

בטיחות פריקה אלקטרוסטטית בתעשייה הביטחונית

סיכוני פא"ס בתעשייה הביטחונית

רקע היסטורי

תאונות בתעשיית אבק השריפה וחומרי הנפץ מתועדות כבר מהמאה ה-17. כבר אז הן גבו מחיר כבד בנפש וגרמו להרס המפעלים וסביבתם הקרובה. בשנת 1980 יצא לאור ספר בשם: "ההיסטוריה של תאונות בתעשיית חומרי הנפץ" (History of Accidents in the Explosive Industry" G.S. Biasutti, 1980). הספר מפרט מימצאים של ועדות חקירה לתאונות חמורות שאירעו ב-300 השנים שעברו, מהמאה ה-18 ועד ליום כתיבת הספר. מתוך פרוטוקולים של ועדות חקירה אשר תיעדו את התאונות, המימצאים והלקחים, ניתן להתרשם שכבר לפני 300 שנה היתה מודעות לסכנת הפריקה האלקטרוסטטית: כ-10% מהפרוטוקולים של תאונות במאות ה-18 וה-19 מצביעים על האיום האלקטרוסטטי כגורם כמעט ודאי להתפתחות אש ופיצוצים, אשר החריבו מפעלים וגרמו לנפגעים בנפש. היו תאונות שהחריבו גם חלק מהסביבה האורבנית ומחו כפרים ועיירות מעל האדמה. ההיבט הפיזיקלי של האיום האלקטרוסטטי (היווצרות, צבירה ופריקה של מיטענים סטטיים), לא הובן עד לתחילת המאה ה-20. לכן, כמעט שלא נעשה דבר להקטנת האיום ולא פותחו שיטות העשויות לסייע לניטרול מיטענים סטטיים ולמניעת הצתה עקב פריקת הבזק דרך תווך דליק או נפיץ. הבנת האיום הא"ס צמחה בתחילת המאה ה-20, בעקבות חקירת תאונות בתעשיית גרעיני המספוא (ראו פרק 3). בהמשך, תעשיות המייצרות חומרים מסוכנים, כולל תעשיות הכימיה, הדלק, החומרים ההודפים, החנ"ס והפירוטכניקה חקרו ושיכללו שיטות פיקוח על מיטענים א"ס.

בארץ - יצא לאור (באפריל 1980) תקן ישראלי 1069 - "מיטעני חשמל סטטי: אמצעי פיקוח ובקרה". תקן זה מבוסס על התקן האמריקאי NFPA-77. התקן מקיף את כל מיגזרי התעשייה של חומרים מסוכנים, כולל חנ"ס, ומביא - בפרק א' - את התיאוריה של התהוות מיטענים סטטיים ופריקתם.

בסוף שנות ה-70 נוסדה ברפא"ל ועדה לבטיחות פריקה אלקטרוסטטית. הוועדה שהורכבה ממהנדסים וחוקרים בתחומי מומחיות שונים, שמה לה כמטרה לספק הנחיות, לפתור בעיות "אד-הוק" ולמסד הוראות בטיחות בנושא פריקה אלקטרוסטטית. תשומת הלב של הוועדה התמקדה במניעת סכנה של פא"ס במיתקנים ובתהליכים שבהם נוצרת/שוררת אווירה דליקה או נפיצה, ובמניעת פא"ס לתוך חומרים ורכיבים ריאקטיביים, כולל: חומרי נפץ (חנ"ס) חומרי הדף (חנ"ה) ופירוטכניקה. לדוגמה: "הרכבה חמה" של מערכות חימוש וייצור או שימוש ב"זמים" חשמליים. "ועדת בטיחות פא"ס" ברפא"ל הפיקה הוראות בטיחות פא"ס, שהתבססו על אינפורמציה מהמקורות הבאים:

- פרוטוקולים של ישיבות ועדת בטיחות פא"ס;
- מיפרטים ותקנים, דוגמת NFPA 77;
- הוראות בטיחות פנימיות ברפא"ל, כגון הוראות עבודה וניסויים;
- תקני רפא"ל בנושא חומרים ורכיבים;
- דוחות חקירה של אירועים ותאונות.

הגדרת רמת הסיכון מפא"ס

היקף האמצעים הננקטים ונוהלי הבטיחות לבקרת פא"ס במיתקן/בתהליך נגזרים מההסתברות שתופעת פא"ס מאדם, מריהוט, או ממכונות וכלים תגרום להצתה או לפיצוץ חומרים/רכיבים מסוכנים.

ניתן להגדיר 3 רמות סיכון עפ"י ההסתברות שהאנרגיה, המלווה פריקה אלקטרוסטטית, תגרום להצתה או לניפוץ של חומרים מסוכנים:

רמת סיכון I:

סיכון גבוה להתרחשות של הצתה או ניפוץ עקב פא"ס. סיכון זה מתייחס בעיקר לפעילות בתוך אווירה דליקה/נפיצה. רמה זו אופיינית לעבודה במקום סגור עם ממיסים וכימיקלים נדיפים ודליקים.

רמת סיכון II:

סיכון המוגבל לאזור עבודה מצומצם, כגון: לפעילות עם חנ"ס ראשוני (אנרגיית ייזום קטנה מ- 20mJ), עם נפצים חשמליים וחומרים ורכיבים רגישים אשר אינם יוצרים "אווירה דליקה/נפיצה". הסבירות לאירוע דליקה או ניפוץ נמוך יחסית, מכיוון שמיטענים סטטיים חייבים לזרום דרך הרכיב (ולא לידו).

רמת סיכון III:

סיכון מועט הקשור באחסנה, שינוע, טיפול, הרכבה, עיבוד וכו', של חומרים שניוניים (מעל 40mJ) ושלישוניים (מעל 80mJ).

האמצעים הננקטים לבקרת פא"ס באזורים המסווגים "רמת סיכון I" שונים, במידת מה, מהאמצעים הננקטים בעמדות עבודה או בתהליכים המסווגים "רמת סיכון II ו-III. (ההבדלים מפורטים בהמשך).

טבלה 1: אנרגיית ההצתה של מספר חומרי נפץ והדף

הערות	אנרגיית הצתה mJ (מילי-ג'אול)		חומר
	מקום סגור מקום פתוח	חלקית	
פיצוץ	7	7	אזיד עופרת
תוצר לקוי - מושמד בדרך כלל	0.004	0.004	אזיד עופרת גבישי
בעירה על סף פיצוץ	25	25	כספית רועמת
פיצוץ	0.9	0.9	סטיפנט עופרת
	0.003	0.003	סטיפנט עופרת בסיסי
פיצוץ חלש	12	12	DDNP
בעירה	<0.75	<0.75	Potassium Chlorate-Lead
פיצוץ	>11,000	4,680	TNT granular
פיצוץ	62	4,380	TNT 100 mesh
פיצוץ	>11,000	4,680	Tetryl granular
פיצוץ	7	4,380	Tetryl 100 mesh
פיצוץ	>11,000	210	PETN
פיצוץ	62	210	PETN 100 mesh
פיצוץ	>12,500	6,000	Ammonium Picrate
פיצוץ	25	6,000	Ammonium Picrate 100 mesh
פיצוץ	7	1000	Nitrostarch
פיצוץ	>12,5000	900	Nitroglycerine (25°C)
בעירה	62	3,100	Nitrocellulose
פיצוץ חלש	10	10	תערובת א.ס.א. (לנפצים)
בעירה	110	-	אבק שריפה HN 1.4 מ"מ

חומרי מגן לפא"ס

שימושים ותכונות עיקריות של חומרי מגן:

- א. הגנה מפני היווצרות מיטען א"ס בתהליך חיכוך (טריבולקטרי). חומרי מגן אינם נוטים ליצור מיטענים א"ס בחיכוך עם חומר אחר;
- ב. הגנה על חומרים מסוכנים בעת פא"ס. הגנה זו מתבטאת במניעה של פא"ס אנרגטית, אשר עלולה להצית או לפוצץ את החומר המסוכן;
- ג. הגנה מכנית על חומרים/רכיבים מסוכנים כנגד שחיקה, הלם מכני וכיו"ב.

