

יום עיון בנושא חקר הכשל

סדר יום:

08:30-09:00 התכנסות וכיבוד קל

09:00-09:20 דברי פתיחה - אינג' יצחק רז- יו"ר לשכת המהנדסים

וד"ר אלברטו קאופמן – ראש ענף חקר הכשל

מושב ראשון: יו"ר – ד"ר אלברטו קאופמן

09:20-09:40 כשל טבעת קפיצית או האם לחקור את כל הפריטים - **מר יוגב עמרן**, התעשייה האווירית

09:40-10:00 "BLACK PAD" PHENOMENON IN MICROELECTRONICS, **ד"ר אולגה בוטשטיין**, מכון המתכות מוסד הטכניון
למו"פ

10:00-10:20 כשל בקצב העמסה גבוה, **מר פיטר גלצר**, מעבדות איקא (2006)

10:20-10:40 תפיסות, גישות ומתודולוגיה בחקר כשל בכלל ובחיל האוויר בפרט - **סא"ל עופר לוי**, חיל האוויר

10:40-11:00 הפסקת קפה

מושב שני: יו"ר – סא"ל עופר לוי

11:00-11:20 חקירת כישלון מנוע רקטי במנגנון ייחודי - **מר איתי נוסבאום**, חיל האוויר

11:20-11:40 איך להצליח ב FAILURE ANALYSIS ולהיכשל ב ROOT CAUSE ANALYSIS - **מר מנחם חורב**, יועץ ומדריך

11:40-12:00 איתור סיבות לכשלים, בעזרת כריית נתונים – **גב' אדית אורי**, מייסדת מיזם דטהלרט

12:00-12:20 שחזור ספקטרום טיסה בעזרת אפיון פרקטוגרפי - **מר אליעז שמואל**, חיל האוויר

12:20-13:10 ארוחת צהרים קלה

מושב שלישי: יו"ר – ד"ר אולגה בוטשטיין

13:10-13:30 - COUNTERFIT CASE STUDY & PREVENTION METHODOLOGY IN NON ELECTRONIC PARTS

מר אולג בוטשטיין ו**גב' אורית הראל**, אלביט מערכות

13:30-13:50 חקירת כשלים בעקבות טיפולים תרמיים - **ד"ר עוז גולן**, מכללת אפקה

13:50-14:10 השפעת טמפרטורה על כישלון רכיבים אל-מתכתיים - **מר רום כפרי**, חיל האוויר

14:10-15:00 דיון וסיכום

מושב ראשון – יו"ר : ד"ר אלברטו קאופמן

כשל טבעת קפיצית או האם לחקור את כל הפריטים שנכשלו

מר יוגב עמרן - התעשייה האווירית

לעיתים מספר פריטים זהים נכשלים באותו אירוע ועולה ההתלבטות האם בכדי למצוא את גורם הכשל נדרש לחקור את כל הפריטים או להסתפק בחקירת אחד הפריטים בלבד. אחת ההשלכות של חקירת כל הפריטים שנכשלו היא העלות הכלכלית הגדולה ללקוח מזמין החקירה והזמן הדרוש לחקירה שלעיתים הינו קריטי. מצד שני, ניתן לחשוף את כל סיבות השורש, אם קיימות יותר מאחת, ולהימנע מכשלים נוספים בעתיד, דבר ששכרו בצידו. באמצעות מקרה כשל חוזר של טבעת קפיצית נדגים את חשיבות חקירת כל הפריטים שנכשלו ונציע דרך פעולה אפשרית למקרים מעין אלו.

"BLACK PAD" PHENOMENON IN MICROELECTRONICS.

Dr. Olga Botstein- Israel Institute of Metals, Technion Research & Development Foundation

The plating system of electroless nickel with immersion gold (ENIG) has been widely used to finish solder pads of printed circuits boards (PCBs). It wets well by solder, provides a flat and uniform surface and shows usually high adhesion strength. The most attractive advantage of ENIG over electrolytic Ni/Au plating is that it can be applied to fine pitch substances without electric connection to each pad.

