

# שיפור עמידות פלב"מ בפני קורוזיה ע"י אינהיביטורים



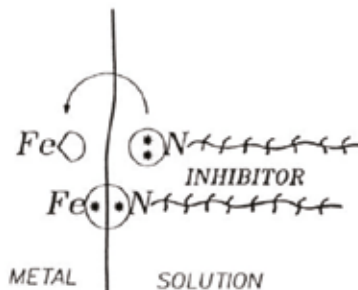
כיצד למנוע קורוזיה בפלב"מ? צורת תעשייתית שצופתה באינהיביטורים (מעכבי חלודה) VpCI 371 של Cortec

איטום, ציפוי, צבעים וכדומה. הכימיה של פעילות מעכבי חלודה נודדים: פלדה יוצרת גבישים בעלי מבנה המשתנה על פי תנאי העיבוד וההרכב הכימי שלה. פני השטח של הפלדה מגיבים עם הסביבה המיידית (ציפוי, צבע, אוויר וכדומה) ליצירת שכבה דקה פסיבית בעובי מינימאלי של אטומים בודדים. מעכבי החלודה הנודדים, נספחים לשכבת הפסיבציה של הפלדה ויוצרים עליה שכבת מגן חד-מולקולארית. הספיחה של מעכב החלודה נוצרת על ידי משיכה יונית חזקה. חוזק קשר הספיחה בין מעכבי החלודה מסוג אמין קרבוקסילאט לבין המתכת עולה על חוזק הקשר עם גורמי החלודה (כלורידים, סולפטים, וכדומה) מעכבי חלודה אלו מפחיתים את קצב החלודה פי 13-5. במשך שנים לאחר היישום, מולקולות מעכב החלודה ממריאות (מתאיידות ממוצק לגז) בסביבת המתכת, ומחדשות את שכבת המגן בכל נקודה מיקרוסקופית בה "נפרצה" ההגנה.

**השפעת אינהיביטורים על פלב"מ**  
בבואנו לדון בהשפעת אינהיביטורים על עמידות פלב"מ בתנאי סביבה קורוזיביים, חשוב להבין ארבעה עקרונות בסיסיים: 1. פלב"מ מחלידה כאשר היא נתונה לתנאים קורוזיביים מעבר

כגון חומצה קרבוקסילית. חומרים נדיפים אלו מכילים רכיבי מגע היוצרים פילם מולקולארי רציף. לחץ האדים של האינהיביטור נמוך מאוד, כלומר, אינהיביטור בסביבת מתכת מפיץ את עצמו במשך שנים. אינהיביטורים מסויימים פעילים למשך 29 שנה ויותר. חומרים נדיפים אלו ינועו בצורת גז מנקודת ההפצה שלהם אל המתכת וייספחו אליה בחוזקה,

תוך יצירת שכבת מגן בעובי מולקולארי. ניתן לשלב אינהיביטורים במים, ממיסים אורגניים, או ממיסים סינטטיים לקבלת הגנה גם בסביבת נוזל. אינהיביטורים על בסיס אמין-קרבוקסילאט מגינים על מגוון מתכות מפני קורוזיה, כולל פלדות, גילון, פליז ואלומיניום. בנוסף, אינהיביטורים יפחיתו משמעותית את רגישות המתכות לקורוזיה מאמצים (STRESS), קורוזיית סדקים (CREVICE) וקורוזיית גימום (PITTING). אינהיביטורים משולבים במגוון פתרונות להגנה על מתכות בבניין ובתעשייה, כגון איבוק, אמיטרים (שקיות הפצה), תוספים למים, תוספים לשמנים, חומרי עטיפה, מילוי,



מעכבי החלודה הנודדים, נספחים לשכבת הפסיבציה של הפלדה ויוצרים עליה שכבת מגן חד-מולקולארית