כדי שחומר מגן יצטיין בכל התכונות הנ"ל, עליו להיות בעל קיבול חשמלי אפסי, מוליכות בתחום "פיזור מיטענים" וגמישות מכנית מסוימת.

הארקות וקשירות (גישור חשמלי)

המונח הארקה מתייחס לחיבור גלוי (מוליך) של אדם או מיתקן מוליך אל האדמה כדוגמת הארקה הגנה במיתקן חשמלי המבוצעת באמצעות מגע יסודות המבנה עם הקרקע ("הארקה יסוד"). הגישור מתייחס לחיבור מוליך של חלקי מתכת אל גוף מוארק, או אל גוף מתכתי אחר, ליצירת מערך שווה פוטנציאל.

בכל אזורי הסיכון יש להתקין מערכות הארקה מיוחדות לפא"ס הכוללות נגד חשמלי טורי בערך של $1-0.5\text{ M}\Omega$. שלוחות הארקה א"ס יחוברו ללוחית מתכת (פס השואת פוטנציאל) בלוח החשמל. אם משתמשים בנגד טורי - אין צורך להשתמש באלקטרודה נפרדת להארקה מיטענים א"ס. ניתן להשתמש באלקטרודת הארקה קיימת, או בהארקה היסוד של המבנה. איור 41 מציג מערך עבודה עקרוני עם הארקות אלה.

הערה: מטרת הנגד הטורי היא למנוע לולאת הארקה בעלת עכבה נמוכה, אשר עלולה לאפשר מעבר זרם חשמלי תועה (Fault Current) דרך החנ"ס, ולמנוע היווצרות זרם בלולאות הארקה, בעת פגיעת ברק בקולט הברק של המבנה. הנגד הטורי אינו מאט את קצב הפא"ס.

בעמדות עבודה קיימים לעיתים מגשרי הארקה, שאין להם נגד לחיבור ישיר של "הגוף החם" (גוף המכיל חנ"ס/חנ"ה/פירוטכניקה) להארקה היסוד של המבנה. באזור סיכון I - חיבור מגשר הארקה ישיר אל הגוף החם יבוצע רק אחרי הארקתו על ידי מגשר פא"ס עם הנגד. כאשר פועלים באזורי סיכון II ו-III אין חשיבות לסדר החיבור של מגשרי הארקה.



איור 41: מערך הארקה אלקטרוסטטי, הכולל נגד טורי ומרכזיית הארקה, לחיבור "גופים-חמים"

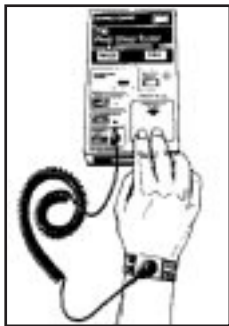
חומרי מגן ואביזרים לפעילות עם חנ"ם והודפים

צמיד (סרט) הארקה אישי

עובדים המטפלים בחומרים מסוכנים ופועלים באזורי סיכון I ו-II, יאריקו את עצמם באמצעות צמיד הארקה אישי (ראו איור 42). ההתנגדות הרצויה של הצמיד לא תרד מ-20,000 אוהם, ולא תעלה על $20M\Omega$. הערך הנמוך של תחום התנגדויות הצמיד דרוש כדי למנוע התחשמלות קטלנית של האדם המוארק במקרה של מגע בקו מתח חי. התנגדות גדולה מ- $20M\Omega$ תגביל את קצב זרם הפריקה לערך נמוך מקצב הטעינה, והצמיד לא יסייע כנדרש להארקת אדם.

אזהרה!

התנגדות ההארקה לחשמל ספטי צריכה תמיד להיות גבוהה מ-20 קילו/אוהם כדי למנוע סכנת התחשמלות ממתח הרשת במקרה של נגיעה בגוף מחושמל



איור 42: צמיד יד
להארקה אישית
מחובר למרכזיית
הארקה א"ס
על הקיר

את הצמיד מחברים לפרק היד החשוף של העובד. יש להקפיד על הידוק הצמיד ומניעת חציצה בינו לבין העור (על ידי שרוול החולצה וכיו"ב). קצהו השני של הצמיד יחובר לנקודת הארקה תקנית בעמדת העבודה, כגון: כיסוי שולחן מוליך/מפזר מיטענים (כאשר הכיסוי מוארק לאדמה), או אל מרכזיית הארקה א"ס על גבי הקיר.

לבוש

עובדים המטפלים בחומרים מסוכנים ופועלים ב-3 אזורי הסיכון יחויבו ללבוש בגדים עליונים מכותנה. הביגוד התחתון לא חייב להיות מכותנה. למי שרוצה לעמוד בדרישות תקן משרד ההגנה האמריקאי (DOD) בו נדרש גם לבוש תחתון מכותנה - ניתן להשתמש באריג המכיל 50% סיבים סינתטיים ו-50% כותנה. הביגוד העליון, צריך להיות מסוג סרבל (אוברול) או מכנסיים ארוכים וחולצה בעלת שרוולים ארוכים. אצבעונים וכפפות יהיו עשויים מחומר הגנה א"ס.

ניתן ללבוש בגד מעכב אש שעבר אימפרגנציה בכביסה

בחומרים כימיים מוליכים. או מחומר הכולל סיבים מוליכים, עדיף להשתמש באפשרות השניה, שכן יעילות פיזור המיטען הא"ס של הבגד איננה אמורה להיות תלויה במחזורי הכביסה.



איור 43: רצועות עקב אנטיסטטים

נעליים

עובדים המטפלים בחומרים מסוכנים בכל 3 רמות הסיכון ינעלו נעליים אנטיסטטיות, או יחגרו רצועות עקב (ראו איור 43). התנגדות הנעליים או רצועות העקב תהיה בתחום $1M\Omega-20k\Omega$. אין סכנה בהגדלת הערך העליון של תחום ההתנגדות ל- $20M\Omega$ אוהם, אולם כדי לעמוד בדרישת ה-DOD האמריקאי, רצוי לאמץ ערך עליון של $1M\Omega$ - אוהם עבור התנגדות בין שתי הרגליים, במתח מדידה של 500V.

יש לבדוק מדי יום את כושר ההארקה העצמי של העובד לאחר נעילת הנעליים או חגירת רצועות העקב. יש לחזור על הבדיקה העצמית כאשר העובד יצא מהמיתקן ושב אליו, מאחר שלכלוך שדבק בסוליות עלול להגביל את ההתנגדות הכוללת של הנעליים. תוצאות המדידה, כולל שם ותאריך הבדיקה, יירשמו ביומן.

עובדים מסוימים מתקשים לעתים, להסתגל לנעלי בטיחות אנטיסטטיות. התלונות הנפוצות הן כאבי גב. פתרון שנוסה בהצלחה במפעלים ביטחוניים הוא הוספת רפידת UVEX או רפידת "צעד קל". התנגדות נעל עם רפידה נמדדה ונמצאה תקינה: נעליים ללא רפידה - $2M\Omega-0.7M\Omega$; עם רפידות UVEX - התנגדות בתחום $70k\Omega-50k\Omega$; רפידות "צעד קל" - $800k\Omega$.

