס ידע מתפתח ומתעדכן שיפורי איכות תמידיים ובאופן שוטף וקבוע. NADCAP הוא תוכנית קואופרטיבית בינלאומית מובילה של חברות מפתח OEMS שתוכננה והוקמה על מנת לשמור על קונצנזוס עלות-תועלת לתהליכים וחלקים מיוחדים ולספק שיפור מתמשך בתעשיית התעופה החלל והרכב.

ה NDT הוא רק אחד מהתהליכים המיוחדים שנכלל בהיקף שרותי ההסמכה. חברות תעופה סביב העולם בעיקר המובילות ( איירבוס, בואינג, רולס רויס ועוד ) משתפות פעולה עם הספקים בתעשייה ומייצרות הסכמות על סטנדרטים שהספקים מחויבים כלפיהם על מנת להסמיך עצמם ל NADCAP. רב החברות שהן קבלניות משנה של ה OEMS מוסמכות ומאושרות היום ל NADCAP כאשר הצורך הוא להשאר בשרשרת האספקה ולהבטיח כמובן שחלקים המיוצרים בסין ובארה"ב יהיו באותה איכות. ה NADCAP בבדיקות ללא הרס מכסה מספר לא מבוטל של שיטות בדיקה :

### בדיקה פלוריסצנטית חודרת – ( FPI ) fluorescent penetrant inspection

תהליך זה נחשב כתהליך פשוט וזול לגילוי פגמים על פני השטח. הסדקים שניתן לגלות בתהליך הם בגודל 150 ננומטר ומעלה. המגבלה של התהליך נעוצה בעובדה פשוטה שהפגם צריך להגיע לפני השטח על מנת שנגלה אותו. התהליך מורכב ממספר שלבים:

- ניקוי המשטח מכל מזהם אפשרי ( לרב מתבצע ניקוי + צריבה בתהליך כימי )
- יישום נוזל חודר תוך כדי טבילה באמבט או בהברשה ( בזמן קצוב עודף הנוזל החודר מוסר מפני השטח )
- יישום חומר מפתח ( DEVELOPER ) לאפשר את בדיקת המשטח
- זיהוי סדקים על פני השטח בחדר/מקום חושך בתאורה מיוחדת
- לאחר הבדיקה ניקוי למניעת קורוזיה וחדירת מזהמים



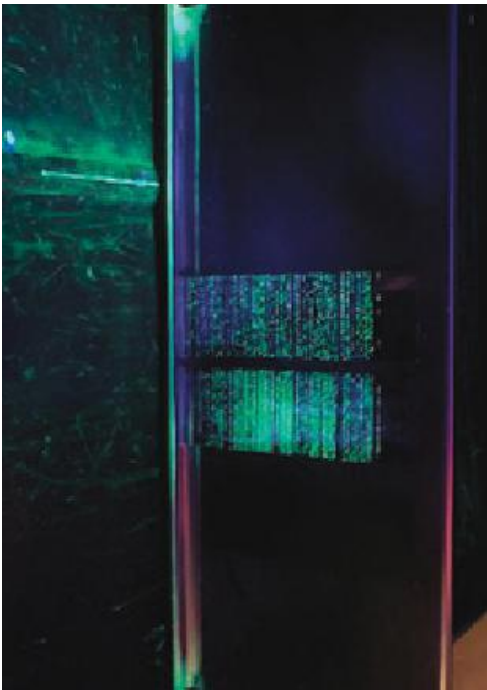
# בדיקות ללא הרס- NDT בתעופה

בעבר התהליך בוצע ויזואלית, בשנים האחרונות היצרנים עוברים לבדיקה יותר ממוכנת באמצעות מצלמות וטלוויזיה בקונפיגורציה רבוטית.

