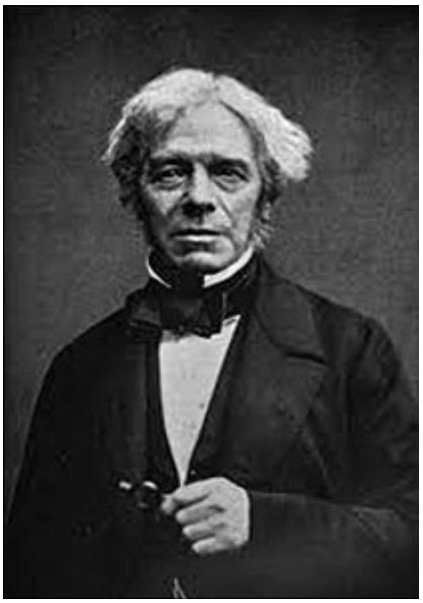
בדיקות אל-הרס – זרמי מערבולת (1151) – Non Destructive Testing - Eddy Current

אפריל 2020

תוכן עניינים

מבוא 2
עקרונות הבדיקה באמצעות זרמי מערבולת 2
הגדרה 3
רכיבים עיקריים של מערכת לבדיקות אל-הרס – זרמי מערבולת 3
מחולל זרם חילופין 3
סליל בדיקה 4
מכשיר תצוגה 5
ביצוע בדיקות על-הרס – זרמי מערבולת 5
בדיקות אל-הרס על הגובה ובמקומות מוקפים 7
אפקטים ביולוגיים של שדה מגנטי 7
שדה מגנטי כגורם מסרטן 8
רגולציה של חשיפה לשדות מגנטיים 8
סיכונים בטיחותיים 9
מגע עם עצמים חמים <<האם זה רלוונטי לסוג הבדיקות??>> 9
פגיעה בעובד כתוצאה מנפילתו מגובה 9
פגיעה בעובדים בעת ביצוע בדיקות בתוך מקומות מוקפים 9
סיכוני פגיעה מחשמל 10
מניעת מפגעים (נוהג טוב) 10
ביבליוגרפיה 11

עקרונות בדיקת אל-הרס באמצעות זרמי מערבולת


מייקל פאראדיי (1791-1867)

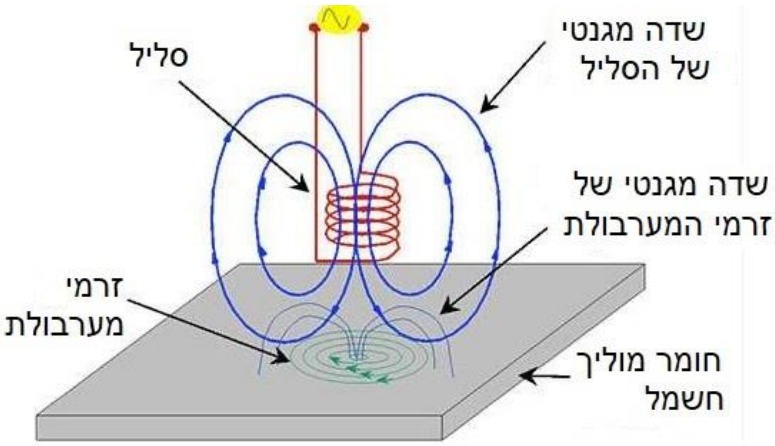
בדיקות אל-הרס באמצעות זרמי מערבולת מתבססות על גילויה של האינדוקציה האלקטרומגנטית על ידי מייקל פאראדיי (Michael Faraday) בשנת 1831, שהיה כימאי באנגליה אשר גילה תופעות פיזיקליות רבות.

האינדוקציה האלקטרומגנטית, מתבטאת בכך ששדה מגנטי המשתנה בזמן, גורם להופעת זרם חשמלי בתוך חומר מוליך חשמל הנמצא בשדה.