חיפוי מגן לשולחנות עבודה

לצורך עבודה עם חומרים מסוכנים על גבי שולחנות עבודה - יש לצפות את השולחן בחיפוי פלסטי או גומי מפזר מיטענים, כך שזמן הדעיכה של מיטען סטטי בגוף טעון, הבא במגע עם כיסוי המגן, יהיה קצר מ-2 שניות (זמן הדעיכה הוא הזמן הדרוש לפיזור המיטען הסטטי מהגוף הטעון עד שגודל המיטען יורד ל-10% מרמתו המקורית). אישור השימוש בחיפוי מגן כרוך בבדיקת יעילותו במניעת הצתה של חומר פירוטכני רגיש לפא"ס. שיטת הבדיקה היא:

א. מציבים מידגם ריבועי של החיפוי בגודל 5×5 ס"מ על גבי מישטח מתכת מוארק.
ב. מכינים כוסית פלסטיק בקוטר כ-2 ס"מ ובגובה כ-2 ס"מ. ממלאים 75% מנפח הכוסית באבקה פירוטכנית. את הכוסית מדביקים לבסיס מתכת שטוח בקוטר 3×3 ס"מ (ראו איור 44);

ג. מציבים את הכוסית במרכז ריבוע מחומר המגן הנבחן;

ד. פורקים את המיטען באמצעות סימולטור פא"ס, הטוען קבל של $150pF$ ל- $15kV$, דרך נגד של 350 אוהם. מבצעים 10 פריקות בזו אחר זו, לתוך הכוסית, דרך ראש מסמרה (חיבור נגד הפריקה למיכל);

ה. אם במהלך הניסוי החומר הפירוטכני לא "יוזם פיצוץ" - ניתן לקבוע זאת כהוכחה ליעילות חומר המגן במניעת הצתה.



איור 44: מערך בדיקת כשירות של כיסוי מגן א"ס לשולחן עבודה

באזור סיכון III ניתן להשתמש בכיסוי מוליך (מתכתי) עליון - רק באישור הגורם הבטיחותי המוסמך. באזורי סיכון I ו-II אין להביא במגע ישיר חומרי נפץ ראשוניים עם מישטח עבודה מתכתי. מגע במישטח מותר רק כשהוא דרוש לתהליך העבודה, ומובטח שהוא חלק ממערך שווה פוטנציאל.

חיפוי מגן לרצפה

ככלל, באזורי סיכון I ו-II נדרש חיפוי מוליך או מפזר מיטענים. גם באזור סיכון III רצוי להתקין חיפוי אנטי סטטי (מוליך/מפזר) אך זה אינו חיוני. התקנת חיפוי רצפה מפזר מיטענים או אנטיסטטי חיונית באזור סיכון I ובאזורים שבהם מטפלים בחומרי נפץ אבקתיים. כאשר נעשית פעילות בחומרים/רכיבים מסוכנים באזור סיכון II ובאזור סיכון III - התקנת חיפוי רצפה כנ"ל מותנית באישור גורם בטיחותי הבקיא בבטיחות פא"ס. בדרך כלל, ניתן להסתפק באזורים כאלה ברצפה מוליכה (ראו הגדרה לריצוף מוליך) ואין צורך בחיפוי מיוחד שהתקנתו ותחזוקתו יקרים יחסית. התנגדות חיפוי הרצפה להארקה תהיה קטנה מ- $100M\Omega$ וגדולה מ- $100k\Omega$. המדידה תבוצע בין נקודת הארקה ישירה (הארקת היסוד) לבין אלקטרודה המונחת בנקודה כלשהי על חיפוי הרצפה (לפי תקן ישראלי ת"י-1069, או תקן DIN 51953).

ציפוי רצפה בצבע אפוקסי מפזר מיטענים

היישום נעשה באמצעות צבע אפוקסי מפזר מיטענים, מוארק. צבע אפוקסי מפזר מיטענים, יצוק, מודבק ישירות על גבי מישטח בטון בעל הולכה חשמלית טובה להארקת היסוד, ואין כל צורך להוסיף מקשרי הארקה. הארקת צבע אפוקסי מוליך באמצעות רדיד נחושת המקושר למערכת הארקה איננה נחוזה, והיא עלולה להכביד על תחזוקת המיתקנים. בהדבקת מישטח א"ס באמצעות דבקים אקריליים - השימוש מותנה בהארקת המישטח על ידי מקשרים.

ריצוף מוליך

רצפה עם חיפוי מתכת, רצפת בטון חשוף ואריחי בטון ומוזאיקה, מהווים ריצוף מוליך חשמל, כלומר: התנגדות שטח הרצפה קטנה מ- 10^5 אוהם למ"ר. פיזור מיטענים אפשרי באמצעות חיפוי מסוג PVC בעל תכונת אנטיסטטיות, או באמצעות צבע אפוקסי יצוק מפזר מיטענים. כאשר עובדים עם חנ"ם ראשוני, כגון אזיד עופרת, סטיפנט עופרת, חומרים פירוטכניים וכד', יש לחפות את הרצפה בחומר חלק, שאינו "בולע" אבקת חנ"ם ואשר מאפשר פא"ס מבוקרת, כגון: חיפוי במישטח פלסטרי א"ס או שימוש בצבע אפוקסי יצוק מוליך/מפזר מיטענים. סוג הריצוף באזור סיכון III ייבחר לגבי כל מקרה לגופו.

התנגדות חיפוי הרצפה להארקה תיבדק באופן תקופתי, אחת ל-12 חודשים לפחות. הבדיקה תכלול:

- בדיקה חזותית של תקינות ושלמות החיפוי; בדיקת שלמות גישורי ההארקה ובדיקת ניקיון. חיפוי הרצפה חייב להיות שלם - ללא סדקים, ללא קמטים וללא אפשרות תזוזה כאשר מבוצעת עליו פעילות;
- מדידת מוליכות הרצפה והתנגדות ההארקה תבוצע רק לאחר שיפוגו מהחדר חומרי חנ"ם ראשוניים. כאשר קיים חשש לאווירה נפיצה - יש לאוורר את החדר זמן מה לפני הבדיקה.

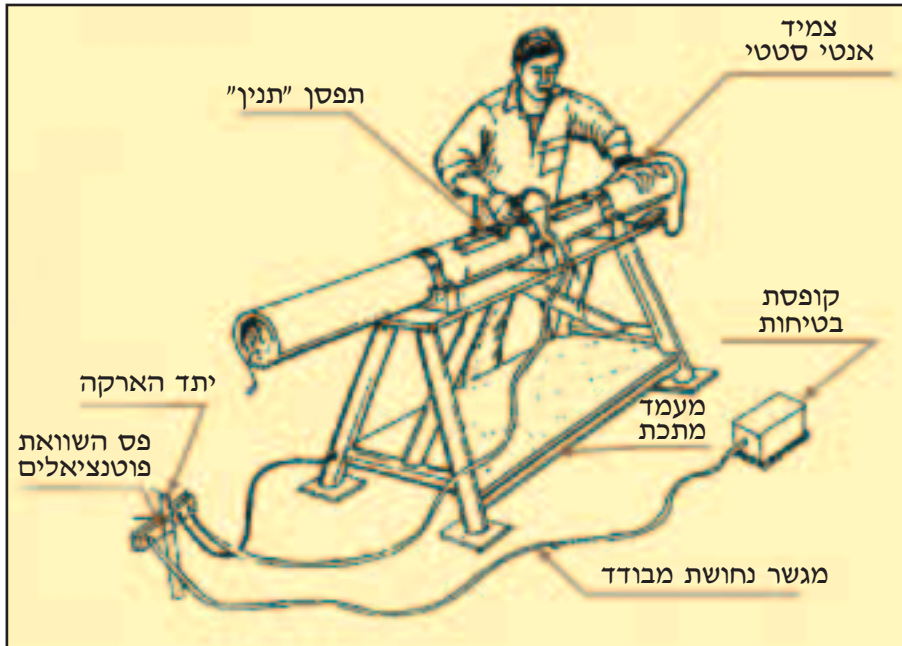
אריזות מגן

אריזות מגן לחומרים מסוכנים כוללות: כריות אוויר (bubble pack), קצף מוקשח, "בוטנים מקלקר" אנטיסטטי, וכן שקיות ומיכלים העשויים מחומרי הגנה. חומרי נפץ ראשוניים (אבקות וגושים), אבקת חנ"ם שניוני ויזמי פיצוץ חשמליים, יאוחסנו בשקיות אנטיסטטיות תקניות לפי MIL-B-8264.