Functional fluorescent penetrant system



A crack in a weld found with fluorescent penetrant

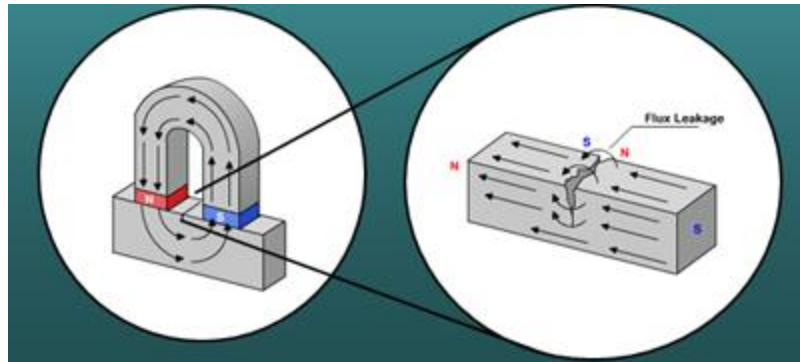
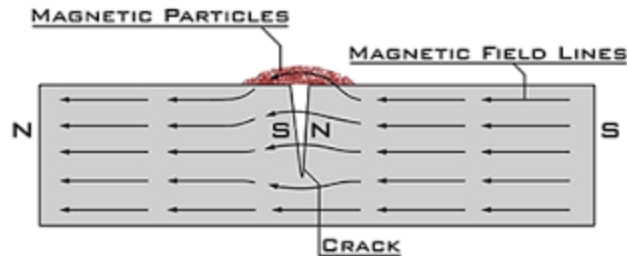




## בדיקות ללא הרס- NDT בתעופה

### בדיקת חלקיקים ממוגנטים – ( MPI ) Magnetic Particle Inspection

בדיקה משמשת בעיקר לגילוי סדקים ופגמים קרובים למשטח ועל פניו. בדיקה זו ניתנת לביצוע במתכות מתמגנטות ( ferromagnetic ) בלבד. ממוגנטים את הפריט הנבדק כאשר עליו מניחים חלקיקים מתמגנטים בנוכחותו של פגם מתעוות השטף המגנטי אשר גורם "לדליפת" השדה על פני השטח של החלק. החלקיקים המתמגנטים מתרכזים באזור דליפת השטף ומצביעים בבירור על הפגם ויזואלית.



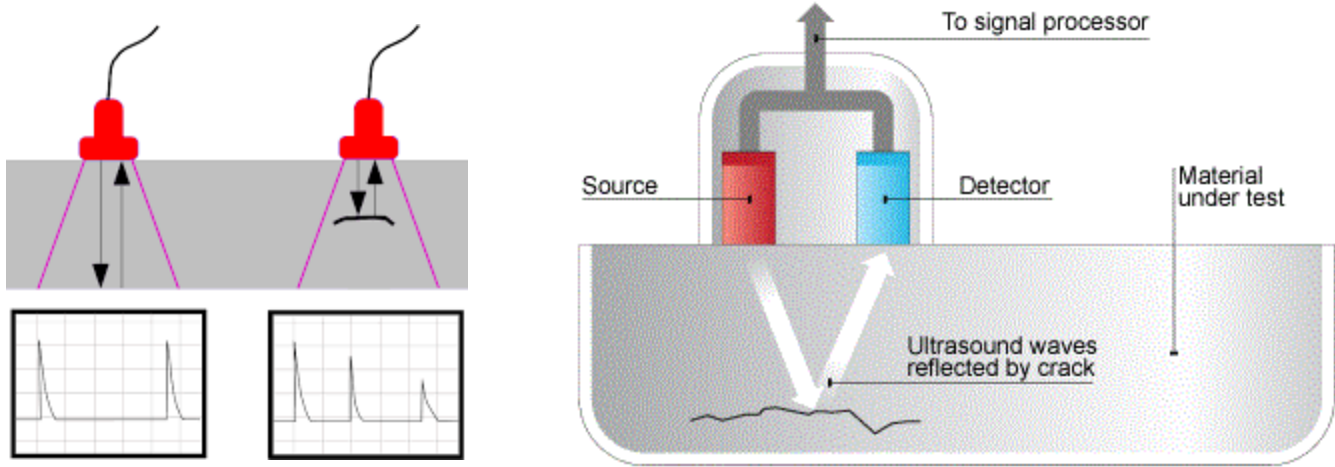
### בדיקה אוטראסונית – ( UT ) Ultrasonic Testing

השימוש בוויברציות אולטראסוניות באורך גל קצר ( 1-10 mm ) ובתדירות גבוהה ( 0.1-20mhz ) מאפשר לגלות פגמים פנימיים חבויים מתחת לפני השטח ולקבוע אינדוקטיבית את גודל הפגם. גלי קול בתדירות מאד גדולה משודרים ע"י מתמר ( transducer ) דרך החלק ונקלטים חזרה במתמר ששידר או באחר. נתיב הקול מופרע על ידי פגם בחלק וציון על כך נשלח למפעיל. היות ובדיקה אולטראסונית היא מאד רגישה ומספקת אינפורמציה מדויקת, נדרש ציוד יקר וידע טכנולוגי נרחב. חלקים טיפוסיים לבדיקה



