

פיצוץ אבקות בתעשייה

פיצוץ אבקות עלול להתרחש כאשר תרחיף אבקה של חומר דליק בא במגע עם מקור הצתה. מטרת המאמר היא להגביר את המודעות לסיכוני הפיצוץ של אבקות בהן נעשה שימוש בתעשייה ולשיטות בהן ניתן למזער סיכונים אלה

מאת שי שגב M.Sc

הכתוב הוא מומחה לניתוח סיכונים תהליכיים וסיכוני אש

תאונות קטלניות של פיצוצי אבקות שאירעו בשנים האחרונות - הן בארץ והן בעולם - הסבו את תשומת הלב לחשיבות הבנת הסיכונים הכרוכים בעבודה עם אבקות, לצורך מניעת תאונות דומות בעתיד. פיצוץ אבקות עלול להתרחש כאשר תרחיף של אבקה דליקה ("ענף" מרחף באוויר של אבקת חומר דליק כגון: סוכר, קמח, פלסטיק, פחם, אלומיניום, אבץ, מגנזיום, ניילון, כותנה, אבקות פרמצבטיות וכד'), בא במגע עם מקור הצתה.

תאונות אלה הובילו לשינויים במספר תקנים בינלאומיים ולהחמרה הדרגתית של החוקים והתקנות במספר מדינות (לדוגמה ה-Combustible Dust Rule בארה"ב).

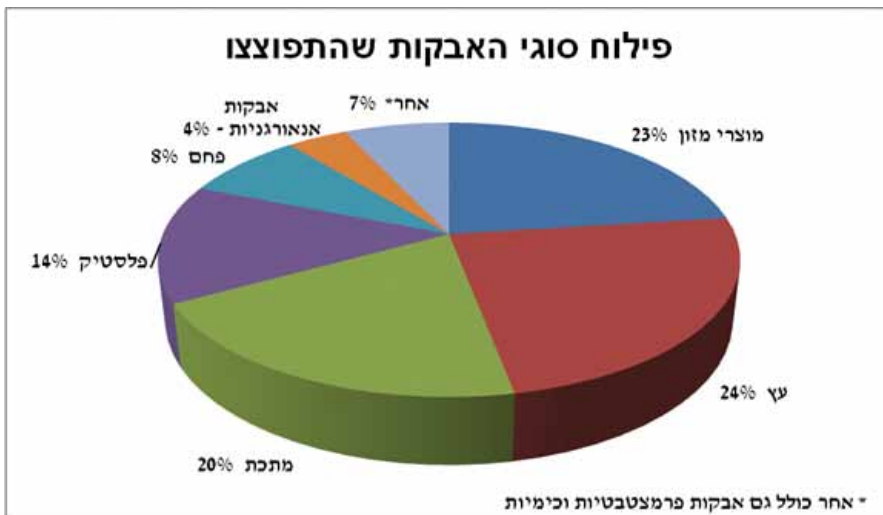
סטטיסטיקת תאונות של פיצוץ אבקות

ה-CSB - הרשות האמריקאית לחקירת תאונות בתעשייה הכימית - או בשמה המלא:

