

תופעת קורוזיה גופרתית בשנאים – ממצאים חדשים

ולדימיר נטס, ד"ר אנטולי שקולניק, מריוס גריסרו
חברת חשמל לישראל

1 מבוא

בשנים האחרונות התרחשו ברחבי העולם מקרים רבים של תקלות בשנאי הספק מקוררי שמן (non free breathing) שהתאפיינו במספר תופעות דומות:

- היעדר סימנים חשודים בטרם התרחשות התקלה
- הנזק שנגרם ברובו נזק בלתי הפיך לשנאי.

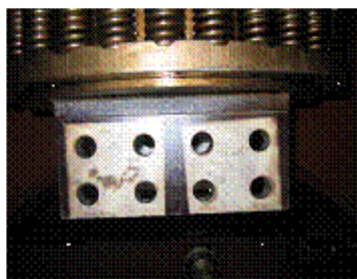
בניתוח לאחר התקלה (post mortem) התגלה שחלקי נחושת חשופים הותקפו ע"י תרכובות גופרתית קורוזיבית מתוך השמן. בחברות המובילות בעולם ובמעבדות המתמחות בתחום בדיקות שמן שנאים, נעשו מחקרים בניסיון לאתר גורמים והסיבות להתפתחות תופעת קורוזיה גופרתית. כמו כן, ישנם עבודות מחקר במתרה לפתח כלים לאיתור מוקדם של תופעת קורוזיה גופרתית.

מאמר זה מתייחס למקרה ייחודי בו התפתחות תופעת קורוזיה גופרתית אותרה בשלבים מוקדמים וכתוצאה מכך, בוצע חקר שמאפשר לקבל מידע נוסף על מנגנון קורוזיה גופרתית. פענוח של מנגנון מאפשר לפתח כלים לזיהוי, מעקב וטיפול בשנאים שנפגעו.

2 אמצעי איתור של תופעת קורוזיה גופרתית וממצאים אופניים

ברוב המקרים תופעת קורוזיה גופרתית בשלבים התחלתיים מתרחבת ללא סימנים משניים כגון:

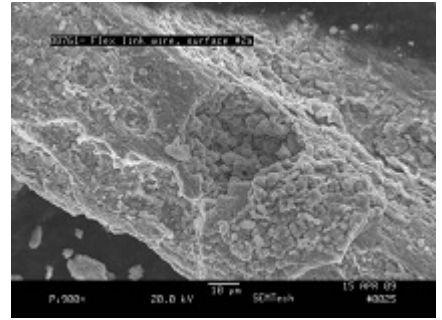
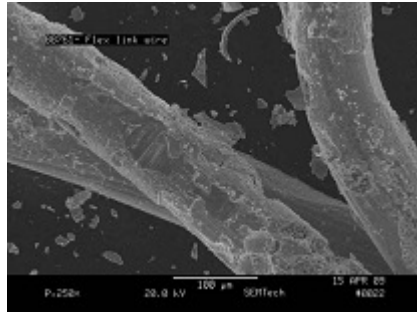
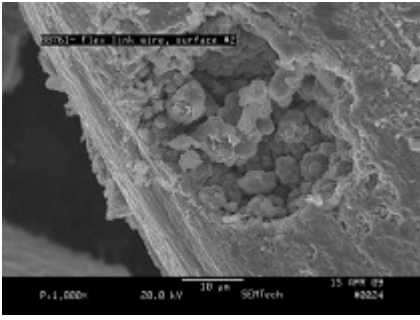
- שינויים בטיב השמן
 - התפתחות גזים מומסים בשמן
 - שינויים בפרמטרים חשמליים של השנאי.
- במסגרת ביצוע פעולות תחזוקה מתוכננות, נמדד ערך בידוד ירוד משמעותי. כל הבדיקות חשמליות רגילות, בדיקות שמן ובדיקות גזים לא הצביעו על בעיה כלשהיא בשנאי. לאחר פתיחת השנאי התגלתה פגיעה נרחבת במכלול החיבורים מצד מתח נמוך.



תמונה מס' 1: מכלול חיבורים מצד מתח נמוך

ברגים, דסקיות ואומים במכלול החיבורים צופו בחומר שחור. בבדיקה במיקרוסקופ אלקטרוני התגלה שבנוסף למתכות מהם עשוי מכלול החיבורים נמצאו הרכבים שונים של תרכובות נחושת וגופרית.