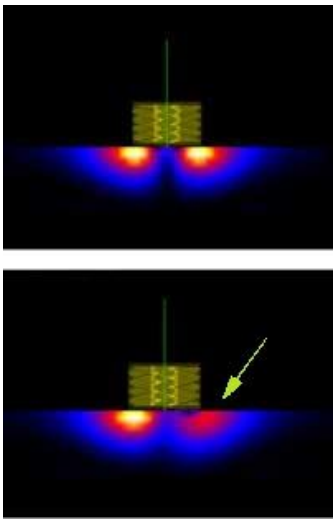
בשנת 1855, מדען צרפתי לאון פוקו (Léon Foucault) גילה כי חומר מוליך חשמל שטוח הנמצא בשדה מגנטי משתנה, מופיעים זרמים חשמליים מחזוריים - זרמי מערבולת (eddy currents).
מהצד השני, זרם חשמלי גורם להופעת שדה מגנטי מסביבו.
כפי שמוצג באיור הבא (מצד ימין), זרמי מערבולת אלה גורמים להופעת שדה מגנטי משלהם והשדה של זרמי מערבולת גורם להופעת זרם חשמלי נוסף בתוך הסליל החשמלי.

בשנת 1879, מדען בשם חיוז (Hughes) גילה שינויים בתכונותיו של סליל חשמלי כשהוא במגע עם מתכות בעלות מוליכות וחדירות שונות בהן הוא משרה את זרמי המערבולת. תופעה זאת מאפשרת שימוש בזרמי מערבולת לצורך הפרדה בין חומרים עם מוליכות שונה.

הפגם שקיים בחומר מוליך בו מופעים את זרמי המערבולת, משנה או מפסיק את מעבר הזרם דרכו ועוצמת הזרמים בחומר נחלשת. כאשר נחלשת העוצמה של זרמי המערבולת, נחלשת גם עוצמתו של השדה המגנטי שהם מייצרים ובהתאם משתנה עוצמת הזרם החשמלי שנגרם על ידי השדה הזה בסליל.
בשפה מקצועית, הפגם מעלה את העכבה החשמלית (impedance) של המעגל החשמלי שכולל את הזרמים ואת הסליל. רישום המאפיינים של הזרם החשמלי בסליל (רישום ערכים של העכבה), שמושפע משדה מגנטי של זרמי מערבולת, מאפשר לגלות את הפגם בחומר הנבדק.



מקור התמונה: EDN. The difference between inductive proximity, displacement, and eddy-current sensors (Image courtesy of Microwave Soft.). By Patrick Mannion, Marth 2016 [Updated]. https://www.edn.com/



מקור התמונה: NTD Resource Center. Surface Breaking Cracks. https://www.nde-ed.org/

בתמונה מצד שמאל ניתן לראות את הסליל שמשרה את זרמי המערבולת (צבע כחול) בחומר מוליך חשמל. בתמונה התחתונה בצדו הימיני של הסליל הזרמים נחלשים עקב הפגם שקיים בחומר המוליך.

למרות שהתופעה נחקרה היטב, עד לפני מלחמת העולם השנייה הבדיקות באמצעות זרמי מערבולת לא נוצלו לשימוש מעשי. רק בשנות ה-50 וה-60 של המאה הקודמת התפתחו השיטות של בדיקות אל-הרס תוך שימוש בזרמי מערבולת, בעיקר בענפי תעופה והגרעין [1].

מקור התמונה: Pi Plant Integrity Ltd. Eddy current testing.
https://www.plantintegrity.com/

היום בדיקת אל-הרס באמצעות זרמי מערבולת היא טכניקת בדיקה נפוצה ומוכרת היטב. בבדיקות אלה משתמשים לגילוי סדקים על פני השטח של המוצרים, לבדיקת קורוזיה, סחף וסדקים בצינורות, לבדיקת מוליכות חשמלית של מתכות שונות (אשר יכולה להשתנות עקב שינוי בהרכב הכימי או לאחר פגיעת מתכת מחום), בבדיקות עובי של חומרים דקים (כמו ציפויים או מעטה חיצוני של מטוסים) ועוד.