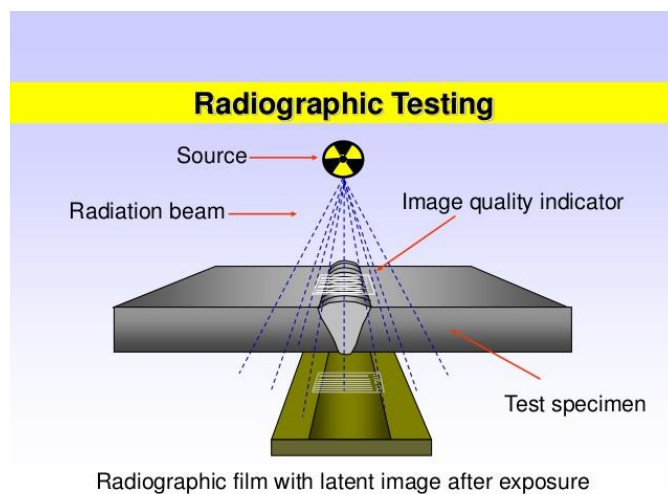
## בדיקות ללא הרס- NDT בתעופה

אולטרסונית יכולים להיות להבי טורבינה, ריתוכים או אפילו חו"ג שמשמש לייצור חלקים קריטיים ( כמובן שגם חו"מ ).



### בדיקה רדיוגרפית – Radiographic Testing ( RT )

בדיקה זו משמשת לגילוי פגמים חבויים מתחת לפני השטח באמצעות X-ray או gamma המפיקים צלמית על נגטיב ( פילים ). התהליך מתרחש כאשר ממקמים את הנגטיב תחת החלק והקרינה נפלטת ממקור קרינה מעל החלק וחודרת את החומר ורושמת על הנגטיב המונח מתחתיו. הקרינה שנספגת על הנגטיב חושפת את הכימיקלים שלו כתלות בעובי האזורים של החלק ( פיתוח ). קרינה יתרה נספגת באזורים הדקים של החלק ופחות קרינה נספגת באזורים המעובים. חשיפה זו של הנגטיב וכמויות שונות בזמן פיתוח הפילים מייצרת את התמונה המכונה רדיו גרף. שימוש טיפוסי באיירוספייס לרדיוגרפיה הוא בדיקת פגמי ריתוך בחלקים קריטיים וביציקות.





# בדיקות ללא הרס- NDT בתעופה

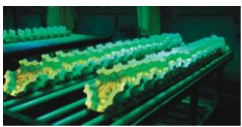
## רדיוגרפיה דיגיטלית – Digital Radiographic ( RT )

שתי השיטות הרדיוגרפיות הנתמכות ע"י NAD CAP הן ( digital detector arrays-DDA ) ו ( CR ) ( computed radiography ). שתי השיטות מאופיינות ומזהות ברישום תמונה.