השקיות והמיכלים הבאים מאושרים לשימוש:

- אחסון חנ"ם ראשוני בצורת גושים: MIL-B-81705B, Class II;
- אחסון חנ"ם ראשוני בצורת אבקות: MIL-B-81705B, Class II;
- אחסון חנ"ם שניוני בצורת אבקות: MIL-B-81705B, Class II או MIL-B-82647;
- אחסון יזמים חשמליים: מיכל מתכת (ארגז פעולה), או רדיד אלומיניום, או שקית MIL-B-81705B, Class I.

מגירות, מגשים, קופסאות, בקבוקים ומיכלים
 חנ"ם ראשוני, אבקות חנ"ם (כולל חנ"ם שניוני) ויזמים חשמליים, יאוחסנו בכלי קיבול בתצורות שונות, כנדרש לפי העניין, העשויים מחומרי הגנה מסוג "מפזר מיטענים" או מחומר "מוליד". כאשר בנוסף לפיזור מיטענים נדרש גם סיכוך אלמ"ג (לדוגמה: באחסון יזמים חשמליים) - ייעשה שימוש בחומרי סיכוך, כגון תיבת פעולה, קופסת פח וכד'.



איור 45: מערך עבודה שווה פוטנציאל

הערות:

- א. העובדים ילבשו ביגוד מלא מכותנה, כולל כפפות וגרביים;
- ב. העובדים ינעלו נעליים עם סוליות מפזרות מיטענים או יחגרו רצועות עקב;
- ג. לפני ביצוע כל עבודה הקשורה ביזמים חשמליים או בחנ"ם ראשוני - יש לוודא שהמערך כולו הוא שווה פוטנציאל ומארק.

מכשירים וריהוט להגנה בפני פא"ס

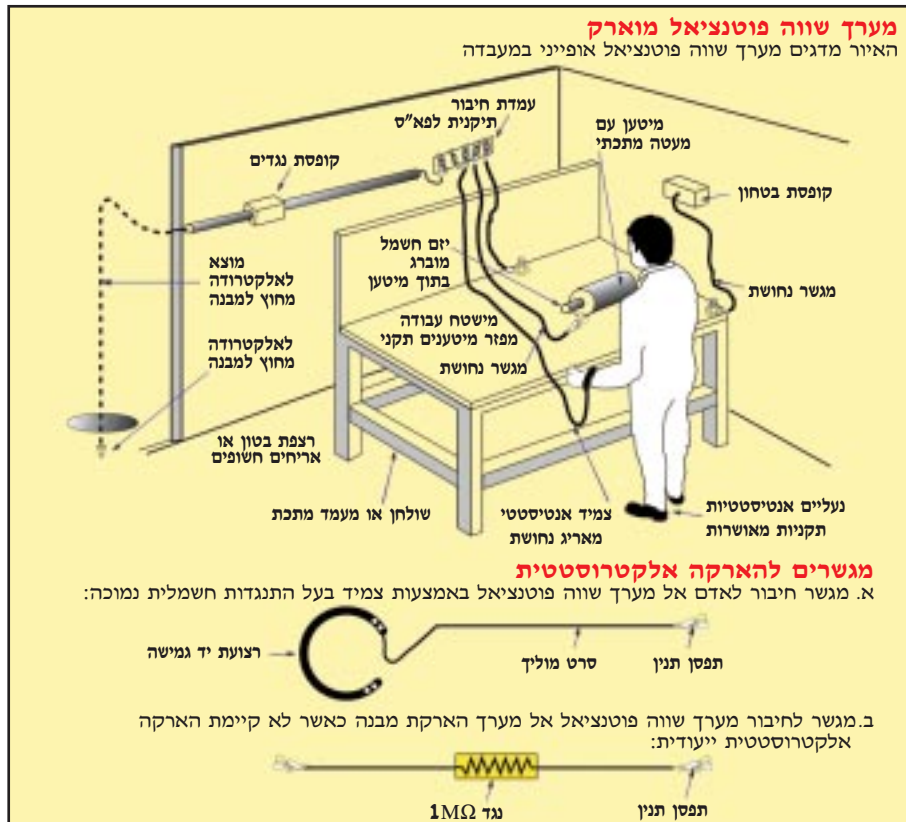
ההוראות המומלצות בנושא ציוד מגן, מכשירים וכלי עבודה הן:

גששי לחות ומגברי לחות

לחות אוויר היא אחד האמצעים החשובים ביותר לניטרול מיטעני חשמל סטטי. לחות האוויר מסייעת בפיזור מיטענים א"ס באמצעות ציפוי מישטחים מבדדים בלחות, המקנה להם מוליכות חשמלית. מגברי לחות משמשים לשמירה על לחות אוויר יחסית גבוהה מ-50%. באזורי סיכון I ו-II יבוצע ניטור מתמיד של הלחות היחסית (RH). ניתן להשתמש במד לחות תעשייתי.

השימוש במגברי לחות דרוש בעיקר באזור סיכון I. כאשר סוג העבודה מחייב שמירה על לחות נמוכה, כגון בעבודה עם חומרים פירוטכניים - יש להשתמש באמצעים אחרים לבקרת חשמל סטטי.

אם אזור העבודה ממוזג על ידי מזגנים מפוצלים - ניתן להתקין מגבר לחות מובנה במערכת מיזוג האוויר. אפשרות אחרת היא להתקין מערכות אוטונומיות, והגברת לחות, אשר תאפשרנה שמירה על לחות אוויר מתאימה, כנדרש, בכל נפח אולם העבודה.



איור 46: עמדת עבודה בחנ"ם ואמצעי הבטיחות האופייניים בעמדה

מיינני אוויר

מיינן אוויר הוא התקן לפירוק מולקולות אוויר למולקולות גז טעונות חשמלית. מיינני אוויר מנטרלים מיטענים א"ס באמצעות השבת אוויר טעון (מיונן) על גוף הטעון במיטען נגדי. מיינן אוויר מייצר באופן מתמיד את שני סוגי המיטענים החשמליים, אולם רק המיטענים המנוגדים נמשכים אל המיטען הא"ס ומנטרלים אותו. השימוש במיינני אוויר אינו מומלץ, בדרך כלל, בעבודה עם חומרים מסוכנים, כאשר קיימות אפשרויות חלופיות - כגון שימוש במגברי לחות. למיינני האוויר מספר חסרונות:

א. השימוש במיינני אוויר הפועלים במתח גבוה אסור בתכלית באזור סיכון I. באזור כזה דרוש אביזר חשמלי מוגן פיצוץ. מיינני מתח גבוה אינם מוגני פיצוץ!