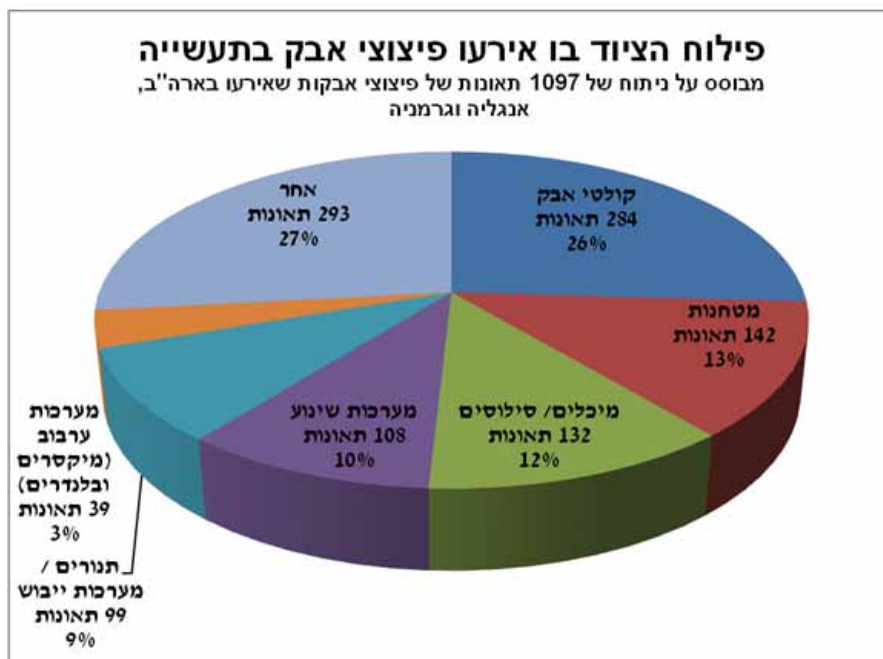
U.S. Chemical safety and hazard investigation Board ניתוח ביצעה ניתוח של 281 תאונות כתוצאה מפיצוץ אבקות שאירעו במפעלי תעשייה בארה"ב בין השנים 1980 ל-2005. בתאונות אלה נרשמו 119 הרוגים ו-781 פצועים. ממוצע הנזק לרכוש: כמיליון דולר לתאונה. המימצאים הראו שמרבית התאונות התרחשו בתעשיות המזון (23%), העץ (24%), המתכת (20%) והפלסטיק (14%). פילוח על פי סוגי האבקות שהתפוצצו ראו גרף 1.

מניתוח אחר (ראו גרף 2) שנערך ל-1097 תאונות של פיצוצי אבקות שאירעו בארה"ב, אנגליה וגרמניה ניתן לראות כי הציודים הנפוצים בהם אירעו מרבית תאונות פיצוצי האבקות הם: קולטי אבק (284 תאונות, 26%), מטחנות (142 תאונות, 13%), מיכלים (132 תאונות,

גרף 1: פילוח סוגי האבקות שהתפוצצו (מקור: דוח ה-CSB)



גרף 2: פילוח הציוד בו אירעו פיצוצי אבק בתעשייה





האש שהתפשטה במפעל Hayes Lemmerz International באינדיאנה ארה"ב כתוצאה מסידרת פיצוץי אבקת אלומיניום. סדרת הפיצוץ החלה כתוצאה מפריקת חשמל סטטי בקולט האבק - אבקת האלומיניום היתה טעונה בחשמל סטטי כתוצאה מהשינוע הפניאומטי. באירוע נהרג עובד אחד ושני עובדים נוספים נפצעו קשה.



מפעל 'Imperial Sugar' בג'ורג'יה ארה"ב לאחר התאונה שנגרמה בשל פיצוץ תרחיף של אבקת סוכר. בתאונה זו קיפחו את חייהם 14 עובדים ונפצעו 36

ג. הרחפה:

האנרגיה הדרושה על מנת להצית תרחיף אבקה נמוכה באופן משמעותי מהאנרגיה הנדרשת בכדי להצית את אותו חומר כאשר הוא נמצא במצב מוצק, או כאשר הוא צבוב בערימה. זאת מאחר ובתרחיף אבק יש צורך להצית רק מספר חלקיקים קטן. החום והלהבות הנפלטות משריפת חלקיקים אלה גורמים לתגובת שרשרת (תגובה סימפטטית) ולהצתת שאר החלקיקים בתרחיף.

בכדי שתרחיף אבקה יהיה פציץ - ריכוז האבקה בתרחיף צריך להיות גבוה מהריכוז הפציץ המינימלי (MEC).

היווצרות של תרחיף אבקה נפוצה כאשר קיים מקור טורבולנציה (לדוגמה: בעת מילוי מיכל) זאת מכיוון שהחלקיקים הגדולים ישקעו ראשונים וכתוצאה מכך יהיה ריכוז גבוה יותר של חלקיקי אבקה קטנים בתרחיף.

חלק ניכר מפיצוץי האבקות שאירעו בתעשייה התרחשו במהלך פעולות ניקוי של חדרים וציד, בעזרת אוויר דחוס. השימוש באוויר דחוס יוצר את תרחיפי האבקה אשר במגע עם מקור הצתה, כגון מיטטח חם, עלולים ליצור את הפיצוץ.