הגדרה

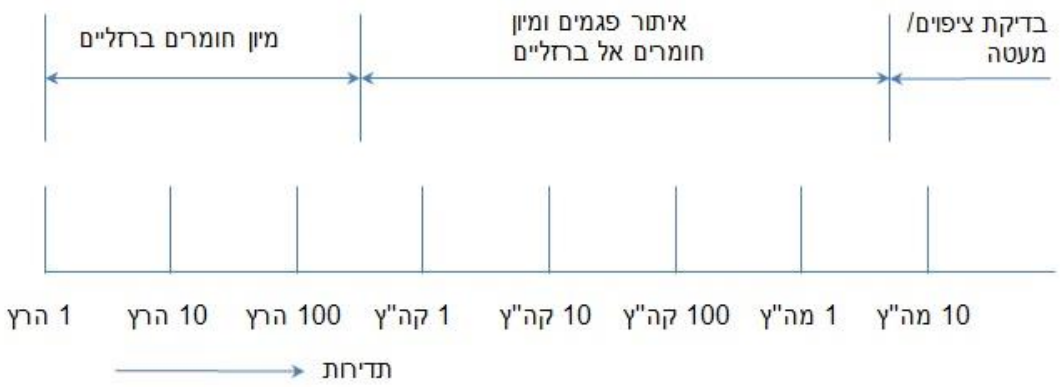
בדיקות אל-הרס – זרמי מערבולת, הינן בדיקות של חומרים מוליכי חשמל המבוססות על תופעת האינדוקציה האלקטרומגנטית ומתבצעות באמצעות השראת זרמי מערבולת (eddy currents) במוצר הנבדק ורישום שינויים שהזרמים עוברים בתוך המוצר.

רכיבים עיקריים של מערכת לבדיקות אל-הרס – זרמי מערבולת

מחולל זרם חילופין

מחולל זרם חילופין הינו בסיסו של מכשיר הבדיקה, הוא גורם להשראה של שדה מגנטי והשראת זרמי מערבולת בחומר הנבדק.

התדירות של הזרם החילופין הינה אחד הפרמטרים החשובים בבדיקה מכיוון שהיא שמשפיעה על עומק החדירה של זרמי המערבולת לתוך החומר. למעשה, עומק החדירה והתדירות מוגדרים על ידי יישום של הבדיקה. בטבלה הבאה מוצגת התפלגות התדירויות של הזרם והשדה המגנטי ביישומים שונים של הבדיקה [2].



התדיריות האופייניות בבדיקות אל-הרס באמצעות זרמי מערבולת הן בטווח של תדירויות נמוכות – מ-100 הרץ עד 10 מה"ץ. קיימות גם שיטות בהן משתמשים בתדירויות של 25 מה"ץ [3].

סליל בדיקה

סליל הבדיקה הינו גשש (probe) שדרכו עובר זרם חשמלי אשר גם משרה את השדה המגנטי וגם מושרה מהשדה של זרמי המערבולת. הגשש מחובר למחולל זרם חילופין וגם למכשיר התצוגה בו הוא מעביר נתונים עם ערכי הבדיקה.

להלן תמונות להמחשת הגששים לבדיקות באמצעות זרמי מערבולת.

גששים לבדיקות באמצעות זרמי מערבולת של חברת אולימפוס. מקור התמונה: Olympus. Eddy Current Probes and Application Guide. https://www.olympus-ims.com/

גששים לבדיקת צינורות של חברת זטק.

גשש לבדיקות שטח של חברת זטק.

מקור התמונות: Zetec. Innovate eddy current probe solutions. https://www.zetec.com/

מכשיר תצוגה

מכשיר תצוגה של המערכת לבדיקות באמצעות זרמי מערבולת הוא בעצם מכשיר שמעבד את הסיגנל החשמלי ומציג אותו בצורות שונות על מסך או באמצעות הדפסה של פלט. המכשירים יכולים להיות נייחים או ניידים.

המכשירים המודרניים הם גם עם יכולת לניתוח תוצאות הבדיקה.

להלן דוגמאות למכשירי תצוגה של בדיקות באמצעות זרמי מערבולת.