ב. יש לבדוק באופן תקופתי, את איזון היונים (כמות שווה של יונים חיוביים ושליילים) ואם המיינן אכן מייצר אותם בכמות מספקת.

ג. יעילות המיינן מוגבלת לאזור עבודה מצומצם, בדרך כלל לא יותר משולחן עבודה בודד. לכן, עלותו של פתרון זה לשטח נרחב - גבוהה.

ד. המיינן עלול לייצר הפרעות אלקטרומגנטיות ושדות סטטיים, (זניחים בדרך כלל). יש לוודא, במדידה, שרמת ההפרעה האלקטרומגנטית אכן זניחה.

השימוש במיינן-מפוח יאושר באזור עבודה II ו-III לגבי כל מקרה לגופו, ובתנאים הבאים:

- א. הלחות היחסית חייבת להישמר בגבולות המתאימים;
- ב. השפעת המיינן מכסה את כל אזור העבודה הנדרש ויעילותו נבדקת תקופתית;
- ג. יש להעדיף שימוש במיינן הפועל ללא חשמל, אם הוכחה יעילותו.

גששי שדה סטטי ומערכות התראה לשדה סטטי

גשש סטטי הוא התקן למדידת עוצמת השדה הסטטי בקרבת גוף טעון א"ס. השימוש בגששי שדה סטטי מומלץ בכל אזורי הסיכון. כדי לוודא את יעילות אמצעי הבקרה הנקוטים באזור עבודה I - יש להשתמש במד שדה סטטי מדויק עם רשם נייר ועם חיישן שניתן להציבו רחוק ממכשיר החיווי. **מכשיר אזעקה למעבר סף** של שדה א"ס מופעל כאשר רמת השדה עוברת גבול מסוים שנקבע מראש. המכשיר נועד לביצוע ניטור שוטף של הצטברות מיטענים סטטיים באזור המוגן.

יעילותם של גששי שדה א"ס מוגבלת, הואיל ונפח הכיסוי של הגשש מצומצם מאד. לכן, כאשר נדרש לבצע ניטור שדה א"ס - הדרך המומלצת היא בדיקה מקיפה באמצעות מיכשור מדויק למדידת שדה א"ס. יש לחזור על המדידה בהתאם לשיגרת ביצוע סקרים, או לפי הצורך. מומלץ לבצע את הבדיקה ביום יבש עם לחות יחסית נמוכה מ-40%.

כסאות עם יכולת לפיזור מיטענים א"ס

כסאות בעלי מושב ותומך גב סינתטיים מהווים מקור ראשוני להיווצרות וצבירה של מיטענים א"ס. לכן, באזור סיכון I חל איסור להשתמש בכסאות כאלה. הכסאות המאושרים לשימוש הם:

- א. כסאות מעץ לא צבוע, ללא כריות ריפוד;
- ב. כסאות בעלי מושב ותומך גב העשוי מחומר מפזר מיטענים. לדוגמה: כסאות מסחריים שעליהם מוטבע סימון המאשר שהם אכן כסאות אנטיסטטיים;
- ג. כסאות מתכת, ללא תוספות.

ציוד בדיקה (צב"ד) וכלים

בחירת כלי עבודה ושימוש בכלים חשמליים, מיכשור חשמלי וציוד בדיקה בעמדות עבודה מוגנות פא"ס:

ציוד חשמלי וכלי עבודה

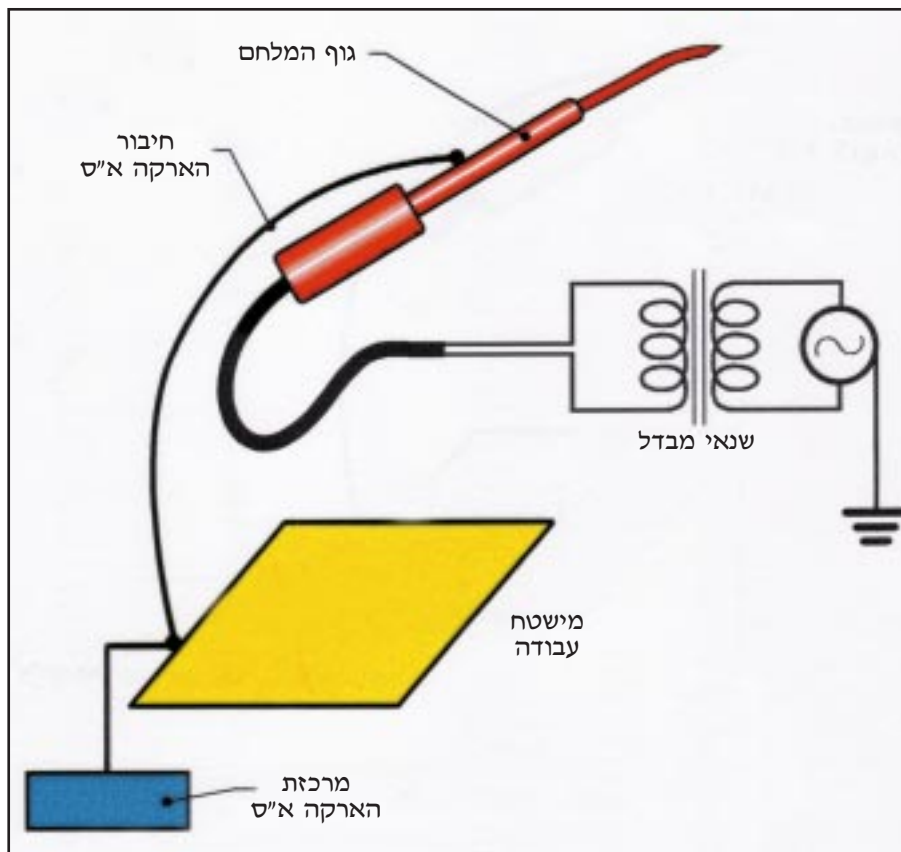
- שימוש בכלי עבודה ובמיכשור חשמלי באזור סיכון I יהיה מוגבל עד כמה שאפשר. האישור לשימוש במיכשור חשמלי יינתן על פי סיווג האזור לפי NEC-500, או לפי IEC, ולאחר התאמת הציוד החשמלי לאזור עבודה המחייב שימוש בציוד מוגן פיצוץ. באזורי סיכון II ו-III יאושר ציוד חשמלי העונה לקריטריונים הטכניים הבאים:
- א. כלים ומיכשור בעלי מקור זינה עצמאי במתח נמוך עד 28V;
 - ב. כלים המוזנים משנאי מבדל 220V, ואשר ניתן להאריקם למערכת הארקה א"ס;
 - ג. מיכשור חשמלי עם בידוד כפול.

חלקי מתכת חשופים יהיו מקושרים גלונית לעמדת העבודה, או לאביזר שעליו נעשית העבודה - אם לאביזר זה יש מעטפת מתכתית.

כלי עבודה ידניים

כלי עבודה מבודדים ייבדקו כדי לוודא שלא נוצרים מיטענים א"ס על גבי רכיבים סינתטיים שלהם. כאשר יש צורך, המישטחים הסינתטיים יטופלו בנוזל אנטיסטטי. כלי עבודה שאינם מבודדים מאושרים לשימוש בכל אזורי הסיכון. כאשר אחיזת כלי עבודה נעשית באמצעות כפפות - חובה לגשר את גוף הכלי באופן גלוני (חשמלי), אל מישטח העבודה, או לצומת הארקה א"ס.