ד. חלל מוקף:

בכדי שיווצר תרחיף אבקה כתוצאה מהצתת תרחיף האבקה, התרחיף צריך להימצא בתוך נפח כלוא - כגון מבנה, ציוד תהליכי וכד' - על מנת שתהיה הצטברות של הלחץ עד להיווצרות הפיצוץ. בהיעדר חלל מוקף, הצתת תרחיף האבקה תגרום לרוב לשריפה ולא לפיצוץ.

מרכיבי תהליך הפיצוץ

א. "דלק" (אבקה נפיצה):

הרגישות להצתה של אבקה גדלה ככל שגודל חלקיקי האבקה קטן. **אבקה נפיצה מוגדרת כחומר בעל קוטר חלקיקים הקטן מ- $420 \mu m$ (0.42 מ"מ).**

מניתוח אירועים שהתרחשו בעולם, מתברר כי מספיק נפח של כ-10 ליטר תרחיף אבקה בגודל המתאים על מנת שיווצר פיצוץ אשר עלול לגרום לפגיעה קשה בציוד ובאנשים.

ב. חמצן:

בכדי שיתרחש פיצוץ נדרש חמצן בריכוז המתאים. ההסתברות לשריפה או פיצוץ היא נמוכה כאשר בתרחיף האבקה יש פחות ממחצית ריכוז החמצן הנדרש לצורך שריפה. ההסתברות להצתה של מרבית האבקות - למעט אבקות המכילות חמצן כמרכיב במולקולה של החומר (כגון פראוקסידים) - קטנה ככל שקטן ריכוז החמצן.

אחד המחקרים שבוצעו בנושא⁴ הראה כי עבור חלק מהאבקות מספיק להוריד את ריכוז החמצן ל-16% (לעומת ריכוז חמצן של כ-21% באוויר) בכדי להעלות את האנרגיה המינימלית הנדרשת להצתה (MIE) פי 100.

כאשר מניעת הפיצוץ של האבקה מבוססת על הקטנת ריכוז החמצן (ביצוע תהליך באווירה אינרטי), יש לבצע ניסוי לקביעת ריכוז החמצן המקסימלי אשר בו הצתה של תרחיף אבקה (בתנאים סביבתיים של לחץ וטמפרטורה) אינה אפשרית. ניסוי זה נקרא: Limiting Oxygen Concentration Test (LOC).

מאחר והם חלק בלתי נפרד כמעט בכל תהליך בו מתבצעת עבודה עם אבקות, מכיוון שבהם נאספים חלקיקי האבקה הקטנים ביותר שגם ניצתים בקלות הרבה ביותר, ומכיוון שקולטי האבק הם בעלי חוזק מכני נמוך יותר משאר הציוד התהליכי. במטחנות יש שכחות גבוהה של פיצוץי אבקות מאחר ומושקעת בהן כמות גדולה של אנרגיה לצורך שבירת חלקיקי האבקה. כתוצאה מכך נוצר חימום של האבקה ושל המיטטחים המתכתיים, ולכן אבקה המצטברת במטחנה יכולה בקלות להתחמם עד לטמפרטורה בה היא ניצתת.

המרכיבים הנדרשים בכדי שיווצר פיצוץ אבקה

על מנת שיווצר פיצוץ של אבקה יש צורך שחמשת המרכיבים של "מחומש הפיצוץ" יתקיימו בו זמנית:

- א. "הדלק" (אבקה דליקה / נפיצה);
- ב. תרחיף;
- ג. חמצן;
- ד. חלל מוקף (נפח כלוא);
- ה. מקור הצתה (אבק).



איור 1: מחומש הפיצוץ הנפחי -

האלמנטים הדרושים בו זמנית כדי שיווצר פיצוץ. מדובר בפיצוץ נפחי. גל ההדף הנוצר לאחר הצתת האבקה כלוא בתוך נפח מסוים (חלל מוקף כגון יחידת ציד, או חדר), דבר שגורם לעלייה מהירה מאוד של הלחץ ולפיצוץ.