While the amorphous plating of Ni-P provides a highly corrosion resistant and solderable surface, uses as a diffusion barrier, has excellent conductivity and coating ability on non-conductive substances, a protective overcoat of thin gold is used to prevent the nickel surface from passivation. The immersion gold process provides a direct replacement of Ni surface by Au atom (galvanic displacement).

The predominant failure mode in ENIG solder joints as reported in the literature and our accumulated experience in failure analysis is a condition called "black pad" and is described as a dark gray pad appearance after detachment of the components, when the separation occurs at the IMC (Intermetallic Compound)/ solder interface. The detachment often occurs under thermal cycling conditions or just after reflow. Brittle interfacial failure is "unpredictable" and catastrophic.

An attempt to understand this phenomenon accompanied by case histories and the way of failure prediction based on our failure analysis experience will be presented and discussed

כשל בקצב העמסה גבוה

מר פיטר גלצר, מעבדות איקא (2006)

אחת התופעות שיותר קשה לעקוב אחריה היא העיבור בקצב גבוה. קצב העיבור הכי גבוה הוא בפיצוץ. תפקידן של מערכות פירו-טכניות הוא לעמוד בקצבי עיבור גבוהים בזמן פיצוץ. על מנת לתכנן מערכת שכזו, יש לבחור בקפידה חומר שתכונותיו המכאניות מתאימות לעמידה בתנאים מיוחדים. בחקר זה נבחן מערכת פירו-טכנית שמיועדת לפעולה חד פעמית. המערכת כשלה בעת הניסוי ולא צלחה בביצוע הפעולה היחידה שמוטלת עליה. החומר שנבחר עבור המערכת הוא פלדת 17-4PH. תכונות פלדה זו מושפעות ישירות מתנאי הטיפול התרמי שהיא עוברת. נבחן כיצד מצב תרמי של הפלדה משפיע בצורה דרסטית על עמידותה בתנאי העבודה במערכת הפירו-טכנית. נדון בתופעות המטלורגיות המשפיעות על הפלדה במצבים התרמיים השונים ובאלו בדיקות ניתן להצביע על תופעות אלו. נראה גם כיצד משתנה התקינה הבינלאומית לאור ההבנות המיוחסות לנושאים שנדבר עליהם.

תפיסות, גישות ומתודולוגיות בחקר כשל בכלל ובחיל האוויר בפרט

סא"ל עופר לוי – חיל האוויר

למושג חקר כשל הגדרות רבות, גם למושג כשל הגדרות רבות והן, בעיקר, בעיני המתבונן. כמותן, גם תפיסות וגישות מגוונות לאופן ביצוע תהליך חקר כשל. במרוצת השנים ומתוך מגוון רחב מאוד של חקירות כשלים ותאונות, נתקלתי באופנים שונים של תהליכי חקר כשל. בין אם בחיל האוויר או בתעשיות הביטחוניות בישראל ובין אם על ידי חברות התעופה הגדולות בעולם דוגמת GE, BOEING ואחרות. חלקן אמצו את ההגדרה והגישה המסורתית המטלורגית ואחרות אמצו את הגישה ההנדסית או הניהולית. לכל אחת מהן יתרונות וחסרונות. חלק מהתעשיות מקיימות את היכולת באופן מזדמן על בסיס התרחשות אירוע או כשל, חלקן מקיימות את היכולת באופן שוטף כחלק ממערך אבטחת האיכות. חלקן מקיימות את היכולת מתוך הרצון להבין לעומק את סיבות השורש וחלקן מתוך כוונה להביא לתיקון רכיב או מערכת ספציפית. לחיל האוויר מאפיינים ייחודיים מתוכם הוא מקיים את יכולת חקר הכשל. ההרצאה תידון בגישות ובתפיסות השונות ותציג את מאפיינים הייחודיים של קיום היכולת בחיל האוויר והאופן בו היא באה לידי ביטוי.

מושב שני – יו"ר : סא"ל עופר לוי

חקירת כשלון מנוע רקטי במנגנון ייחודי

מר איתי נוסבאום – חיל האוויר

מתודולוגית העבודה ואופן הפעולה במהלך ביצוע חקר כשל למערכות ולרכיבים שכשלו הינם תהליך סדור וקריטי ע"מ לפצח את תעלומת הכשלון.