באזור סיכון I ניתן להשתמש בכלי עבודה אשר עשויים מהחומרים הבאים: עץ, ברונזה, עופרת, סגסוגות בריליום ומונל (Monel).
 באזור זה אין להאריק כלי עבודה חשמליים להארקת הגנה חשמלית רגילה, לדוגמה: מלחם חשמלי יצויד בשנאי מבדל ויוארק אל מערכת הארקה א"ס, אשר מאריקה את כל עמדת העבודה המוגנת. קיימים מלחמים תקינים לעבודה ברכיבים רגישים לפא"ס.



איור 47: מלחם המיועד לעבודה על רכיבים נפיצים, כולל הארקה א"ס

ציוד בדיקה

ההנחיות בנושא ציוד חשמלי תקפות גם ביחס לציוד בדיקה (צב"ד). כאשר הצב"ד חייב להיות מוארק והוא אינו "צף" - כנדרש לגבי ציוד חשמלי - יש לנקוט באמצעי הזהירות הבאים:

- לוודא שהעובד מוארק לאדמה בהתנגדות שאיננה נמוכה מ- $20k\Omega$;
- לוודא שכל מישטחי המתכת בעמדת העבודה מגושרים יחד באופן גלוי, כדי ליצור מערך שווה פוטנציאל;
- יש לפנות חומרים מסוכנים, הנמצאים מחוץ לאריזת המגן שלהם, לפני הפעלה החשמלית של הצב"ד;
- בכל מקרה של אי בהירות בעת הפעלה ראשונית של הצב"ד - יש להתייעץ עם מהנדס בטיחות או עם האחראי על בטיחות חשמל.

דוגמה של מיתקן מוגן לפא"ס

תיאור המיתקן וסביבתו

המיתקן בנוי כמיכלול של מספר חדרי עבודה באזור מרוחק מאזורי המשרדים ומהדרכים הראשיות בחצר. המבנה הוא קשיח, מבטון מזוין, והוא כולל חדרי עבודה בעלי ייעוד מוגדר, כגון: ערבוב אבקות חנ"ם ראשוני, שקילה והכנת מנות; אינוך חוטי להט בתהליך ייצור יזמים חשמליים; דחיסת אבקות; בדיקות חשמליות; בדיקות מכניות ועוד.

בחדרים שבהם קיים סיכון של אבק חנ"ם מרחף, הותקנו אביזרי חשמל מוגני התפוצצות/מוגני אבק, כגון גופי תאורה, שקעים ומפסקים. בכל חדר מותקן מפסק-לחצן חירום לניתוק החשמל.

על גג המבנה הותקנו קולטי ברק אנכיים ומוליכי ירידה לאלקטרודות הארקה ייעודיות. מוליכי הירידה הותקנו הרחק מפתחי המבנה למניעת היפגעות עובדים בעת פיזור זרם הברק באדמה הסמוכה למבנה מ"מתח צעד" (מפל מתח הנוצר בין שתי נקודות על הקרקע עקב קיום שדה חשמלי בשטח הנ"ל).

באולמות הייצור הותקנו חיפויי ריצפה מפזרי מיטענים סטטיים מ-PVC. החיפויים מודבקים לריצפת הבטון ומוארקים באמצעות מקשרי הארקה בארבע פינות החדר. בפינה אחת הותקנה קופסת ביקורת, המאפשרת בדיקה תקופתית של הארקה החיפוי. בחדרי האחסון הריצפה היא בטון חשוף לא צבוע, הנחשב למוליך חשמל.

לאורך קירות החדרים מותקנות מרכזיות להארקה אלקטרוסטטית של שולחנות, מכשירים, ועובדים (באמצעות צמידי יד). ליד מרכזיית ההארקה מותקן שלט צהוב "הארקה אלקטרוסטטית". מערכת ההארקה הא"ס מגושרת להארקה היסוד של המבנה דרך קופסת נגדים: 2 נגדי פחם $500k\Omega/2W$ במקביל. מטרת הנגדים היא למנוע היווצרות לולאת הארקה בעלת התנגדות חוג נמוכה.

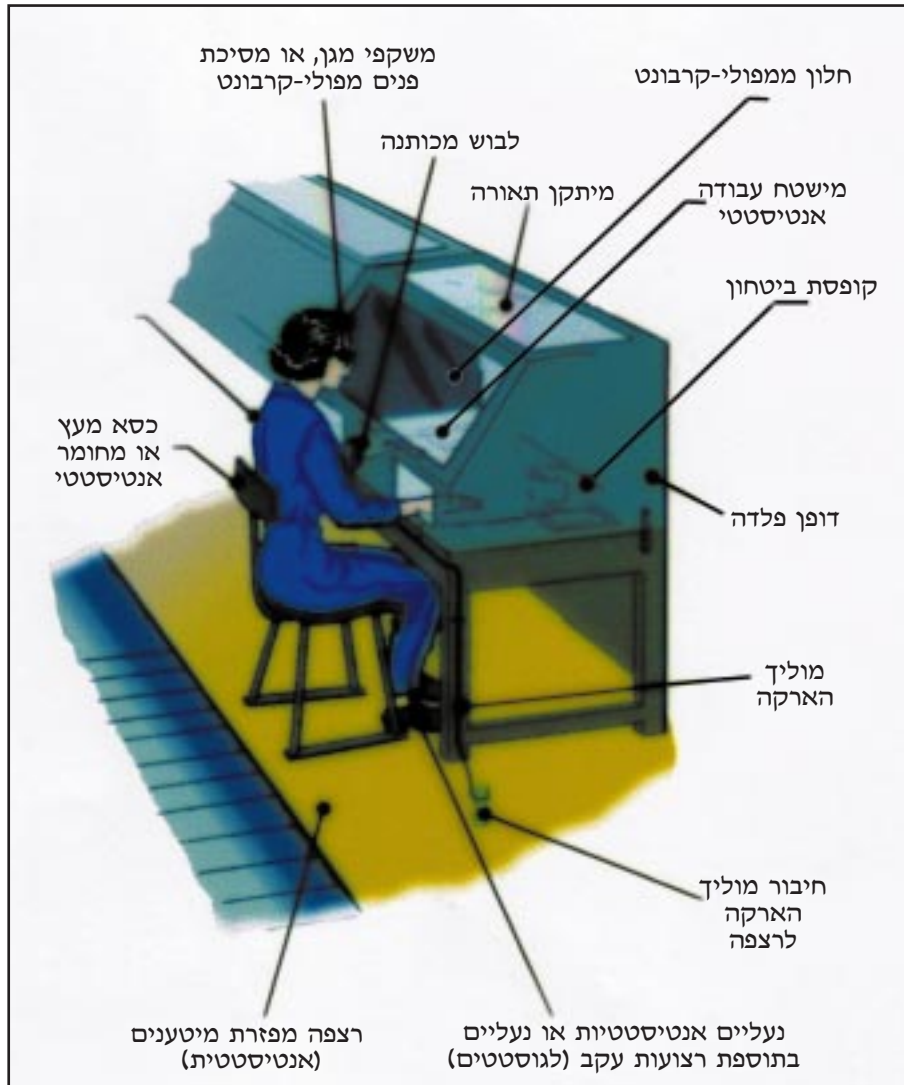
בקרת לחות אוויר

במיתקנים המייצרים ומעבדים חנ"ם ראשוני וחומרים פירוטכניים הוכנסו מיתקנים להגברת לחות, הכוללים לולאת בקרה סגורה, לשמירה על לחות יחסית מבוקשת. לחות האוויר ניתנת לשליטה בתחום 40%-70% לחות יחסית. המיתקנים מופעלים כאשר לחות האוויר יורדת מתחת ל-50% לחות יחסית.