מפעל West Pharmaceuticals בצפון קרוליינה, ארה"ב, לאחר פיצוץ תרחיף אבקת פוליאיתילן. כתוצאה מהפיצוץ והשריפה שאירעה בעקבותיו נהרגו שישה עובדים והמפעל נהרס כולו.

מסוג החומר הכימי עצמו, אלא גם מפיזור גודל החלקיקים, מצורת החלקיקים, מדחיסות החלקיקים, וכמובן מתוספים שונים הנמצאים בכל חומר אבקתי. לכן, בהערכת הסיכון יש חשיבות גדולה לבדיקה מעבדתית של האבקה בה נעשה שימוש ואין להסתמך על מידע כללי המפורסם בספרות מקצועית.

חשוב לשים לב שלבדיקת ה-MIE ישנן שתי אפשרויות: עם השראה (inductance) או בלעדית. הבדיקה עם השראה מדמה פריקה למשך זמן ארוך יותר, פריקה כזו יכולה להתרחש כתוצאה מחיכוך מכני בין שני מישטחים או כתוצאה מצידוד חשמלי או צידוד בקרה. בדיקת ה-MIE ללא השראה מדמה באופן טוב יותר פריקת חשמל סטטי.

הערה: בבדיקת ה-MIE עם השראה, זמן הניצוץ הוא ארוך יותר ולכן ערכי ה-MIE המרביים שיתקבלו יהיו נמוכים יותר (שימוש בערכים אלה הוא שמרני יותר).

תקן ישראלי ת"י 60079 חלק 32: "אטמוספרות נפיצות: סיכוני חשמל סטטי" עוסק בסיכוני חשמל סטטי הכרוכים בעבודה עם חומרים דליקים ונפיצים. **תקנות הבטיחות בחשמל מחייבות לפעול לפי תקן זה במקומות בהם קיימת או עלולה להיווצר אווירה נפיצה.**

שיטות להקטנת המיטען הסטטי

• **הקטנת מיטען סטטי ע"י הגדלת הלחות (ריכוז אדי המים).** לחות יחסית גבוהה מקטינה את ההתנגדות החשמלית של פני השטח של חלק גדול מהאבקות, ומעלה את הקצב של התפוגגות המיטען הסטטי של

הסטטי יכול להצטבר הן על אביזרים - אביזרי צנרת מתכתיים בלתי מוארקים או אביזרים העשויים מחומר מבודד - והן על גבי האבקה עצמה. בניגוד למצב עם נוזלים דליקים, לא ניתן למנוע את הצטברות המיטען החשמלי על גבי האבקה (בפרט אם האבקה היא מבודדת), אך ניתן להקטין את המיטען הסטטי ע"י שימוש באחת מהשיטות המפורטות בהמשך.

3. צריכה להתקיים פריקת חשמל סטטי באנרגיה הגבוהה מאנרגיית ההצתה המינימלית (MIE).

האבקה	אנרגיית ההצתה המינימלית (MIE) במיליג'אול (mJ)
אבץ	200
קמח חיטה	50
פוליאיתילן	30
סוכר	30
מגנזיום	20
גופרית	16

טבלה 1: ערכי MIE לאבקות נפוצות בתעשייה

ה-MIE הוא פרמטר מרכזי בהערכת הסיכונים, שנדרש לצורך הערכת ההסתברות להצתת אבקה מסוימת. ככל שערך ה-MIE נמוך יותר, הסבירות שאותה אבקה תוצת גבוהה יותר.

את ערכי ה-MIE של מרבית האבקות הקיימות בתעשייה, לא ניתן למצוא בספרות, ויש לבדוק אותם בעזרת אחת מהמעבדות בחו"ל המתמחות בתחום, בהתאם להנחיות תקן ASTM E2019 (לדוגמה: Fauske בארה"ב, Chilworth באנגליה וכד'). יש לזכור ש-MIE של חומרים אבקתיים מושפע מאוד לא רק

מקור ההצתה:

תקן EN1127-1 מציין 13 גורמי הצתה אפשריים. מרבית גורמי ההצתה הללו מוכרים היטב לעוסקים בתחום הבטיחות התהליכית, לדוגמה: הצתה כתוצאה ממישטחים חמים, הצתה כתוצאה מחיכוך מכני (לדוגמה יתר, הצתה כתוצאה מפיזור מתכתי לתוך מטחנה או כתוצאה מכשל במיסב, הצתה כתוצאה מצידוד חשמלי שאינו מתאים לעבודה עם אבקות נפיצות, או צידוד חשמלי שלא תוחזק כהלכה) הצתה כתוצאה מהתפרקות אקסותרמית של האבקה וכד'. במאמר זה אני מנתח את ההצתה כתוצאה מפריקת חשמל סטטי, מאחר והמודעות בארץ לגורם הצתה זה היא נמוכה.