מקור התמונה: ELINS. Eddy current testing. ETi200. http://elins.lt/

מקור התמונה: Deep Blue Offshore International. Olympus NORTEC 600 Eddy Current Testing Unit. http://deepblueoffshore.com/

מקור התמונה: WayGate Technologies. Eddy Current. Portable. https://www.bakerhughesds.com/

מקור התמונה: OKOndtGroup. Eddycon C Portable Eddy Current Flaw Detector. https://www.okondt.com/

ביצוע בדיקות על-הרס – זרמי מערבולת

בדיקות באמצעות בדיקות אל-הרס – זרמי מערבולת מבצעים בשיטות שונות. ניתן לבדוק צינורות גדולים וקטנים גם מבחוץ וגם מבפנים, וגם מוצרים שטוחים כמו מתכות של מעטה מטוסים ועוד.

להלן תמונות להמחשת סוגים שונים של בדיקות אל-הרס – זרמי מערבולת.

מקור התמונה: Miastras. Eddy current (EC) inspection services.
https://www.mistrasgroup.com/

מקור התמונה: Alibaba. Large-diameter seamless steel tube eddy current + ultrasonic offline testing system.
https://www.alibaba.com/

מקור התמונה: Zetec. How Effectively Can Eddy Current Testing Detect Cracks?
https://www.zetec.com/

מקור התמונה: GGS. Pulsed Eddy Current.
http://inspectpipe.com/

בדיקת מעטה מטוס. מקור התמונה:
OKOndtGroup. Eddy current testing of aircraft. https://www.okondt.com/

בדיקות אל-הרס על הגובה ובמקומות מוקפים

את הבדיקות מבצעים הן במצבים רגילים והן במצבים קיצוניים, כמו בדיקות בגובה או במקומות מוקפים. עבודות אלה מהוות סיכון מיוחד ודורשות נקיטת אמצעי בטיחות נוספים בהתאם לסוג העבודה.
להלן תמונות להמחשת סוגים שונים של בדיקות אל-הרס במצבים קיצוניים.

ביצוע בדיקה על הגובה. מקור התמונה: MIRA Rope Access. Non-Destructive Testing. https://www.mira-ra.com/

ביצוע בדיקה במקום מוקף. מקור התמונה: UTComp. Toward Zero Confined Space Entry. September 18, 2018. https://utcomp.com/

בשנים אחרונות מתפתחות שיטות לבדיקות אל-הרס במצבים קיצוניים באמצעות רחפנים (דרונים). להלן תמונה להמחשת שיטות כאלה.

בדיקת עובי של דופן המיכל באמצעות דרון. מקור התמונה: Technology Catalog. RoNik UT drone - wall thickness measurements. https://www.technologycatalogue.com/

אפקטים ביולוגיים של שדה מגנטי

שדות חשמליים ומגנטיים קיימים בכל מקום בו נוצר חשמל, מועבר או מופץ בקווי חשמל או בכבלים, או נמצא בשימוש במכשירי חשמל. מכיוון שהשימוש בחשמל הוא חלק בלתי נפרד מאורח החיים המודרני שלנו, שדות אלה נמצאים בכל מקום בסביבתנו [4].

השפעת השדות על גוף האדם יכול להיות באמצעות שני מנגנונים עיקריים:

א. שדות בעלי תדירות עד 10 מה"ץ, משרים לרקמות גוף האדם זרמי מערבולת שעלולים להשפיע על התכונות החשמליות של תאים חיים ולשנות את תפקודם;

ב. זרמי מערבולת שמושרים על ידי שדות עם תדירויות מעל 100 קה"ץ יש אנרגיה גבוה מספיק כדי להעלות את הטמפרטורה המקומית או של הגוף כולו.

סיכונים אלה תלויים קודם כל בעוצמת השדות שיכולה להיות שונה. על פי פרסום של מינהל הבריאות והבטיחות של ממשל הבריטי (HSE), בין המקצועות שבהם העובדים עלולים להיחשף לשדות חשמליים ומגנטיים ברמות יחסית גבוהות נמצאים העובדים במקצועות "מערכות חשמל" – תחנות חשמל, שירות לקווי חשמל עם מטח גבוה וכו'. כמו כן, למקצועות כאלה שייכים רתכים, עובדים בתהליכי חימום והלחמה באמצעות אינדוקציה, עובדים בבדיקות אל-הרס באמצעות חלקיקים מגנטיים, עובדים עם ציוד רפואי MRI ואחרים [5].