בהרצאה זו, יוצג כדוגמא תהליך חקירה לחקירה בעלת נופך מחקרי עמוק בעולמות תוכן משלימים בעולם חקר הכשל. החקירה עוסקת במיכל לחץ של מנוע רקטי שהתפוצץ במהלך ניסוי. הפיצוץ, המבנה הייחודי, וחומרי הגלם היוו אתגר במציאת מנגנון וגורם הכשל ע"מ לפתור את האתגרים נדרשו פעולות חקירה רבות וביניהן:

- סקר ספרות
- ניסויים מכניים
- מחקר פרקטוגרפי
- פיתוח יכולת מדידת מאמצים שיוריים
- בחינה מטלורגית מפורטת
- התעמקות בתהליך הייצור ובמבנה הכדוד
- אנליזות הרכב מדוייקות
- ניסויי השפעת סביבה

לאחר מחקר מעמיק זה, התגלתה תופעה מטלורגית נדירה הבאה לידי ביטוי במאפייני כשל לא סטנדרטים. בהתאם למנגנון ולגורם הכשל, נגזרו פעולות מנע לתהליכים המבוצעים למיכל הלחץ ונמנע אירוע הכשל הבא.

איך להצליח ב FAILURE ANALYSIS ולהכשל ב ROOT CAUSE ANALYSIS – סיפור אירוע

מר מנחם חורב – יועץ ומדריך

חקר הכשל (Failure Analysis) בהגדרתו הצרה משרת את התחום הרחב יותר של איתור גורמי שורש (Root Cause Analysis) לצורך פתרון ו/או מניעת בעיות במוצרים, בתהליכים ובמערכות הנדסיות מורכבות. בחקר הכשל (FA) אנו בוחנים את הרכיב או המרכיב נושא הסימפטום ובאמצעות כלים מתאימים ומנסים ללמוד את מנגנון הכשל (Failure Mechanism). בעזרת ההבנה של מנגנון הכשל הפיזי ונתונים זמינים נוספים אנו מנסים לתאר מודל כולל המסביר את התנאים שהתקיימו או נוצרו, את השפעתם של תנאים אלו על מרכיבי המערכת ועל שינוי בתכונותיהם הרצויות, ומכאן להבנה המתאימה של הופעת הסימפטום המובחן. ברור מאליו שאנליזת חקר כשל (FA) שגויה עלולה להוביל למסלול מוטעה של חקירה, אך גם אנליזת FA מדויקת עלולה להוביל את תהליך איתור גורמי השורש (RCA) במסלול שגוי. בסיפור האירוע נראה כיצד אנליזת TEM/EDX מדויקת מובילה את צוות איתור גורמי השורש למודל כשל שגוי ולפתרון יקר ומיותר. וכיצד תהליך חשיבתי יצירתי של הצוות מאפשר אנליזת TEM/EDX חוזרת המאשרת מודל כשל אחר ופתרון ללא עלות כלל.

איתור סיבות לכשלים, בעזרת כריית נתונים

גב' אדית אורי – מייסדת מיזם דטהלרט

קשה יותר להשיג שליטה בייצור היום, בגלל גודל המערכות המשולבות, השינויים, המורכבות שלהן, והאחריות שנמצאת לעיתים מחוץ לארגון. אמנם כשלים שפעם נחשבו קשים ניתנים היום לגילוי בלחיצת כפתור (לדוגמא, פגמים באספקה), אך במקומם באו חדשים ורבים. כשל זה יותר מתקלה, זה בעיה שלא נפתרת במנגנונים הקיימים, זה חריג אם כן. לכן כדי לתקנו צריך לשנות או להוסיף משהו למערכת. מכאן הקושי להגדיר ולטפל בכשל. איך אם כן, ניתן בכל זאת לאתר באופן סטטטי כשלים ולמצוא להם פתרונות? התשובה לכך נמצאת בכריית נתונים, מהסוג שיודע לאתר דפוסי התנהגות סטטיים בנתונים חופשיים (לא מפקחים), כדוגמת GT data mining*. בניתוח כשלים יש מספר אתגרים. ראשית כל השאלה, האם לפנינו כשל. שנית, מה סיבת השורש שלו? ושלישית, איך לחלץ מתוך סבך הנתונים רמזים לגבי הפתרון? שלושת האתגרים הם למעשה שלושה צדדים של תשובה אחת, איתור דפוסי ההתנהגות הטיפוסיים של הכשל. הדפוסיים מובילים בדרך השוואה לגילוי אותם מאפיינים משותפים, מספיק גם אחד, שהם קצה החוט. והרמזים לפתרון, אלה מצויים בתוך הגדרת מאפייני הדפוסיים... זה הכל לוגיקה. אם דרושים תנאים מסוימים ליצירתו של כשל, אפשר לומר שסילוק אפילו של מקצת התנאים ישלול את אפשרות הכשל.

