

קורוזיה

זו שנגדנו וזו שבעדנו



מאת דר' אליק גרויסמן
בתי זיקוק לנפט בע"מ, חיפה
המכללה האקדמית להנדסה אורט בראודה, כרמיאל

לא תמיד אנו רואים את החלודה כתוצר של קורוזיה. למשל, גומות, גימומים, שקעים (pits, pittings) שנוצרו על פני שטח הציוד ללא חלודה (תמונה מס' 2). מדוע נוצרו הגומות? הגומות נוצרו עקב התגובה בין המתכת לסביבה. נסתכל על קטע צינור ובו סדק (תמונה מס' 3) ולא נגלה תוצרי קורוזיה. מדוע נוצר הסדק בצינור? הסדק נוצר עקב תגובה בין המתכת לסביבה. זאת אומרת שלא תמיד אנו מתייחסים לחלודה כאל תרכובות כימיות על פני שטח המתכת וכאל תוצר תגובה בין המתכת לסביבה.



תמונה מס' 2 | פלדה רכה אחרי טבילה בתמיסה מימית שמכילה כלורידים

מכאן ניתן להגדיר את תופעת הקורוזיה כ"הרס מתכות וסגסוגות עקב קשר הדדי ביניהן לבין הסביבה". קורוזיה גורמת לא רק לירידת משקל או לירידת עובי הדופן של הציוד. תופעות קורוזיה מתגלות גם בצורה של סדקים, גימומים, שקעים, בועות, וכתוצאה מכך יש ירידה בחוזק, בסבילות ובקושיות של מתכות.



תמונה מס' 3 | קטע של צינור מפלדה רכה עם סדק

ני האדם נתקלו בבעיות קורוזיה כבר בתקופה הקדומה כאשר היו ברשותם 7 המתכות: זהב, כסף, נחושת, ברזל, בדיל, עופרת וכספית. הבנת הנושא והפתרונות לבעיה נמצאו רק במאה ה-20 עם התפתחות המדע והטכנולוגיות החדשות, המבוססות בעיקר על טכנולוגיות כימיות, פיזיו-כימיות ומטלורגיות.

הצרכים שעולים מתעשיות שונות – כגון התעשייה הכימית והפטרואימית, תעשיות לייצור אנרגיה, לבנייה, מערכות צבאיות, תעשיית כלי הרכב – גרמו להתפתחותו של חקר נושאי הקורוזיה. הקורוזיה נכנסה לכל תחומי חיינו. חקר הקורוזיה דורש ידע בכימיה, פיזיקה, הנדסת חומרים, מטלורגיה, איכות הסביבה, מיקרוביולוגיה, כלכלה ועוד. זהו נושא אינטרדיסציפלינרי. הבנת תהליכי הקורוזיה מבוססת על עקרונות וחוקים בכימיה, באלקטרוכימיה ובכימיה פיזיקלית.

חוסר בידע, בחינוך, במידע, ולפעמים חוסר התחשבות בבעיות הקורוזיה, עלולים לגרום להפסדים עצומים בתעשייה ובחברה כולה. איכות הסביבה ואיכות החיים גם הן עלולות להיפגע מבעיות הקורוזיה במישרין או בעקיפין. בדרך כלל אנשים מתייחסים לקורוזיה כאל תופעה מזיקה ולא מעניינת. במאמר נציג דוגמהות הממחישות כיצד ניתן ללמד את נושאי הקורוזיה באופן ברור, מושך ומעניין. גישות חדשות ללימוד נושאי הקורוזיה ניתן למצוא בספר חדש שנכתב ע"י כותב המאמר דר' אליק גרויסמן: Corrosion for Everybody, שיצא לאור ב־2009, Springer.

הגדרת הקורוזיה

כשאתם רואים מכונית ועליה חלודה (תמונה מס' 1), אתם עשויים לשאול, מדוע נוצרה החלודה? התשובה היא שהחלודה נוצרה כתוצאה מתגובה בין המתכת לסביבה. אבל