עובדים בבדיקות אל-הרס באמצעות זרמי מערבולת אינם נזכרים כעובדים עם סיכון לחשיפה לשדות מגנטיים בעוצמות גבוהות.

נכון להיום בספרות מקצועית לא מצאנו נתונים לגבי רמות החשיפה לשדות מגנטיים של עובדים בבדיקות על ידי זרמי מערבולת.

יש לציין כי אצל עובדים בבדיקות אל-הרס באמצעות זרמי מערבולת, בנוסף לחשיפה לשדה מגנטי שמיוצר על ידי המכשיר, קיימת אפשרות לחשיפה לזרם מגע (contact current) זאת מגע ישיר עם החומר הנבדק – מוצרים מתכתיים בהם קיימים זרמי מערבולת.

שדה מגנטי כגורם מסרטן

בשנת 1979 התפרסם מאמר של ורטהיימר (Wertheimer) וליפר (Leeper), אשר לראשונה הצביע על קשר אפשרי בין לוקמיה אצל ילדים לבין חשיפה במקום מגוריהם לשדה מגנטי בתדירות של 50 הרץ, שנובע מקווי חשמל. חוקרים אחרים מצאו כי ההוכחות שהוצגו במחקר זה לא היו מספיק מבוססות, אך בהמשך בוצעו מחקרים רבים בנושא והתוצאות שהתקבלו היו מאוד קונטרוברסליות.

בשנת 2002 התפרסמה מונוגרפיה של הסוכנות הבינלאומית לחקר סרטן (IARC) בה הוצגו תוצאות של ניתוח מקיף של המחקרים שפורסמו עד אז בנושא. הסוכנות קובעה כי כן קיימות עדויות, אומנם מוגבלות, לסכנת פגיעה במחלת סרטן של שדות מגנטיים בעלי תדירות נמוכה מאוד (עד 100 קה"ץ, Extremely Low Frequency) ביחס ללוקמיה אצל ילדים. עם זאת, לא התקבלו הוכחות לסכנת פגיעה במחלת סרטן של שדות מגנטיים בעלי תדירות נמוכה מאוד בניסוים על חיות ואין עדויות על סכנת פגיעה במחלת סרטן של השדות האלה ביחס לסוגי סרטן אחרים.

את כל הגורמים, שלגביהם בוצע ניתוח מחקרים, הסוכנות מסווגת, בהתאם לסכנה שלהם, לארבע קבוצות:

קבוצה 1 – מסרטנים וודאיים (Carcinogenic to humans)

קבוצה2A - גורמים שקרוב לוודאי מסרטנים (Probably carcinogenic to humans)

קבוצה 2B – מסרטנים אפשריים (Possibly carcinogenic to humans)

קבוצה 3 – גורמים שאינם מסווגים כמסרטנים (Not classifiable as to its carcinogenicity)

בהקשר לשדות מגנטיים בעלי תדירות נמוכה מאוד, הסוכנות משייכת אותם לקבוצה 2B – מסרטנים אפשריים.

רגולציה של חשיפה לשדות מגנטיים

בהתאם לתקנות הבטיחות בעבודה (ניטור סביבתי וניטור ביולוגי של עובדים בגורמים מזיקים), תשע"א-2011, הרגולציה של חשיפה תעסוקתית לשדות מגנטיים בארץ מבוססת על המלצות ההתאגדות האמריקאית של הגיהותנים התעשייתיים הממשלתיים (ACGIH).

הערכים המרביים הגבוליים נקבעו בהתאם לתדירות השדה:

בטווח עד 300 הרץ – 60/f מיליטסלה (millitesla, mT) כאשר f - תדירות בהרץ;

בטווח של 300 הרץ עד 30 קה"ץ - 0.2 מיליטסלה;

בטווח של 30 קה"ץ עד 100 קה"ץ – 163 אמפר/מטר;

בטווח של 100 קה"ץ עד 30 מה"ץ – 1.6/f אמפר/מטר, כאשר f - תדירות במה"ץ.