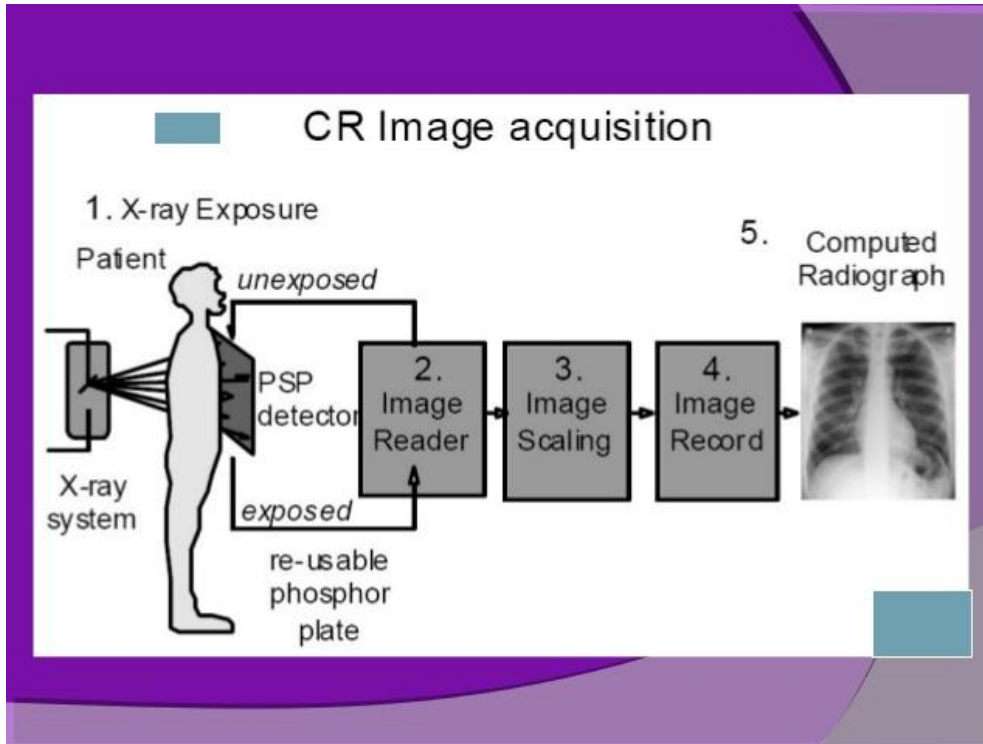


DDA

ה DDA הוא תהליך ממכושר דיגיטלית המאפשר ללכוד תמונה רדיוגרפית. ה CR מאד דומה ביכולתו אלא שהוא פלטה זרחתית שדומה יותר לנגטיב. בשתי השיטות מתאפשר שיפור התמונה ושמירה על כמות גדולה של אינפורמציה. היתרונות של השיטות הדיגיטליות ברורות בעיקר בקצב העבודה ופשטות הפענוח מבלי להזכיר את עלויות המיחזור של הכימיקלים הקשורים לפיתוח נגטיבים בשיטת ה RT המשתמשת בנגטיבים.

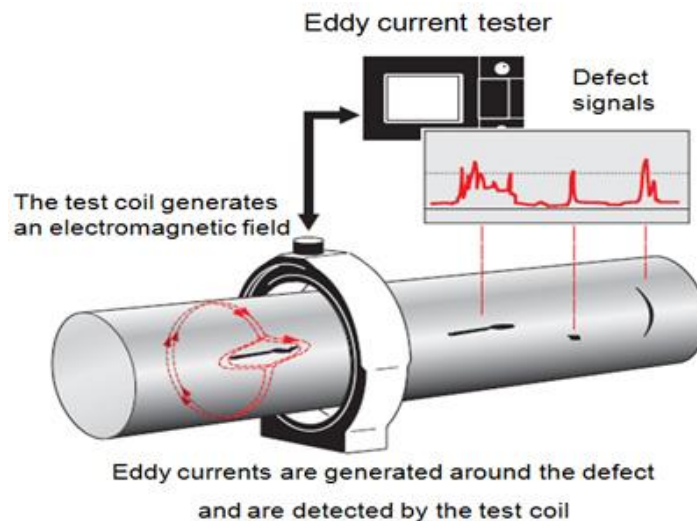


## בדיקות ללא הרס- NDT בתעופה



### בדיקת זרמי שטף – Eddy Current Testing (ET)

זוהי שיטה לבדיקת פני שטח /תת פני שטח לחלקים. משתמשים ברגש ( PROBE ) טעון ואנרגטי לייצור שדה מגנטי לסירוגין. שדות מגנטיים אלו יניעו מחזור חשמלי בכל חומר שמוליך חשמל. סדק חשוף בקרבת המשטח יפריע לשטף של השדה החשמלי ונקבל אינדיקציה של ההפרעה. האינדיקציה ניתנת להערכה ורישום מידע מירבי על הפגם שנתגלה בחלק. חלקים טיפוסיים שנבדקים כך הם חלקי אלומיניום שעברו עיבוד שבבי, כמו חורי ברגים, אזורי משטח סביב קשיחים, מיסבים ועוד.





## בדיקות ללא הרס- NDT בתעופה

שיטות ה NDT לא השתנו משמעותית לאורך זמן, הן כן הפכו ליותר מתוחכמות. התעשייה חייבת להמשיך ולזהות שיטות רובוסטיות נוספות על מנת לשמור על האמינות של NDT. לאחרונה נכנסות שיטות בדיקה מרובות מצלמות בטכניקה של מציאות מדומה ( נדרש רק להרכיב משקפיים ). משנת 1990 תעשיית האיירוספייס אימצה את ה NADCAP על מנת לשמור ולשפר את ההישגים של מערכי NDT. היות וה- NADCAP הוא אבולוציוני ומתאים את דרישותיו לטכנולוגיה המתפתחת גם מערכי ה NDT בחברות השונות שומרים על רמת אמינות ותחכום גבוהה.

סרטון הדגמה של GE <https://youtu.be/geFuwiRHoEo>