תמונה מס' 1 | חלודה על מכונית

טבלה מס' 1
שינוי אנרגיית גיבס (ΔG°_{298} , kJ/mol) עבור תגובות קורוזיות

מספר התגובה	תגובת קורוזיה	ΔG°_{298} kJ/mol
1	$4\text{Fe}_{(s)} + 3\text{O}_{2(g)} \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)}$	-742.2
2	$\text{Fe}_{(s)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_{2(s)} + \text{H}_{2(g)}$	-15.7
3	$4\text{Fe}_{(s)} + 6\text{H}_2\text{O}_{(l)} + 3\text{O}_{2(g)} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}$	-1397.2
4	$4\text{Au}_{(s)} + 6\text{H}_2\text{O}_{(l)} + 3\text{O}_{2(g)} \rightarrow 4\text{Au}(\text{OH})_{3(s)}$	+24.0
5	$\text{Cu}_{(s)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_{2(s)} + \text{H}_{2(g)}$	+100.9
6	$2\text{Cu}_{(s)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(l)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow 2\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)}$	-272.5
7	$\text{Cu}_{(s)} + 2\text{HCl}_{(aq)} \rightarrow \text{CuCl}_{2(aq)} + \text{H}_{2(g)}$	+65.5
8	$3\text{Cu}_{(s)} + 4\text{HCl}_{(aq)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow 2\text{CuCl}_{2(aq)} + \text{H}_{2(g)} + \text{Cu}(\text{OH})_{2(s)}$	-199.8
9	$\text{Zn}_{(s)} + 2\text{HCl}_{(aq)} \rightarrow \text{ZnCl}_{2(aq)} + \text{H}_{2(g)}$	-147.0
10	$\text{Fe}_{(s)} + 2\text{HCl}_{(aq)} \rightarrow \text{FeCl}_{2(aq)} + \text{H}_{2(g)}$	-84.9

כלומר, הקורוזיה גורמת לשינויים קרי להתדרדרות בתכונות המכאניות של מתכות, שהן התכונות החשובות ביותר במהלך השימוש (שירות) בציד. ברוב התעשיות (למשל, בתעשיית החלל, האוויר, הצבא, האלקטרוניקה, הכימיה, הפטרוכימיה, הביוטכנולוגיה, הפרמצבטיקה והרפואה) הציד המתכתי מאבד מתכונותיו הפונקציונליות עקב קורוזיה. למשל, מגעים חשמליים מפסיקים לעבוד עקב היווצרות תוצרי קורוזיה. הסביבה נעשית מזוהמת על ידי תוצרי קורוזיה וחומרים אחרים, שהם לפעמים מסוכנים (עקב דליפות).

ההגדרה המודרנית של תופעת הקורוזיה היא ש"קורוזיה הינה קשר הדדי בין מתכות וסגסוגות לבין הסביבה, שגורמת להתדרדרות (לשינוי תכונות פונקציונליות) במצבו של ציוד מתכתי ולעתים גם במצב הסביבה."

מקור המושג "קורוזיה" במילה הלטינית "corrodere", ופירושו "להיאכל". בעברית ניתן להשתמש בשלוש מילים נרדפות: קורוזיה, שיתוך או איכול. הראשון שקבע או הטביע את השם "קורוזיה" היה הכימאי פיזיקאי האנגלי רוברט בוייל בשנות ה-60 של

המאה ה-17 כאשר חקר את התמוססות המתכות בחומצות וראה כיצד המתכות נעלמות בזמן טבילתן.

ובכן ניתן להשתמש במושג קורוזיה לא רק למתכות ולסגסוגות, אלא לחומרים פולימרים, קרמיים, זכוכייתיים ומרוכבים. לפעמים מדברים על בלאי או הרס של חומרים לא מתכתיים. מנגנון הקורוזיה של מתכות וחומרים לא מתכתיים הוא שונה לגמרי. נדבר רק על מתכות וסגסוגות, על "מחלותיהן" ועל האופן שבו ניתן להציל אותן מהרס ומאובדן תכונותיהן הפונקציונליות.

הערה חשובה לגבי "החלדה" ו"חלודה". "החלדה" הינה תופעה אשר מתרחשת רק עם ברזל ועם פלדות (סגסוגות ברזליות). כתוצאה מכך נוצרת "חלודה" אשר מכילה תחמוצות והידרוקסידי ברזל. מתכות אל-ברזליות כמו מגנזיום, אבץ, אלומיניום, נחושת, ניקל, כרום וכו' "משתתכות", עוברות שיתוך, ונוצרים תוצרי שיתוך, אבל הן אינן "מחלדות".

מדוע מתרחשת קורוזיה?