הצתה כתוצאה מפריקת חשמל סטטי:

בכדי שפריקת חשמל סטטי תצית אבקה דליקה / נפיצה, צריכים להתקיים שלושת התנאים הבאים:

1. **צריכה להיות היווצרות של מיטען חשמל סטטי:** בכדי שיווצר חשמל סטטי יש צורך בתהליך של חיכוך. פעולות בתעשייה בהן נוצר מיטען חשמל סטטי כוללות בין היתר: מיקרוניזציה וטחינה (פעולות בהן קיים חיכוך גבוה במהלך הקטנת גודל גרגרי האבקה ולכן נוצר גם מיטען חשמלי גבוה), הזרמת אבקה דרך צינור הזנה (chute), סינון, שינוע פניאומטי, הזנת שקי אבקה לריאקטור וכד'.

2. **צריכה להיות הצטברות של מיטען חשמל סטטי** (כלומר: קצב היווצרות מיטען החשמל הסטטי צריך להיות גבוה מקצב איבוד המיטען החשמלי). מיטען החשמל

של פחות מ-10 mJ או כאשר יש נוכחות של גזים דליקים (בתהליך), מומלץ להתקין התקן לפריקת לחץ (explosion venting), ו/או להשתמש בחינקון (אינרטיזציה), ו/או להשתמש בצידוד אשר יכול לעמוד בלחץ המרבי אשר עלול להתפתח בו (הכלה).

- **אין להסיר ציפוי ממיכל אבקה** כאשר המיכל אינו נקי לחלוטין מאבקה;

- **שימוש בציפוי בלתי מוליך.** ניתן להשתמש בציפוי בלתי מוליך רק כאשר מסיבות תהליכיות לא ניתן להשתמש בציפוי מוליך (לדוגמה כאשר האבקה מגיבה עם מתכות) וכאשר מתח הפריצה של הציפוי (breakdown) נמוך מ-4 kV;

- **אין להשתמש בציפויים בלתי מוליכים כאשר קיימת נוכחות גזים דליקים;**

- **יש לבדוק תקופתית את שלמות הציפוי.**
- **שימוש במיכלי מתכת.** מיכלי ביניים לאחסון אבקה יהיו מחומר מתכתי או מסוג FIB C Type. מיכלים אלה צריכים להיות תמיד מוארקים בעת המילוי או הריקון.

- **הוספה של אבקות לנוזלים דליקים:** הוספה ידנית של אבקות לתוך נוזלים דליקים מתוך חביות מתכת חביות פלסטיק, שקי נייר או שקיות פלסטיק גרמו למספר רב של שריפות ופיצוצים כאשר חלקם הגדול נגרם כתוצאה מפריקת חשמל סטטי. חשמל סטטי יכול להיווצר כתוצאה משפיכת האבקה ו/או כתוצאה ממעבר אבקה דרך תעלה לכלי המקבל. כאשר ניתן, יש למנוע טעינה ישירה של אבקות לתוך אטמוספירה דליקה ע"י שימוש באחת או יותר מהשיטות הבאות:
 - ע"י טעינה סגורה לתוך כלי הנמצא באווירה אינרטית.

- ע"י קירור הנוזל הדליק אל מתחת לנקודת ההבזקה שלו.

אם לא ניתן ליישם את השיטות הנ"ל יש לנקוט באמצעי הבטיחות הבאים:

- המיכל המקבל ותעלת ההזנה (Chute) יהיו עשויים מחומר מתכתי מוארק.
- כאשר למיכל מתכתי יש ציפוי פנימי מחומר מבודד, יש להתקין נקודת הארקה בסמוך לבסיס המיכל.
- על מפעילי המיתקן להיות מוארקים.