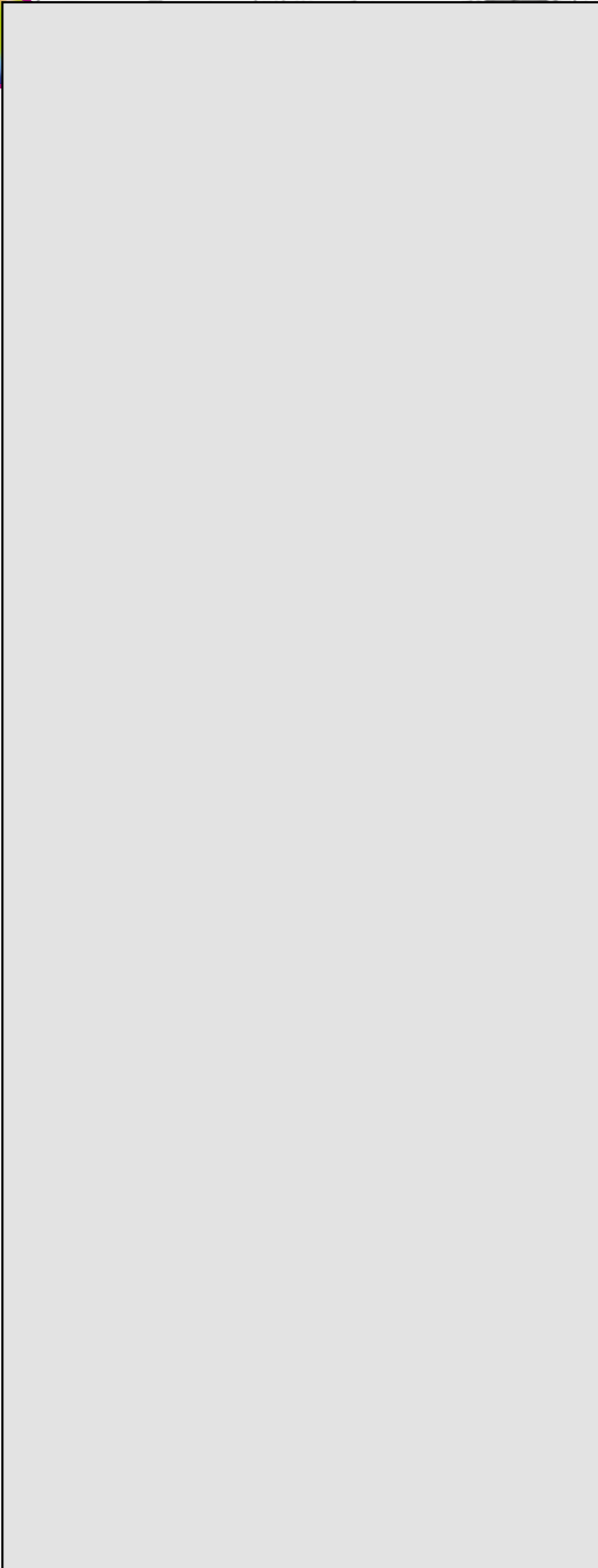
## חגי שושני\*

פלב"מ (נירוסטה) אמורה להיות "פלדה בלתי מחלידה". למרות השם המתגור, פלב"מ סובלת מקורוזיית גימום, מאמצים וסדקים, במיוחד בטמפרטורות גבוהות ובנוכחות חומצות. אינהיביטורים הם מעכבי חלודה יעילים בפלב"מ. בכתבה זו נפרט על תכונותיהם ונביא דוגמאות לשימוש מוצלח באינהיביטורים מישראל ומהעולם.