עיקר הפגיעה זוהתה בחיבורים גמישים שעשויים מחוטי נחושת בקוטר 0.2 מ"מ. ניתן לזהות שהחלקים של חיבורים גמישים שלא היו במגע ישיר עם השמן לא נפגעו. בבדיקה במיקרוסקופ אלקטרוני ניתן לראות שסיבי הנחושת שמהם מורכבים הגמישים, הותקפו בצורה נרחבת אופיינית לפגיעה קורוזיבית (ראה 3).



תמונה מס' 2 : פגיעה קורוזיבית בסיבי נחושת של חבורים גמישים במיקרוסקופ אלקטרוני התגלו סימני פגיעה בנייר בידוד של מכלול החיבורים מתח נמוך ע"י החומרים שמכילים תרכובת של נחושת וגופרית (ראה 4).



תמונה מס' 3 : משקעי תרכובת נחושת גופרתית באזורים שונים בוצע בדיקה ויזואלית והתגלו פגיעות בחלקי נחושת חשופים באזורים שונים של השנאי: קצוות כבלים של מחליף דרגות, קצוות גידי נחושת חשופים של חיבורים מצד מתח נמוך, פסי נחושת חשופים באזור מכלול החיבורים. כל חלקי הנחושת שהיו מצופים בלקה לא הותקפו ע"י קורוזיה.



תמונה מס' 4 : נייר בידוד של חבורי מתח נמוך על פני השטח של קרטון בידוד סביב סלילי השנאי התגלו כתמים בצבע חום בעיקר באזורים בעלי צפיפות שדה חשמלי: בין פאזות שונות, מתחת ליציאה של מחליף דרגות באזור כניסה לסליל ויסות (ראה 5).



כתם פגיעה בקרטון באזור יציאות למחליף דרגות



כתם בקרטון בין עמודי פאזות



צלעות חיזוק/קירור



כתם פגיעה בקרטון באזור צלעות חיזוק/קירור



חלק אקטיבי של השנאי



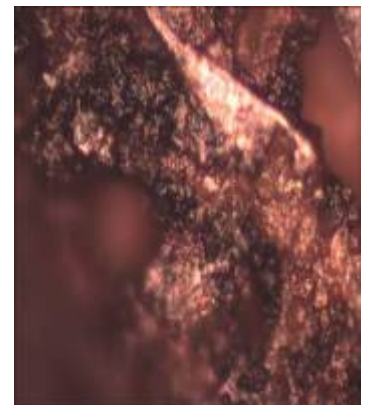
כתם פגיעה בקרטון באזור צלעות חיזוק/קירור



כתם פגיעה בקרטון



כתם פגיעה בקרטון



כתם בהגדלה

תמונה מס' 5 : ריכוזי תרכובות נחשת גופרתית באזורים שונים

הסימנים הללו הינם תוצאה של פיזור תרכובות נחשת גופרתית. החומר הנ"ל הינו חצי מוליך , לכן בכל מקום בו הוא מתיישב נוצר שינוי צפיפות שדה וכתוצאה מכך, עלולים להופיע התפרקויות חלקיות. נלקחו דגימות ונעשו בדיקות של הרכב הכתמים. בכל הכתמים נמצאה כמות של נחשת גופרתית ביחס אטומי זהה. הבדיקות נעשו בהשוואה לאזורים שונים של קרטון ללא כתמים.

3 תנאי להתפתחות תהליך קורוזיבי ומנגנון פיזור של תרכובות נחשת

על סמך ניסיון והידע שנצבר במהלך חקר של התפשטות קורוזיה גופרתית בשנאים, ניתן להשיג מסקנה שהתפתחות התהליך מותנה בקיום התנאים הבאים:

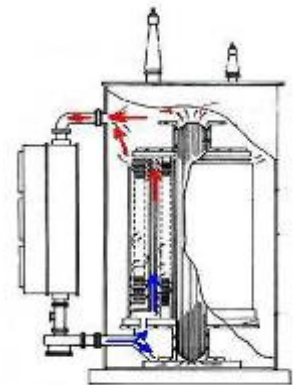
- שמן בעל פוטנציאל קורוזיבי
 - התחממות מקומית או כללית של השנאי מסיבות שונות: ליקויי תכנון, משטרי עבודה, תקלות שונות
 - כל סוגי של נחושת חשופה
- התפתחות התהליך מתלווה בהיווצרות של תרכובות נחושת גופרתית והתפזרותה בחלל השנאי. פיזור של תרכובת נחושת גופרתית מושפע משני גורמים העיקריים:
- זרימות שמן בתוך חלל השנאי
 - ריכוזים שונים של צפיפות שדה חשמלי.