שחזור ספקטרום טיסה בעזרת אפיון פרקטוגרפי

מר אליעז שמואל – חיל האוויר

קיימת חשיבות רבה לידיעת הגורמים ומנגנוני הכשל של מבנים תחת עומס מחזורי. למציאת סיבת הכשל המדויקת מתוך פריט שבור נדרש למצוא את היסטוריית העמיסה. היסטוריה זו נמדדת, עד היום, ע"י מציאת קמטי התעייפות והמרחקים ביניהם על ידי אנשי מקצוע, באופן ידני. האתגר הינו מציאה אוטומטית של מאפייני משטח שבר קורלטיביים להתפתחות הסדק בזמן. בהרצאה זו תוצג ההתמודדות של מעבדת חקר כשלונות של חיל האוויר עם מקרה של תאונה, החל ממיון מידע מערמת השברים הפזורה באתר התאונה, דרך הבנת סדר התרחשות הכשלון ועד לבירור מלא של מספר שעות הטיסה שחוזה הפריט שכשל ראשון, מתוך משטח השבר. כל זאת יודגם עבור מקרה אמיתי משנת 2013. חישוב מספר שעות הטיסה של פריטים שכשלו בהתעייפות נעשה על ידי מומחים במעבדות בעולם. התהליך דורש רמת ידע ומיומנות גבוהים והתוצאה עלולה להיות שונה עבור כל שני מודדים. בחיל האוויר מתבצעת עבודה להערכה אוטומטית של שעות הטיסה לכשל ומתוך כך של הסטוריית העמיסה של הפריט. השיטה מתבססת על אלמנטי ניתוח תמונה מתקדמים המופעלים על תמונות SEM של משטח השבר. לשיטה מספר שלבים: זיהוי של האלמנטים הנספרים ובידודם מהרעש המקיף אותם, בחירת קבוצת האלמנטים הנכונה ביותר להמשך חישוב וביצוע החישוב הכמותי. לשיטה האוטומטית יתרונות של הדירות ומהירות על המתפעל הידני עם זאת תחום החיזוי בו ניתן להפעילה קטן מזה של העין האנושית. חקירת התאונה כמו גם הידע הכמותי שחושב נדרשים כדי לעדכן את מדיניות האחזקה של הפריט במטרה למנוע את הכשלון הבא.

מושב שלישי – יו"ר : ד"ר אולגה בוטשטיין

COUNTERFIT CASE STUDY & PREVENTION METHODOLOGY IN NON ELECTRONIC PARTS

מר אולג ניגרציק וגב' אורית הראל, אלביט מערכות

תופעת פריטים מזויפים משתייכת לא רק לתחום רכיבים אלקטרוניים עם דגש על רכיבי ה-Obsolete אלא שמזמן פולשת לעולמות תוכן נוספים כגון קשיחים, סוללות, חומרי גלם, כימיקלים וכ' כתוצאה מזו במוצרים שמשלבים בתוכם את הפריטים הללו עתידים להתפתח כשלים חמורים מאוד. לחלק מן התעשיות כגון Military/Homeland security, Aerospace, Automotive, Medical אסור שזה יקרה בכלל או כמו שאומרים – "...where failure is not an option..." לכן "הגנה רב שכבתית" נדרשת בכל ארגון שמתכוון להתמודד בפועל עם התופעה הנ"ל תוך התבססות על תקינה בינלאומית בתחום זה. במהלך הרצאתנו נציג כמה וכמה Case Study אופייניים ונציע תזרים בדיקות גנריות על מנת למנוע חדירת פריטים מזויפים לרצפת יצור בכל מפעל.