## לחדש את שכבת המגן המולקולארית על המתכת

אינהיביטורים (מעכבי חלודה נודדים VpCI, MCI) מוכיחים עצמם בשטח כבר מעל שלושים שנה; מעכבי חלודה נודדים נמשכים אל המתכת ונספחים אל פני השטח שלה. ספיחת מעכבי החלודה לשטח המתכת יוצרת עליה שכבת מגן חד-מולקולארית מתחדשת. שכבת המגן נוצרת על פני המתכת כאשר המתכת מכוסה נוזל, גז (אוויר), ציפוי או צבע. בכל משך הפעילות שלהם, מהיישום ועד שנים לאחריו, מולקולות האינהיביטור (מעכב חלודה) מחדשות את שכבת המגן בכל נקודה מיקרוסקופית בה "נפרצה" ההגנה. יתרון משמעותי של אינהיביטורים נודדים הוא יכולתם לנוע בתוך גז נוזל או מוצק פורוזיבי, ולחדש את שכבת המגן מולקולארית על המתכת. כושר תנועה זה מאפשר דיכוי החלודה ללא צורך במגע ישיר עם האזור בו מתפתח פוטנציאל קורוזיבי. מולקולות אינהיביטור נמשכות לאזורים בהם מתפתחת קורוזיה במתכת "כמו מגנט לדלת המקרר" ומפחיתות משמעותית את קצב התפתחות הנזק. אינהיביטורים נודדים (מעכבי קורוזיה) מכילים תערובת של בסיסים נדיפים או של המלחים שלהם הכוללים חומצות חלשות

\*מהנדס, בעלים ומנכ"ל חברת ניצון - ייעוץ לתעשייה



למידה המתוכננת לה.  
 2. פלב"מ אינה מוצר בודד. ישנו מגוון רחב של פלדות "בלתי" מחלדות, בעלות שונות רבה הן בתכונותיהן הפיסיקליות והן בעמידותן הכימית בתנאים קורוזיביים.



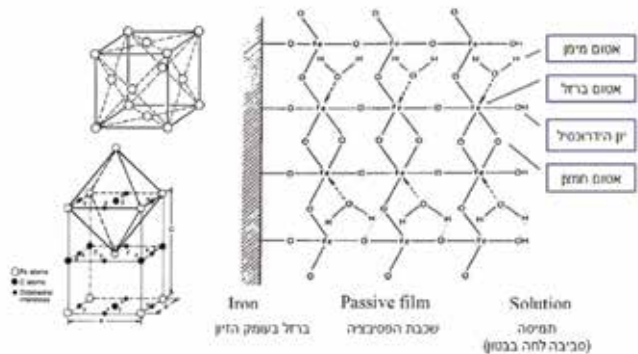
**תוצאות הניסוי: בלוחיות פלב"מ בטבילה חלקית במי ים ללא אינהיביטור התפתחה סדיקת מאמצים בתוך 21 יום**

3. קורוזיה או חלודה אינן תופעה אחת. ישנו מגוון רחב של עומס ותנאי סביבה, הגורמים למתכות שונות להחליד בשונות של קצב, צורה, צבע, ואופי ההתפתחות. לדוגמה – קורוזיית מאמצים, קורוזיית סדקים, קורוזיית

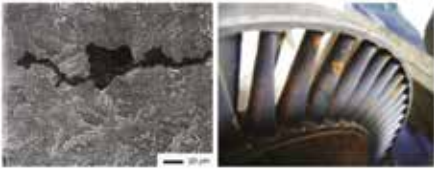
גימום, קורוזיית פני שטח, ועוד. 4. ככלל, אינהיביטורים יפחיתו את קצב הקורוזיה ויעלו את סף הרגישות בו מתכות מתחילות להחליד, כמעט בכל מקום.