3.1 מערכות קירור של השנאי כגורם להתפתחות ופיזור תרכובות נחושת גופרתית

בשנאי הספק גדולים נפוצה שיטת קירור OFAF (שמן מאולץ, אוויר מאולץ). כיוצא פועל מכך, קיימת זרימת שמן מתמדת. במשטרי הפעלה קיצונים כאשר עומס וטמפרטורות של שנאי עולים,

נכנסות לעבודה מערכות קירור נוספות שמגבירות את מחזורי החלפת שמן. כיוצא פועל מכך, נוצר מצב שבשנאי הספק גדולים בהם התחיל להתפתח תהליך של קורוזיה גופרתית, קיימת סבירות גדולה יותר לפיזור של תרכובות נחושת גופרתית והגעתה לאזורים בעלי סיכון גבוהה: סלילי השנאי, מחליף דרגות, מבדדים.

נקודות היניקה של השמן קרובות לאזורים חמים יותר של השנאי, כאשר דווקא באזורים אלה הסבירות להתפתחות קורוזיה גופרתית גבוהה יותר. מצב זה גורם לכך שזרימת שמן מוגברת באזורים חמים, יונקת ומפזרת גם את חלקיקי תרכובת נחושת גופרתית.



תמונה מס' 6: שיטת קירור כגורם לפיזור חלקיקי תרכובת של נחושת גופרתית

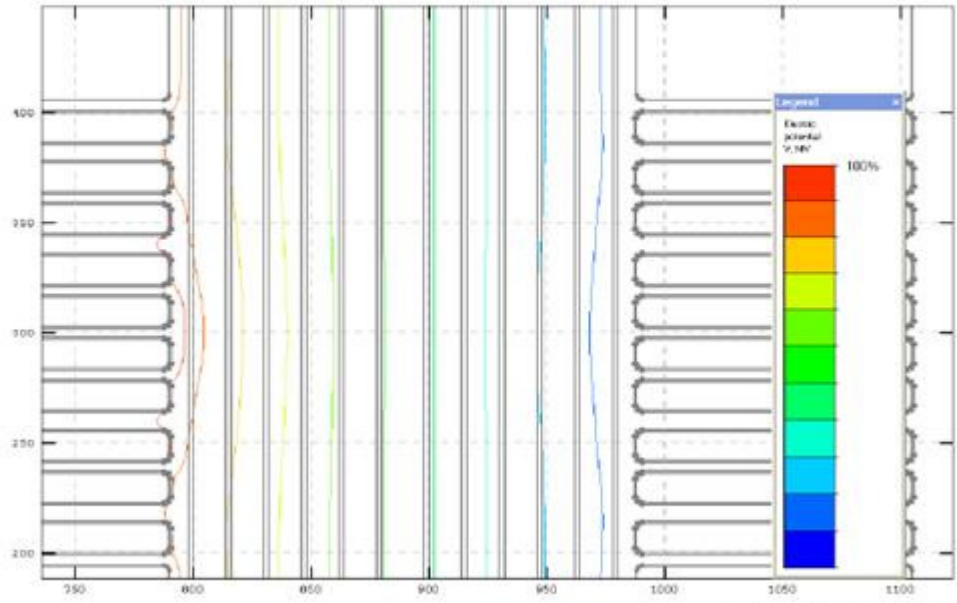
3.2 צפיפות שדה חשמלי כגורם לריכוז תרכובות נחושת גופרתית

במהלך התחקיר התגלתה מגמה ברורה שקיים קשר בין ריכוזי תרכובות נחושת גופרתית וצפיפות שדה חשמלי באזורים שונים של השנאי.