חקירת כשלים בעקבות טיפולים תרמיים

ד"ר עוז גולן, המרכז להנדסת חומרים ותהליכים, אפקה-המכללה האקדמית להנדסה בתל-אביב

טיפולים תרמיים הינם חלק בלתי נפרד מתהליכי ייצור המקנים למתכות את התכונות המכאניות הרצויות. יחד עם זאת, עלולים הטיפולים להכניס לחומר פגמים שמקורם נובע מאחת מארבע הסיבות הבאות: (א) בחירת טיפול שאינו מתאים לחומר, (ב) מביצוע תהליך ייצור שגוי, (ג) מהשוני בין התכונה הרצויה לתכונה המצויה, (ד) מעצם המסלול התרמי ואופיו הפיזיקאלי. מחקירת כשלים שביצענו בשנתיים האחרונות נראה שחסר ידע הנדסי, ו/או מתודיקה ולעיתים שיטות בדיקה במהלך התהליך בכדי לגלות או לאמוד את אותם פגמים. הפגמים יכולים להיות ברמת המאקרו או ברמת המיקרו ולגרום לכשל מכאני תוצאתי בעת השירות. במהלך ההרצאה נציג מספר דוגמאות לכשלים שמקורם בטיפולים תרמיים של פלדות ואלומיניום, למהלכי חקירת-הכשלים ולהמלצות כיצד לפתור ולהימנע מהישנות המקרים.

השפעת טמפ' על כישלון רכיבים אל-מתכתיים

מר רום כפרי - חיל האוויר

עולם החומרים המרוכבים מקבל יותר ויותר נפח בעולם בכלל ובחיל האוויר בפרט – אם מדובר בשדרוג מערכות קיימות ואם בפלטפורמות חדשות ועתידיות. ההתקדמות המתמדת לעולם זה גוררת עמה את הצורך בהבנה עמוקה של כשלים של רכיבים אל מתכתיים ומרוכבים.

גף חקירת כשלונות תעופתיים של חיל האוויר מהווה מוקד ידע צה"לי והינו בעל יכולות לביצוע מחקר מעמיק כפי שיוצג בתהליך חקירת כשלון צינור מערכת קירור ממנוע של כטב"ם מסוג שובל.

אירוע הכשל ארע במהלך טיסה בגובה 10,000 רגל. מפעיל השובל הבחין כי טמפרטורת נוזל קירור המנוע עלתה בצורה מסוכנת וכי במקביל גם טמפרטורות ראשי הצילנדרים החלו לעלות. המפעיל הנחית את המטוס בשלום ובבחינה של המנוע על הקרקע הובחן כי צינור אספקת נוזל הקירור למנוע קרוע.

בעבר ארעו אירועים דומים אשר גררו תהליך של שינוי תכן הצינורות – שינוי אשר לא מנע את התרחשות האירוע הנוכחי. כמו כן, אירוע נוסף של כשל צינור קירור מהסוג החדש ארע אצל מתפעל זר.

מהלך החקירה כלל:

תיעוד ופירוק המנוע בתעשייה.

בחינה חזותית ומאקרוסקופית של הצינור שכשל, צינורות תקינים - משומשים וחדשים והצינור מהמתפעל הזר שכשל באותו אופן.

ניסויי זיקון בסביבות ובטמפרטורות שונות, ניסויי מתיחה השוואתית, ניסוימדידת טמפרטורת סביבת המנוע.

מספר רב של אנליזות כימיות לחומרי הגלם ולחומרים הקיימים במערכת (שמן מנוע ונוזל קירור).

בחינה של תוכנת התחקירן, בחינה של מנועים נוספים בתעשייה ושל מטוסים נוספים בטייסת.

עיבוד של כלל הממצאים הפרקטוגרפיים, האנליטיים והניסויים הביאו לקביעת גורם השורש לאירוע הנוכחי ובדיעבד לאירועי העבר. ההבנה המלאה של האירוע אפשרה קביעת דרכי פעולה למניעת האירוע הבא.