מדידת קורוזיה במתכות בכלל ובפלב"מ בפרט: קשה מאוד למדוד קורוזיה בתנאי אמת במתכות המתפקדות במבנים, במיכלים, בצנרת, במכשירים, בשימושים תעשייתיים ועוד. קושי המדידה נובע מהשונות הגדולה בין תנאי הסביבה הכלליים והמקומיים, והשונות הגדולה בין מבנה למבנה, בין שימוש לשימוש, ובאופן בו נתמכים או מחוברים רכיבי המתכת. "מבחן התוצאה" – בדיקה חזותית של רכיבי פלב"מ בשטח, מראה פעמים רבות התפתחות של חלודה הרבה לפני מועד סיום השרות המתוכנן. כמו כן, במקרי כשל רבים ניתן לקשור בין הכשל לבין קורוזיה בצורותיה הרבות. בתנאי מעבדה, אפשר לשמור על תנאי ניסוי השוואתיים. ישנם תקנים רבים ליצירת תנאים השוואתיים ולאפיון דרכי בדיקה של קורוזיה, לדוגמה, ASTM-G109, ASTM-G61, ASTM-G31, ASTM-G30, ASTM-G5, וקורוזיה בפלב"מ בתנאי מעבדה היא באמצעות "עקומת פולריזציה" והגדרת "פוטנציאל הקורוזיה" ו"פוטנציאל הגימום": במידה ובתנאים הזרים לעומת המתח מופיעה לולאה (היסטרזיס) בין הסריקה קדימה (מתח עולה) לסריקה אחורה (מתח יורד), נוטים להניח כי חלה קורוזיית גימום או קורוזיית סדקים.

מחקר שפורסם בגיליון יוני 2102 של הביטאון Performance Material, השווה במעבדה בין ביצועי מתכות עם אינהיביטור ובלעדיו, בתנאים מבוקרים של מים, מי-ים סינטטיים, וטמפרטורות עד 80 מעלות



**הכימיה של פעילות מעכבי חלודה נודדים**



טורבינות וציוד תעשייתי סובלים מגימור בעצירות תחזוקה, מה שעלול לגרום לכשל מוקדם



שימור חלפים תעופתיים כנגד קורוזיה כשהם סגורים עם אינהיביטורים - כפי שמיישם חיל האוויר האמריקני

שומרת עליהן מקורוזיה למשך שנתיים לפחות. בתחומים תעשייתיים: שימור חלפים קריטיים: טורבינות, גירים, אימפלרים, משאבות ועוד. שימור חלפים תעופתיים - כפי שכבר מיישם חיל האוויר האמריקני, הכוונה לשימור חלפים ממתכות מגוונות לשימוש בעת הצורך. מעכבי החלודה הנודדים ניתנים ליישום קבוע או זמני. ניתן להשתמש בהם באחסון ובהובלה במגוון דרכים ואפשרויות: איבוק - פיזור אבקה של מעכב חלודה בחלל בו יש חשש לחלודה של מתכות; מחסניות הפצה בודדות/בשרשרת - אבקת מעכב קורוזיה בשקית TYVEX נושמות, שרשרת של 91 שקיות מפרדות בפרופורציה מקלה על יישום בנפח גדול (מכולות). שקיות במספר גדלים להגנה על נפחים עד 0 מ"ק לשקית. בנמצא גם טבליות לנפח קטן - טבלית מגינה על נפח מרבי של 7 ליטר; יישום זה מתאים לאביזרי מתכת ארוזים בקופסאות, אין צורך בשימון ואין צורך בסופחי לחות. יישום נוסף: ציפוי שקוף קבוע - זהו יישום קל באמצעות מריחה או ריסוס והוא מאפשר ניקוי בניגוב או במים בלחץ גבוה; מגן על משטחי מתכת, צבועים וללא צבע; עמיד בסודה קאוסטית ובחומצת מלח. יישום נוסף הוא ציפוי שקוף זמני להסרה יישום קל במריחה/ריסוס. הנ"ל מגן על משטחי מתכת, צבועים וללא צבע מתקלף בקלות (דינית) לפני המשך השימוש/עיבוד של המתכת. יישום נוסף: עטיפה ביריעה המכילה מעכב חלודה - פלסטיק/שרינק/סטרץ'/בד/ספוג/נייר ועוד. ■