התרומה של הגברת לחות האוויר בהורדת פוטנציאלים א"ס ופיזור מיטעים א"ס איננה מוטלת בספק: לחלוח מלאכותי של האוויר מסייע בשמירת התפוקה של המפעל, מכיוון שאין צורך להפסיק את הייצור כאשר לחות האוויר היחסית מחוץ לכותלי אולם הייצור יורדת מתחת ל-50% (מצב שכיח בסתיו ובאביב). במרבית חדרי המבנה מותקנים מדי-לחות אוויר תעשייתיים.

ביצוע עבודות מסוכנות מרחוק

כל העבודות הנחשבות בעלות פוטנציאל סיכון גבוה או בינוני נעשות באמצעות שליטה מרחוק, ללא נוכחות אדם. עבודות עם חנ"ם בעל פוטנציאל סיכון נמוך (כמות חומר קטנה) מתבצעות על ידי מפעילי מכונות, המוגנים במחיצת מגן שקופה, מפולי-קרבוט המצופה בחומר פולימרי שקוף, בעל תכונות הולכה אנטיסטטיות. חובה לחבוש משקפי מגן. איור 48 מציג עמדת עבודה מוגנת, כנדרש.



איור 48: מערך עבודה ידני מבוקר פא"ס הכולל תאי הגנה

עבודות המחייבות שליטה מרחוק נעשות בתוך מבנים ממוגנים. מיגון האולמות ומיתקני הייצור מבטיח ש:

- א. לא תהיה התמוטטות מכנית;
- ב. לא תהיה פגיעה מרסיסים;
- ג. לא תהיה פגיעה על ידי הלם קרקע;
- ד. הלחץ האפקטיבי לא יעלה על 15psi (סף הפגיעה בריאות).
- ה. קיר הפריצה ("הקיר הרך") יעוף בקלות החוצה ובקושי רב פנימה.

בכל חדר הותקנו 2 פתחים. הפתח המוליך אל מחוץ למבנה מסומן כ"פתח הימלטות".

מיגון

חיפוי מוליך/מפזר מיטענים לשולחנות

כל השולחנות, המדפים ומישטחי העבודה בחדרי הייצור מכוסים במישטח דו-שיכבתי הכולל שיכבה תחתונה מוליכה בצבע שחור, ושיכבה עליונה מפזרת מיטענים בצבע ירוק או בז'. החיפויים האלה מחוברים אל מרכזיית הארקה א"ס הקרובה ביותר, באמצעות מגשר נחושת מכוסה בשרוול מבודד.

כלי קיבול

כלי הקיבול לאחסון ולשינוע חומרים מסוכנים הן שקיות אנטיסטטיות המתאימות לתקנים (כפי שפורט בתיאור אריזות המגן).
אחסון יזמים חשמליים נעשה במיכל פלסטי אנטיסטטי המוכנס לתוך ארגז מתכת (ארגז פעולה) או עטוף ברדיד אלומיניום או בשקית המתאימה ל-MIL-B-81705B, Class I.

שילוט ונוהלי עבודה

השילוט בכניסה למיתקנים ובתוך חדרי העבודה מציג את תמצית נוהלי העבודה בנושא לבוש, הנעלה, כמויות חנ"ם מותרות ומספר העובדים המירבי המותר בכל חדר ובכל מיתקן.

להלן מספר דוגמאות:

הוראות בטיחות קו נפצים

- לבוש עובדים:** בגדי כותנה, נעליים אנטיסטטיות ומשקפי מגן
- לבוש מבקרים:** חלוק כותנה, לגוסטמים (רצועות עקב) ומשקפי מגן
- בדיקת נעליים:** יש לבדוק פריקה "אס" באמצעות מכשיר למדידת הארקה אישית, לפני העבודה
- לחות יחסית:** אין לבצע עבודה כאשר הלחות היחסית נמוכה 50%RH-M
- טמפרטורת העבודה:** 30°C-14°C
- דלת כניסה:** יש לסגור את הדלת ולהדליק מנורת אזהרה לפני תחילת עבודה/הרכבה "חמה" (עם נפיצים רגישים)
- סיום העבודה:**
 - יש להעביר רכיבים פסולים ופסולת חנ"ם לתא השמדה;
 - להכניס רכיבים תקינים וחנ"ם למחסן המתאים
 - לכבות מיכשור חשמלי.

משקל מירבי מותר של חנ"ם: _____ (לרשום בהתאם)

קבוצת סיכון: _____ (לרשום בהתאם)

מספר אנשים מירבי בהרכבה חמה, בחדר: _____ (לרשום בהתאם)

בחדר זה אסורה עבודה באבקות!

הכניסה למבקרים אסורה כאשר המנורה האדומה דולקת!

שים לב:

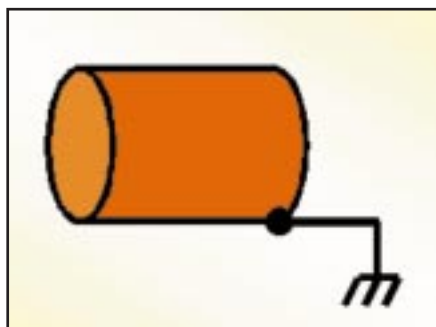
אין לבצע כל עבודה חמה:
- ללא הרשאה מתאימה או ללא פיקוח עובד מורשה
- ללא נוהל עבודה מאושר

ביקורות

כל המערכות המקושרות להארקת היסוד ולהארקה הא"ס נבדקות מדי חצי שנה בבדיקה חשמלית. הנושאים הנבדקים הם: ההתנגדות והגישור של כל המערכות להארקת יסוד ולהארקה הא"ס. לדוגמה: מדידת התנגדות הגישור של מרכזיות פריקה א"ס להארקת היסוד $1M\Omega-0.5M\Omega$; מדידת הגישור של חיפויי שולחנות אל המרכזיה; מדידת הגישור של חיפוי הרצפה אל הארקת היסוד. אחת לשנה נבדק ומכיל מחדש בקר ההארקה האישי לעובדים.

הארקה וגישור של גופים חמים

א. גופים המכילים חומר נפץ ("גוף חם") בעמדות, מחוברים למערכת פא"ס באמצעות כבל הארקת מיטענים סטטיים (כבל פא"ס). במכלול ייתכנו מספר אזורים שאותם יש להאריק.



איור 49: הארקה ישירה של גוף חם

כבל הפא"ס מחובר לגוף החם באמצעות תפס "תנין" אל נקודה מתכתית נגישה, לא מבודדת חשמלית, המסומנת בכל אזור במדבקה עם איור של משולש צהוב על רקע ירוק. בכל אזור מסומנות מספר נקודות חיבור בדוקות, שיש להן רציפות חשמלית טובה לכל המסה המתכתית של האזור.

אפשרויות שונות להארקת גופים חמים והצגת הפתרון המועדף מוצגים באיורים 49-52.

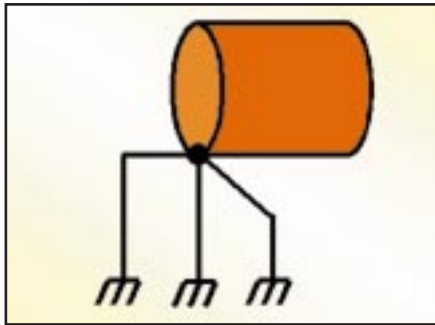


איור 50: הארקה של גוף חם עם נגד טורי של 1 מגה אוהם ($M\Omega$)

לצורך הארקה אלקטרוסטטית - מוטב להוסיף נגד טורי למגשר הישיר המוצג באיור 49, כדי לקבל את תצורת הארקה המוצגת באיור 50.