אזור הייצור במפעל CTA Acoustics בקנטאקי, ארה"ב, לאחר סדרת פיצוצי אבקת שרף פנולי שאירעה במהלך ניקוי קווי ייצור בעזרת אוויר דחוס. כתוצאה מסדרת פיצוצים זו נהרגו 7 עובדים ונפצעו 37. המפעל נהרס לחלוטין.

הצתה כתוצאה מפריקת ניצוץ. יש לוודא הארקה העובדים במיוחד כאשר אנרגיית ההצתה המינימלית של האבקה המטופלת נמוכה מ-100mJ.

- **שליטה על חשמל סטטי המצטבר על גבי העובדים** - באווירה דליקה מיטען המצטבר על גופו של עובד מסוגל לגרום לדליקה. לשם כך יש להבטיח:

- רצפה ונעליים מוליכות (התנגדות בין 10^4 Ohm ו- 10^8 Ohm);
- אמצעי הארקה לעובד;

- ביגוד אנטיסטטי או מוליך (לדוגמה: בגדים המכילים למעלה מ-35% כותנה, חליפות חד פעמיות אנטיסטטיות וכד').
- גם בדים לניקוי וניגוב יכולים ליצור חשמל סטטי מסוכן, לכן ניקוי - במיוחד בעבודה עם סולבנטים - צריך להשתמש בבדים מוליכים;

מניעת פליטת אבקה אל מחוץ לצידוד / מיכלים סגורים. במקרה ונפלטת אבקה במהלך התהליך יש להעמיד מערכת יניקה ניידת מיוחדת ליד פליטת האבקה ולנקות מיד כל שפך אבקה. יש לנקוט באמצעים למניעת הישנות המקרה;

- **שימוש בשואבי אבק ייעודיים.** לצורך ניקוי שפך אבקות מומלץ להשתמש בשואבי אבק המיועדים לכך ושאושרו לפי התקן למטרה זו. אין להשתמש באוויר דחוס לצורך ניקוי שפך אבקות, מאחר והדבר יוצר סכנת אש/פיצוץ כתוצאה מהרחפת האבקה (יצירת ענני אבקה);

- **התקן לפריקת לחץ.** כאשר נעשה שימוש בצידוד בו עלול להתרחש פיצוץ של אבקה (קריטי במיוחד כאשר האבקה בתוך הצידוד היא בעלת אנרגיית הצתה מינימלית

אבקות במיכלי מתכת מוארקים. כמו כן, אדי המים מעלים את האנרגיה הנדרשת להצית את האבקה (משמשים כ"קבל חום"), וכן גורמים לגיבוש האבקה (להגדלת גודל הגרגרים) ובכך להפחתת ההסתברות להצתה. השיטה להקטנת המיטען הסטטי אינה אפקטיבית כאשר:

- הלחות היחסית קטנה מ-60%;
- מתבצע שינוע במהירויות גבוהות;
- בתהליך מעורבים חומרים חמים;

- החומר הוא הידרופובי (דוחה לחות, כמו טפלון);

- **הקטנת מיטען סטטי ע"י יוניזציה:** המיטענים הסטטיים בחלקיקי אבק המרחפים בגז/אדי סולבנט יכולים להיות מנוטרלים ע"י יוניזציה. יוניזציה של האוויר מבוצעת בד"כ ע"י פריקת קורונה מהתקן מתח גבוה (קורונה היא התפרקות חשמלית הנגרמת כתוצאה מיינון של מולקולת חמצן/חנקן הנמצא מסביב למוליך טעון חשמלית), או ע"י שימוש בחומרים רדיואקטיביים. מומלץ להתקין יוניזטור בנקודה שבה האבקה נכנסת למיכל, וכתוצאה מכך להקטין את אנרגיית החשמל הסטטי באבקה. ניתן להתקין יוניזטורים גם במעבר אבקה הנכנסת למיכל בלתי מוליך ובכך למנוע היווצרות פריקה של חשמל סטטי במנגנון מברשת מתגלגלת (Propagating Brush Discharge) עליו אפרט יותר במאמרים הבאים.