העובדה הזו, מהווה חידוש בפענוח מנגנון הכשל.

באזורים עם צפיפות שדה גבוהה יותר (ראה תמונה 2) התגלו כמויות גדולות של תרכובות נחושת גופרתית. כמו כן אפשר להניח שבנקודות בהן קיימות ריכוזים גדולים של תרכובות נחושת גופרתית מתפתח תהליך של התפרקות חלקיות (partial discharge). (מאמר 3). ניתן להסיק מסקנה שזה המנגנון שעלול לגרום לפגיעה מהותית בחוזק דיאלקטרי של נייר בידוד ובסופו של דבר לגורם להתפתחות של פריצות בידוד.

Electrical Field between phases



תמונה מס' 7 : מודל צפיפות השדה החשמלי בשנאי

טבלה 1: תוצאות בדיקת הרכב הקרטון הבהיר [wt%]

יסוד	קרטון בהיר	כתם על קרטון בהיר	כתם על קרטון אחרי הפחתה
פחמן	47.9	42.8	0.0
חנקן	4.6	5.0	3.0
חמצן	39.2	30.9	0.0
סיליקון	0.1	0.1	0.6
גפרית	0.5	1.3	7.8
נחושת	7.7	19.9	88.6

טבלה 2: תוצאות בדיקת הרכב הקרטון הכהה [wt%]

יסוד	קרטון כהה	כתם על קרטון כהה	כתם על קרטון אחרי הפחתה
פחמן	53.3	44.8	2.0
חנקן	3.6	4.7	15.1
חמצן	38.9	38.2	2.6
מגנזיום	0.0	0.4	0.0
אלומיניום	0.0	0.4	9.9
סיליקון	0.1	0.3	2.8
גפרית	0.4	0.8	5.1
נחושת	3.7	10.4	62.5

טבלה 3: תוצאות בדיקת הרכב שרידי דבק [wt%]

יסוד	תכולה
פחמן	42.4
חנקן	2.9
חמצן	37.5
סיליקון	0.2
גפרית	3.5
נחושת	13.5

תמונה מס' 8: נתונים של ניתוח מולקולארי של כתמים במיקרוסקופ אלקטרוני

4 הרכב שמן שנאים כגורם להתפתחות קורוזיה

בהתאם למאמרים שהתפרסמו לאחרונה בעולם (בבליוגרפיה 1, 2 ו-4) עד לאחרונה התגלה DBDS כאחד מהגורמים העיקריים להיווצרות קורוזיה גופריתית. נמצא שכל שמן שמכיל את החומר, הינו בעל פוטנציאל קורוזיה גופריתנית. הגורמים לזירוז התהליך הינו:

· עבודת השנאי בטמפרטורה יחסית גבוהות, במהלך מחזור חייו

- היעדר חמצן מומס בשמן;
- גורמים נוספים שעדיין נחקרים.
- DBDS להתאם לתפיסה שהייתה קיימת עד עכשיו נוכחות בשמן היה סיבה מספקת על מנת להגדיר את השנאי כבעל פוטנציאל התפתחות קורוזיה.
- DBDS בתחקיר שנעשה לא נמצא חומר בשמן. בדיקות של פוטנציאל קורוזיה גופרתית בוצעו בהתאם לתקנים ושיטות הבאים:

Oil Fingerprint Profile- SM-IFED with GC/AED

Potentially Corrosive Sulfur (CCD) –IEC 62535

DiBenzyl DiSulfide (DBDS) with GC/MS & AED or ECD-IEC TC 10 WG 37

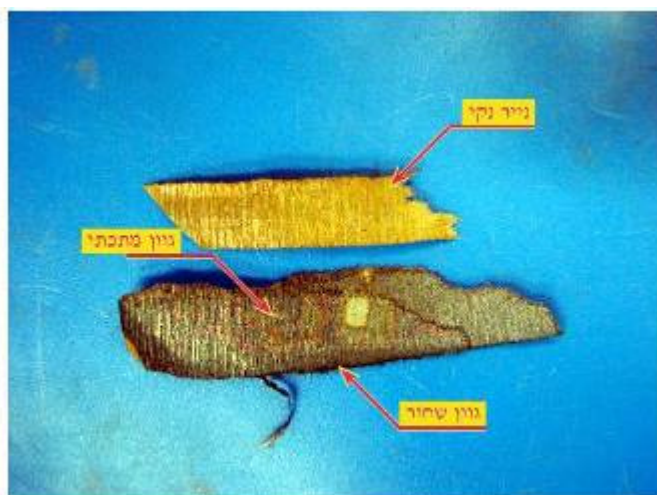
Inhibitor additive content - DBPC-IEC 60666