זוהי הארקה בטיחותית מאד שכן הלולאה איננה מאפשרת מעבר זרם תועה או מושרה גבוה דרך הגוף החם.

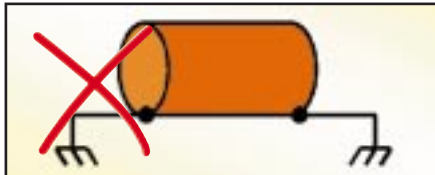
גם סידור ההארקות המוצג באיור 51 הוא סידור בטיחותי, למרות שאין בו נגד טורי, כל עוד הגוף מוארק בנקודה אחת בלבד.



איור 51: הארקה של גוף חס עם מספר מגשרי הארקה המחוברים, כולם, לנקודה אחת

ריבוי הארקות תקינות יוצר לולאות הארקה ללא אפשרות להזרים זרם דרך הגוף החס. אבל, כאשר ההארקות יוצרות לולאה בעלת עכבה נמוכה, שבתלקה עוברת דרך הגוף החס - תיתכן בעיית בטיחות, כמוצג באיור 52.

ב. מיתקן נייד או שולחן עבודה המיועדים לשאת תת-מכלולים חמים, מוארקים אל מערכת הפריקה הא"ס באולם. כבל הפא"ס מחובר למיתקן הנייד או לשולחן באמצעות תפס "תנין" אל נקודה מתכתית נגישה בלתי מבודדת, המסומנת על גבי המיתקן הנייד או על שולחן העבודה. לאחר השלמת ביצוע הארקות השולחן או העגלה, ניתן להניח עליהם מיכלולים חמים. במצב זה מקושר תת-המיכלול אל השולחן או למיתקן הנייד באמצעות כבל גישור (ללא נגד טורי).



איור 52: מצב מסוכן: הארקה של גוף חס עם מספר מגשרי הארקה היוצרים לולאת הארקה בלתי בטיחותית

תת-מיכלול חס (שאינו מגושר אל מישטח מוארק) מחובר אל מערכת פא"ס בחיבור ישיר, באמצעות מגשר הארקה הכולל נגד טורי.

השוואת פוטנציאל בעת שינוע גופים "חמים"

שינוע בין מבנים

שינוע בין מבנים מבוצע בעגלה בעלת רצועת פא"ס. כללי השינוע של גוף "חס" (כגון גוף "חס" רקטי, גוף פתוח המכיל חנ"ם וכיו"ב) במארז מתכתי ובמארז בלתי מתכתי (כגון עץ), הם:

שינוע גוף "חס" במארז מתכתי (מכולה):

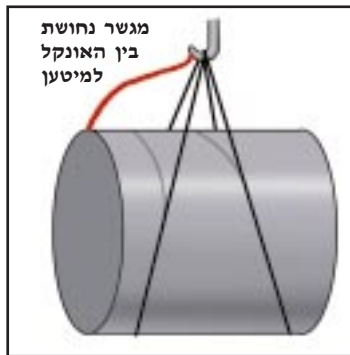
- א. בעת הכנסת הגוף חס למכולה יש לחבר מגשר להשוואת פוטנציאל בין הגוף החס לגוף המכולה. מגשר זה אינו נחוץ לאחר גמר אריזת הגוף החס;
- ב. המכולה תגושר אל גוף הרכב באמצעות מגשר ישיר. הגישור הזה מתקבל, בדרך כלל, תודות למגע המכולה עם רצפת הרכב. כדי ליצור גישור ודאי, נראה לעין, רצוי להוסיף מגשר נחושת חיצוני (ללא נגד טורי);
- ג. בעת הוצאת גוף חס מהמכולה - יש לחזור על הפעולות בסדר הפוך: לפני הוצאת הגוף החס מהמכולה יש לגשרו אל המכולה (אם המגשר נותק בשלב א);
- ד. אם הגוף החס נשלף על ידי עגורן, הוא יגושר אל אנקול העגורן.

שינוע במארז עץ:

- א. אין צורך בהארקת גוף חם או ארגז העץ שבו הוא ארוז (לא ניתן להאריק גוף בלתי מוליך);
- ב. בעת הכנסת הגוף החם אל ארגז העץ, כאשר הוא מבוצע על גבי הרכב - יש לגשר את הגוף החם אל הפלטפורמה. את הגישור הזה מסירים בעת סגירת המכסה. יש לקבע היטב את הגוף החם בתוך הארגז, כדי למנוע תנודות וחיכוך בעת ההובלה (למניעת היווצרות מיטענים סטטיים וסיכונים מכניים אחרים);
- ג. עם פתיחת הארגז, כאשר היא מבוצעת על גבי הרכב - מחברים מגשר ישיר בין הפלטפורמה לבין הגוף החם.
- ד. אם הגוף החם נשלף על ידי עגורן הוא מגושר אל אנקול העגורן.

שינוע למבנה להרכבה סופית

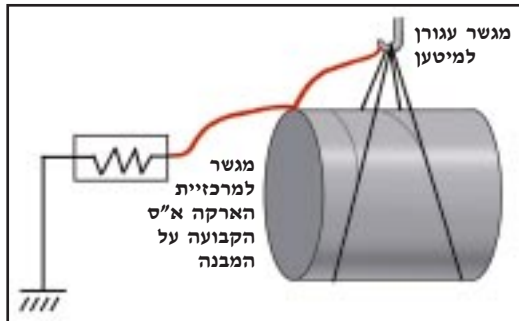
- א. שינוע למבנה, להרכבה סופית, מבוצע בעגלת שינוע כאשר הגוף החם מגושר אל העגלה. המגשר מחובר בין נקודות הארקה א"ס המסומנות על גבי הגוף החם ועגלת השינוע;
- ב. עגלת השינוע מצוידת ברצועת הארקה מגומי הנוגעת בקרקע. רצועה זו מיותרת כאשר צמיגי העגלה מוליכים חשמל. בדרך כלל - כל צמיג הוא מוליך חשמל, אך בכל זאת נדרשת בדיקה.
- ג. כאשר עגלת השינוע משונעת באמצעות מלגזה - העגלה מגושרת אל גוף המלגזה.



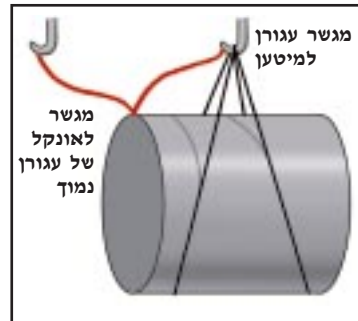
איור 53: הארקת מיטען לאונקל

שינוע בתוך מבנה

- א. לפני הוצאת גוף חם מתוך מכולה מחברים אליו כבל הארקה א"ס;
- ב. לפני שינוע של גוף חם מאזור עבודה אחד אל אזור עבודה אחר, בתוך אותו אולם - הגוף החם מגושר אל אנקול העגורן (איור 53).
- ג. בעת העברת גוף חם מעגורן אחד לעגורן שני - הגוף החם מגושר לאנקול העגורן השני, לפני ניתוק המגשר מאנקול העגורן הראשון (איור 54).
- ד. עם סיום השינוע - אל הגוף החם מחובר כבל הארקה א"ס, ורק אחר כך המגשר מנותק מהעגורן (איור 55).
- ה. שינוע הגוף החם באמצעות עגורן/עגורנים מבוצע במהלך רציף אחד.



איור 55: פריקת מיטען אלקטרוסטטי דרך מרכזיית הארקה



איור 54: הארקת מיטען לאונקל וגישור לעגורן סמוך