המבנים באמצעות וויס. התקן הישראלי 2002 על חלקיו מחייב שימוש בוויס עשויים פלב"מ. התקן הישראלי הוא תקן מחייב רק מאמצע שנות האלפיים. לפני כעשר שנים יובאה לארץ כמות מכובדת של פלב"מ 102, ממנה יוצרו וויס לעיגון אריחי חיפוי באלפי מבנים בארץ. לקראת אמצע שנות האלפיים, החלו להופיע תופעות של כתמי חלודה על האריחים: מאז שהתגלתה התופעה, קיים וויכוח על דרכי טיפול בשלושה היבטים מרכזיים בה: היבט חזותי אסתטי - כיצד להעלים את הכתמים המכוערים; היבט הנדסי - כיצד למנוע נפילת אריחים; היבט הנדסי - האם מבנים מחלידים מבפנים גם כשהוויס מפלב"מ 316? מזה כשלוש שנים משולבים אינהיביטורים במספר הולך וגדל של שיקומי חיפוי מבנים. בהשוואה לשיקומי חיפוי ללא אינהיביטורים, הדעה הכללית היא: שיעור הכתמים החוזרים/מופיעים במבנים משוקמים ללא אינהיביטור הוא כ-10%; שיעור הכתמים החוזרים/מופיעים במבנים משוקמים עם אינהיביטור הוא פחות מ-2% בלבד. ומה קורה בחו"ל? ישנן מגוון דוגמאות רבות מחו"ל, לשימוש באינהיביטורים כמעכבי קורוזיה בפלב"מ. למשל: הגנה על מטבעות ומדליות - ארזית המדליות בשקיות-סגר המכילות אינהיביטור

צלזיוס. המחקר כלל טבליות של פלב"מ 304 (UNS S30400), פלדת פחמן (UNS G10180), פליז (UNS C26000), ואלומיניום 1100 (UNS A91100). להלן תקציר הממצאים הנוגעים לפלב"מ מהמחקר: ריכוזים עולים של אינהיביטור במי מלח (מי-ים סינטטיים) העלו בצורה כמעט לינארית את סף הרגישות של פלב"מ לקורוזיה בכלל ולגימור בפרט. נוכחות אינהיביטור מעלה בצורה משמעותית את סף הרגישות של פלב"מ לקורוזיה בכלל ולגימור בפרט. השוואה בין עקומות פולריזציה של פלב"מ במי ים 80 מעלות צלזיוס מראה בצורה חזותית את ההבדלים הן בכיוון ה"היסטרזיס", הן בשיעור המתח הנדרש לאילוף קורוזיה, והן בשיעור הזרם תחת קורוזיה מאולצת. בלוחיות פלב"מ בטבילה חלקית במי ים ללא אינהיביטור התפתחה סדיקת מאמצים בתוך 21 יום. בלוחיות פלב"מ בטבילה זהה במי ים עם אינהיביטור לא התפתחה סדיקת מאמצים. בהתבסס על התוצאות שהתקבלו, המחקר מסיק שלוש מסקנות חשובות: 1. אינהיביטורים מגינים על פלב"מ, פלדת פחמן, פליז ואלומיניום מפני חלודה בסביבה ימית בטמפרטורות גבוהות; 2. אינהיביטורים מגינים על פלב"מ ופלדת פחמן מפני גימור בנוכחות כלורידים ומי ים; 3. אינהיביטורים במי ים הגנו על פלב"מ מפני קורוזיית מאמצים.

### דוגמאות מהארץ ומהעולם לשימוש באינהיביטורים

חיפוי חוץ של מבנים באבן טבעית הפכו למותג מוביל איכות בעשרות השנים האחרונות. טכנולוגיות תעשייתיות התפתחו בישראל לעיגון חיפוי החוץ לקירות המבנים. על שיטות אלו ניתן למנות את "שיטת ברנוביץ", "שיטת ירושלים", "השיטה הטרומית" ועוד. כל שיטות החיפוי כוללות עיגון של אריחי החיפוי לקירות