Dibenzylsulfide (DBS) with GC/MS & AED

Dissolved Metals (Copper, Iron, Zinc, Tin, Silicon, Silver, Alum.) with ICP

Copper Deposition Test (on the CCD paper) with ICP

מבדיקות גזים מומסים בשמן נמדד ריכוז של מימן עד 200 PPM - לא יציב.



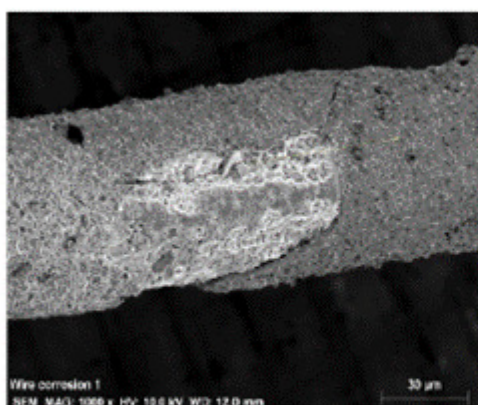
תמונה 1: מראה כללי של דוגמאות נייר השנאים אשר נמסרו לבדיקה. דוגמא אחת נראת נקייה, ודוגמא שנייה מכוסה בציפוי מתכתי.

טבלה 1: תוצאות בדיקות ההרכב של דוגמאות נייר השנאים השונות [wt%]

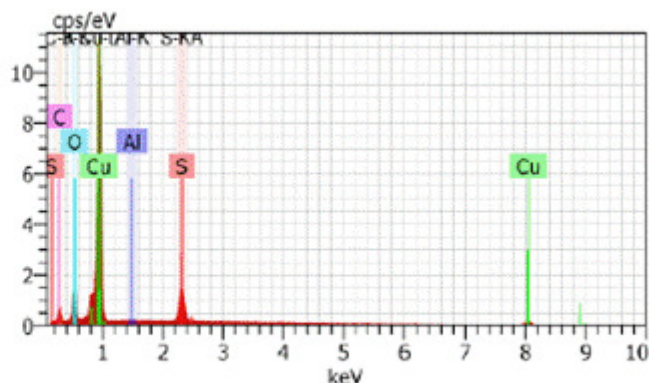
יסוד	נייר נקי	גוון מתכתי	גוון שחור
נחושת	8.2	41.5	70.6
כחמן	39.0	19.1	12.3
גופרית	2.5	5.8	11.7
חמצן	48.7	33.2	5.4
מגנזיום	0.3	0.0	0.0
אלומיניום	0.2	0.2	0.0
סידן	0.3	0.2	0.0
אבץ	0.8	0.0	0.0

תמונה מס' 9 : בדיקות משקעים על נייר בקרבת אזור התפוררות תילי נחושת חשופה

בתמונה 9 וטבלה נראות תוצאות מגנון הסעה של תרכובות נחושת גופרתית על ידי השמן. זרם השמן גורם למשקעים להפוך את הנייר לחצי מוליך.



Wire corrosion 1 Date:16/04/2009 08:45:31 Image size:1024 x 768 Mag:1000.00006x HV:10.0kV