בהקשר לחשיפה לזרם מגע נקבעו הערכים המרביים הגבוליים הבאים:

בטווח עד 2.5 קה"ץ – 1 מיליאמפר;

בטווח של 2.5 קה"ץ עד 30 קה"ץ – 0.4/f מיליאמפר כאשר f - התדירות בקה"ץ;

בטווח של 0.03 מה"ץ עד 0.01 קה"ץ הזרם לא יעלה על 1000 f מיליאמפר כאשר f – תדירות במה"ץ;

בטווח של 0.1 מה"ץ עד 100 מה"ץ הזרם לא יעלה על 100 מיליאמפר [6].

סיכונים בטיחותיים

מגע עם עצמים חמים

זיהוי:

העובד עלול להיפגע מכוויות כתוצאה ממגע עם מיכלים או צינורות חמים עליהם מבצעים את הבדיקה.

בקרה:

א. חובה להשתמש בביגוד בעל שרוולים ארוכים, מכנסיים ארוכים, כפפות, משקפיים וקובע מגן;
ב. הימנעות ממגע עם חלקים חמים ולפי הצורך שימוש בכפפות נגד חום לצורך מגע עם החלק הנבדק.

פגיעה בעובד כתוצאה מנפילתו מגובה

זיהוי:
עבודה בגובה הינה כל עבודה, לרבות גישה למקום העבודה, שבשלה עלול עובד ליפול לעומק העולה על 2 מטרים [7].

עבודות בגובה מוסדרות בחקיקה הרלוונטית בנושא. את העבודות יש לבצע בהתאם לדרישות תקנות הבטיחות בעבודה (עבודה בגובה), תשס"ז-2007.

פגיעה בעובדים בעת ביצוע בדיקות בתוך מקומות מוקפים

זיהוי:
פגיעה בעובדים בעת עבודה בתוך מקומות מוקפים עקב הרעלה מאדי חומרים שמשתחררים במקום או חנק בשל חוסר חמצן באוויר.

בקרה:
בעת כניסת אדם למקום מוקף:

א. העובד חייב להשתמש במכשיר נשימה מתאים;
ב. חובה לנקוט בכל האמצעים המעשיים לסילוק אדים העלולים להיות שם ולמנוע חדירת אדים למקום המוקף;
ג. כל עוד לא הראה מבחן נאות שאין במקום אדים מסוכנים יהיה האדם הנכנס חגור חגורה שאליה מחובר לבטח חבל שקצהו החופשי מוחזק בידי אדם בחוץ;

ד. במקומות עבודה בהם עלולים להיווצר אדים רעילים במהלך ביצוע עבודות (כגון בור ביוב) יש להקפיד על שימוש בציוד נשימה עם הספקת אוטונומית של אוויר.

סיכוני פגיעה מחשמל

זיהוי:

העובד עלול להיפגע כתוצאה מהתחשמלות/מכת חשמל הנובעת משימוש בציוד חשמלי לא תקין בשעת ביצוע בדיקות עם ציוד חשמלי.

מכת חשמל (שוק) הנה תוצאה של מעבר זרם דרך הגוף בעוצמה הגורמת לתופעות פיסיולוגיות שליליות. חומרת המכה תלויה בכמות הזרם, משך ההופעה ומסלולו.

בקרה:

א. לצורך מניעת פגיעה עקב התחשמלות יש להשתמש בציוד חשמלי תיקני, תקין ובדוק בהתאם לחוק החשמל, תשי"ד – 1954 ובשיטות עבודה בטוחות בהתאם לתקנות הבטיחות בעבודה (חשמל), התש"ן – 1990;

ב. מכשור חשמלי ייבדק תקופתית על ידי חשמלאי מוסמך. הבדיקות תתועדנה ותשמרנה.