החסרונות של שיטה זו הם:

- קשה לוודא שרמת היוניזציה הנדרשת תגיע לכל חלקיקי האבקה כאשר ענן תרחיף האבקה גדול יחסית;
- המיטען הסטטי הכולל, אותו יש לנטרל, הוא לעיתים קרובות גדול יותר מהמיטען הסטטי שיכול להיות מועבר ע"י מערכת היוניזציה;
- כשל במיתקן היוניזטור יכול ליצור ניצוצות וכתוצאה מכך להצית את האבקה.

אמצעי בטיחות נדרשים למניעת הצתת אבקות כתוצאה מחשמל סטטי

- **הארקה וגישור** - כל אלמנט מתכתי, הצידוד הנייח כמו גם הצידוד הנייד וכן אלמנטים מוליכים אחרים, כולל העובדים, חייבים להיות מוארקים ישירות לאדמה או על ידי גישור למיתקן מוארק, בכדי למנוע

מערכות שינוע פניאומטי

שינוע פניאומטי של חומרים אבקתיים בצנרת או בתעלות יכול ליצור מיטען חשמל סטטי, הן באבקה המשונעת והן במערכת השינוע (הצנרת/תעלה). מיטען החשמל הסטטי יישאר צבור באבקה, כאשר היא תצא ממערכת השינוע הפניאומטי. לפיכך יש לנקוט באמצעי זהירות בנקודת איסוף החומר. כמו כן יש לנקוט באמצעי הזהירות הבאים:

- יש לשמור על אווירה אינרטי במערכת השינוע;
- צנרת ותעלות מערכת השינוע תהיינה ממתכת ומוארקות;
- המיכלים אליהם מחוברת מערכת השינוע צריכים להיות מוארקים, על מנת לפרוק את המיטען הסטטי שהצטבר כתוצאה מתנועת החומר;
- כאשר נעשה שימוש במחברי צנרת או באביזרים העלולים לפגוע ברציפות נתיב ההארקה, יש להשתמש במגשרי הארקה מתאימים ולוודא רציפות ההארקה;
- כאשר משתמשים בקטעי צנרת קצרים של פלסטיק שקוף (לדוגמה: על מנת שניתן יהיה לראות את הזרימה), יש לוודא שקטעים אלה אינם גורמים לפריקת חשמל סטטי ולא פוגעים ברציפות הארקה הצנרת.

מחברים גמישים

במחברים העשויים מחומר בלתי מתכתי המכילים חוט הקשחה ספיראלי פנימי יש לוודא שהחוט הפנימי מקושר ישירות אל מחברי המתכת בקצוות ומחברי המתכת הללו מחוברים להארקה. אין להשתמש במחברים בעלי יותר מספירלה פנימית אחת מכיוון שבמקרה כזה, אין דרך לבדוק אם אחת מהספירלות איבדה את רציפותה.

מסנני בד

כל האבקות המגיעות למסנני בד נושאות איתן מיטען של חשמל סטטי שעוצמתו תלויה במאפייני האבק והתהליך. המיטען הסטטי יישאר על האבק ויצטבר על פני השטח של המסנן. לפיכך ישנה חשיבות לשמור על כל הציוד המוליך מוארק בכדי למנוע השראות (מעבר מיטען ללא מגע ישיר) של מיטען סטטי זה לרכיבים מוליכים העלולים להיות בלתי מוארקים. השראה כזו נפוצה מאוד כאשר יש מעטפת כלוב (מעטפת רשת העוטפת את הפילטר). אם התקני מעטפות כלוב כאלה אינם מוארקים - פריקת ניצוץ עלולה להתרחש

למבנה של בית המסנן או למעטפות כלוב סמוכות.

במקרים רבים, למסנני בד ישנה צמה מתכתית המחוברת לקצות המסנן, כאשר המטרה היא שהצמה תועבר דרך מעטפת הכלוב ותגושר לצנרת. שיטה זו של הארקה מעטפת הכלוב אינה יעילה. מסנני הבד ומעטפות הכלוב שלהם צריכים להיות מתוכננים כך שחיבור ההארקה יישאר מחובר תמיד במהלך תחזוקה גם בהעדר המסנן עצמו.