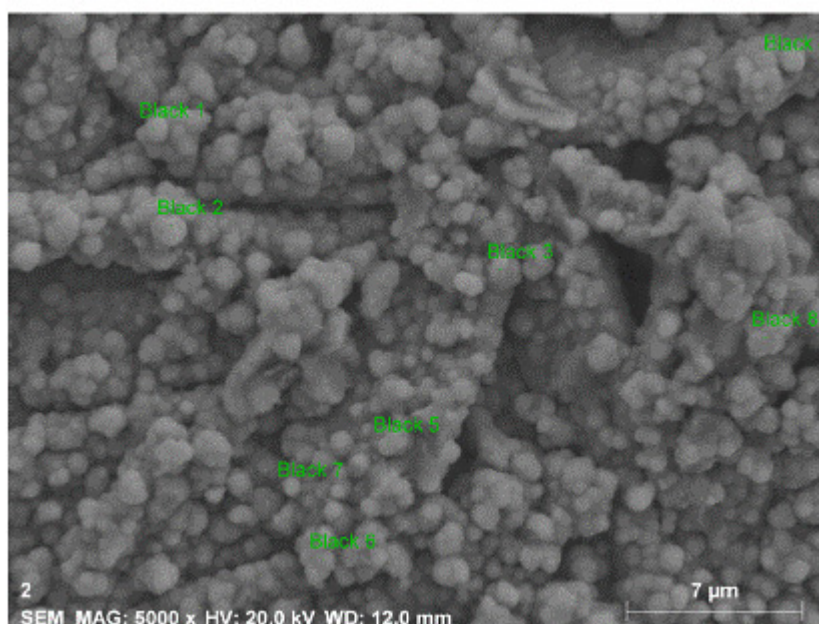


Scan Date:16/04/2009 08:57:49 HV:10.0kV Puls th.:2.31kcps

תמונה 10. תמונה מוגדלת של תיל נחושת חשוף לאחר פגיעתו על ידי הגופרית בשמן וניתוח אטומי של משקעים

s percent (%)

ctrum	O	P	S	K	Ca	Fe	Cu	Zn
Transformer 2 - Black 3	8.10	0.57	9.34	-	0.30	0.94	75.33	5.41
Transformer 2 - Black 2	11.69	0.98	9.63	0.33	0.78	0.96	69.18	6.45
Transformer 2 - Black 1	9.50	0.43	8.86	0.50	0.96	1.18	67.67	10.90
n value:	9.76	0.66	9.28	0.42	0.68	1.03	70.73	7.59
na:	1.81	0.28	0.39	0.12	0.34	0.13	4.06	2.92
na mean:	1.05	0.16	0.23	0.07	0.20	0.08	2.34	1.68



תמונה 11. תמונה מיקרוסקופית של חלק תרכובת גופרתית. הגבשושים הינם תוצר הקורוזיה גופרתית שמכילים גם נחושת.

5 המלצות

טיפול בנזקי קורוזיה גופרתית מתמקד במספר מישורים:

- סילוק נחושת חשופה שהותקפה בקורוזיה,
- ניקוי וציפוי בלכה של חלקי נחושת שאמורים להיחשף לקורוזיה,
- החלפת נייר בידוד שספג תרכובת של נחושת גופרתית,
- שטיפות של החלק האקטיבי ומיכל השנאי,
- IEC 60296 החלפת שמן לשמן ללא פוטנציאל קורוזיה גופרתית על פי גרסא אחרונה של ,
- הכנסת תוספים מעכבי תהליך קורוזיה גופרתית (פסיטורים),
- הגברת תדירות הבדיקות המחזוריות של גזים מומסים בשמן,
- הגברת תדירות בדיקות מחזוריות חשמליות.

כאשר מדובר בכמות גדולה של שנאים יש לבצע מיפוי ולדרג אותם מבחינת פוטנציאל התפתחות קורוזיה גופרתית. בשנאים שהוגדרו כקבוצת סיכון יש לבצע את כל הפעולות למניעת התפשטות קורוזיה.

1. F. Scatiggio, V. Tumiatti, R. Maina, M. Tumiatti, M. Pompili, R. Bartnikas, "Corrosive Sulfur in Insulating Oils: Its Detection and Correlated Power Apparatus Failures", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, 2008, pages 508-509
2. CIGRE Technical report 378: Copper Sulphide in Transformer Insulation, April 2009.
3. C. Bengtsson, M. Dahlund, J. Hajek, L. F. Pettersson, K. Gustafsson, R. Leandersson, A. Hjortsberg, "Oil corrosion and conducting Cu_2S deposition in power Transformer windings", Paper A2-111 presented at CIGRE Session 2006, Paris, France.
4. R.A. Venkata Lakshmi, T.S.R. Murthy / International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 www.ijera.com Vol. 2, Issue 5, September-October 2012, pp.1295-1299.