מניעת מפגעים (נוהג טוב)

ניהול היבטי הבטיחות בעבודות בדיקת אל-הרס באמצעות זרמי מערבולת תוך הקפדה על התנאים הבאים:

1. כללי

קיום הדרכה לפחות אחת לשנה בדבר מניעת סיכונים והגנה מפניהם באמצעות בעל מקצוע מתאים אשר יוודא שכל עובד הבין את הסיכונים והוא בקיא דיו בנושאי ההדרכה, בהתאם לתפקידו ולסיכונים שלהם הוא חשוף.

ניהול פנקס הדרכה לרבות תיעוד מועד ההדרכה, המדריך והחומר הנלמד. עם כניסתו של עובד חדש או שינוי עמדת העבודה של עובד יש לדאוג לביצוע הדרכה בנוגע לסיכונים בעבודה, שימוש אמצעים להפחתת הסיכונים לרבות אמצעי מיגון אישי, התנהגות בעת אירוע חריג לרבות תאונה וכמעט תאונה [8].

שילוט הסיכונים בטיחותיים באזור העבודה. שילוט בדבר הצורך בשימוש בציוד מגן אישי.

הגדרת שיטה (נוהל בכתב) להעברת מידע לגבי מפגעי בטיחות בתהליך העבודה, באמצעות מחזיק במקום העבודה. העברת מידע מהעובדים להנהלת האתר, באמצעות דיווח על מפגעי בטיחות, כמעט תאונות או תאונת עבודה.

2. נפילה מגובה

לבצע עבודות בגובה (מעל 2 מטר ממשטח העבודה) רק כאשר קיים גידור או מעקה תקני או כאשר העובד מאובטח במשך כל זמן העבודה באמצעות מערכת למניעת או בלימת נפילה מגובה.

3. עבודה במקומות מוקפים

א. העובד חייב להיות מצויד במכשיר נשימה מתאים;

ב. חובה לנקוט בכל האמצעים המעשיים לסילוק אדים העלולים להיות שם ולמנוע חדירת אדים למקום המוקף;

ג. כל עוד לא הראה מבחן נאות שאין במקום אדים מסוכנים יהיה האדם הנכנס חגור חגורה שאליה מחובר לבטח חבל שקצהו החופשי מוחזק בידי אדם בחוץ;

ד. במקומות עבודה בהם עלולים להיווצר אדים רעילים במהלך ביצוע עבודות (כגון בור ביוב) יש להקפיד על שימוש בציוד נשימה עם אספקת אוטונומית של אוויר.

4. פגיעה מכנית

ה. שימוש בביגוד בעל שרוולים ארוכים, מכנסיים ארוכים;

ו. הרכבת משקפי מגן;

ז. הגנת ראש על ידי קובע מגן תיקני;

ח. הגנת כפות הרגליים על ידי נעלי בטיחות תקניות.

5. סיכוני פגיעה מחשמל

א. ביצוע עבודות חשמל רק על ידי חשמלאי מוסמך;

ב. שימוש בציוד חשמלי תקני, תקין ובדוק;

ג. בדיקה תקופתית של הציוד החשמלי.

ביבליוגרפיה

1. NDT Resource Center. Surface Breaking Cracks. https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Applications/breakingcracks.htm

2. Prasad J., Nair C. G. K.: Non-Destructive Test and Evaluation of Materials. Tata McGraw-Hill Education, 2009.

3 . García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E.: Non-Destructive Sensors (Basel). 2011; 11(3): 2525–2565. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3231639/

4. WHO. Environmental Health Criteria 238. Extremely Low Frequency Fields . World Health Organization 2007. https://www.who.int/peh-emf/publications/Complet_DEC_2007.pdf

5. HSE. Electromagnetic fields at work A guide to the Control of Electromagnetic Fields at Work Regulations 2016. Health and Safety Executive, HSG281, 2016. https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/hsg281.pdf

6. ACGIH. 2019 TLVs® and BEIs®. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2019.

7. תקנות הבטיחות בעבודה (עבודה בגובה), התשס"ז-2007 .

8. תקנות ארגון הפיקוח על העבודה (מסירת מידע והדרכת עובדים), תשנ"ט-1999.