שיטות ואביזרים להארקה וגישור

המונח הארקה מתייחס לחיבור גלווני (מוליך) של אדם או מיתקן לאדמה, 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. אחת משיטות ההארקה היא ע"י שימוש בצמיד הארקה אישי: את הצמיד מחברים לפרק היד החשוף של העובד. יש להקפיד על הידוק הצמיד ומניעת חציצה בינו לבין העור. את הקצה השני של הצמיד צריך לחבר לנקודת הארקה תקנית בעמדת העבודה. ההתנגדות הרצויה של הצמיד צריכה להיות $10\% \pm 1$ מיליון אוהם.

● **לבוש תקני:** פריטי הלבוש צריכים להתאים לדרישות התקן הישראלי ת"י 11149 חלק 5 "ביגוד מגן - תכונות אלקטרוסטטיות: דרישות לביצועי החומר ולתכן".
נעליים עם תכונות התנגדות. ההתנגדות הנעליים צריכה להיות בין 50 אלף אוהם ל-100 מיליון אוהם.

● **חיפוי מגן לשולחנות עבודה:** לצורך עבודה עם חומרים מסוכנים על גבי שולחנות עבודה, יש לצפות את השולחן בחיפוי פלסטי או גומי מפזר מיטענים, בעל התנגדות חשמלית בתחום של 1-100 מיליון אוהם, ומחובר להארקה.

● **חיפוי מגן לרצפה:** ההתנגדות הרצויה של חיפוי המגן לרצפה צריכה להיות בין 100,000 אוהם ל-100 מיליון אוהם. המדידה צריכה להתבצע לפי הנחיות תקן, בין נקודת הארקה ראשית (הארקה היסוד) לבין אלקטרודה מיוחדת המונחת בנקודות שונות על חיפוי הרצפה.

● **צפוי רצפה בצבע אפוקסי מפזר מיטענים:** היישום נעשה באמצעות צבע אפוקסי מפזר מיטענים, מוארק. צבע אפוקסי מפזר מיטענים, מיושם ישירות

על גבי מישטח בטון נקי בעל התנגדות חשמלית קטנה מ-100,000 אוהם כלפי הארקה היסוד, ואין כל צורך להוסיף מקשרי הארקה.

● **ריצוף מוליך:** רצפה עם חיפוי מתכת, רצפת בטון חשוף ואריחי בטון ומוזאיקה, מהווים ריצוף מוליך חשמל סטטי, כלומר התנגדות שטח הרצפה קטנה מ-105 אוהם. פיזור מיטענים אפשרי באמצעות חיפוי מסוג PVC בעל תכונות אנטיסטטיות או באמצעות צבע אפוקסי יצוק מפזר מיטענים העומד בדרישות התקן. ■

מקורות:

1. U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, investigation Report NO. 2006-H-1: Combustible dust hazard study, November 2006.
2. Dust Explosion Scenarios and Case Histories in the CCPS Guidelines for Safe Handling of Powders and Bulk Solids; R. Zalosh, S. Grosse; Submitted for Presentation at the 39th AIChE Loss Prevention Symposium Session on Dust Explosions, Atlanta, April 2005
3. EN1127-1: 1997, Explosive atmospheres - Explosion prevention and protection Part 1. Basic concepts and methodology
4. Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2005. Guidelines for Safe handling of Powders and Bulk Solids, AIChE/CCPS, New York, NY, 2005.
5. The US Chemical Safety Board (CSB), 2004, Investigation Report, Dust Explosion, West Pharmaceutical Services, Inc., U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), September 2004.
6. CSB, 2005. Investigation Report. Combustible Dust Fire and Explosions, CTA Acoustics, Inc., February 2005.
7. CSB, 2005. Investigation Report. Aluminum Dust Explosion, Hayes Lemmerz International-Huntington, Inc., September 2005.
8. תקן ישראלי: ת"י 60079 חלק 32 - "אטמוספרות נפיצות: סיכויי חשמל סטטי".
9. CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) technical report CLC/TR 50404:2003 (June 2003 version E):
10. Electrostatics - Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity.
11. NFPA 77: Recommended Practice on Static Electricity (2000 Edition).