התשובה מבוססת על ידע בתרמודינמיקה וקינטיקה כימית. נטייה לתגובות קורוזיביות כמו לכל התגובות הכימיות מוגדרת ע"י שינוי באנרגיית גיבס ΔG . (ראו בטבלה מס' 1). ניתוח הנתונים מטבלה מס' 1 מראה שברזל יכול להשתתך במגע עם חמצן, במים בלי חמצן ועם חמצן וחומצות

מלח. נחושת אינה משתתכת במים ובחומצת מלח כאשר התמיסות אינן מכילות חמצן מומס, אבל בנוכחות חמצן מומס במים ובחומצת מלח הנחושת יכולה להשתתך. זהב עמיד במים, לכן אתם יכולים להתרחץ ולשחות כשאתם עונדים טבעות מזהב.

לפניכם כמה נקודות חשובות מאוד שיש לתת את הדעת עליהן כאשר מנתחים אפשרות (חיזוי) של התרחשות תגובות קורוזיביות על סמך ΔG .

א. ערכים שליליים של ΔG מצביעים רק על "אפשרות" של התרחשות התגובות ולא על "התחייבות" להתרחשותן.

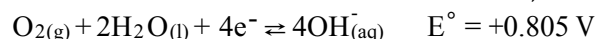
ב. על סמך ערכי ΔG לא ניתן לקבוע את מהירות התגובה. לדוגמה, עבור שיתוך ברזל במים רוויים בחמצן מומס, שינוי אנרגיית גיבס הוא -1397.2 kJ/mol, ואילו עבור שיתוך ברזל בחומצת מלח, שינוי אנרגיית גיבס שווה ל- -84.9 kJ/mol. אפשר אפילו לטעות בסוג התגובה שבה ברזל מתמוסס מהר יותר על סמך ΔG . למרות ש- ΔG שלילי יותר פי 16 עבור תגובה מס' 3 מאשר עבור תגובה מס' 10, ברזל מתמוסס הרבה יותר מהר בתגובה מס' 10. הערך השלילי של שינוי באנרגיית גיבס מצביע עד כמה התגובה הנתונה רחוקה ממצב שיווי משקל, כי בשיווי משקל $\Delta G = 0$. לא קיימת שיטה תאורטית לחישוב של

למשל, ברזל משתתף במים (pH = 7) לפי המנגנון הבא:

(3) תגובה אנודית



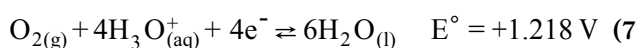
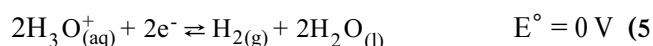
(4) תגובה קתודית



שתי התגובות, האנודית והקתודית, מתרחשות בו־זמנית, והמתכת משתתכת באזור האנודי (בעל הפוטנציאל הנמוך יותר מהאזור הקתודי). התגובה הקתודית מתרחשת על־פני שטח המתכת בעל הפוטנציאל החיובי יותר מהאזור האנודי (אלקטרונים שהשתחררו בתגובה אנודית נקלטים באזור הקתודי), והאזור הקתודי אינו משתתף (זה חשוב מאוד!) כאשר ברזל טבול במים (או נמצא באטמוספירה רטובה), הפוטנציאל והזרם החשמלי מופיעים על פני השטח, לכן מנגנון זה נקרא אלקטרוכימי.

מה קורה כאשר ברזל אינו טבול במים אלא בתמיסה חומצית? התגובה האנודית נשארת אותה תגובה, אבל בחומצה יש קטיוני H_3O^+ אשר "רעבים" לאלקטרונים.

האם יש יוני Fe^{3+} שהם "רעבים" עוד יותר לקליטת אלקטרונים בתגובות קתודיות שמתרחשות בחומצה? להלן תגובות קתודיות אפשריות בחומצה:



כל מחמצן יכול להשתתף בתגובה קתודית, ותרומתו תלויה בריכוזו ובפוטנציאל החשמלי של חיזורו.

זה מוגדר ע"י משוואת נרנסט:

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{Ox}]}{[\text{Red}]} \quad (8)$$

נשאלות מספר שאלות:

א. האם זיהומים במתכת גורמים לקורוזיה? לא! אייציבות תרמודינמית גורמת לקורוזיה. גם אם נחשוב שנוכל לייצר ברזל טהור ב־100% ללא זיהומים, האם הוא ישתתף במים? כן בוודאי, כי $\Delta G < 0$ (ראו תגובה מס' 2, טבלה מס' 1). זיהומים במתכות גורמים לעליית מהירות התגובות הקורוזיביות: הזרם החשמלי עולה עקב הטרוגניות אלקטרוכימית בין המתכת לזיהומים. עוד ב־1837 גילה הפיזיקאי משווייץ, דה־לה־רייב שאבץ טהור מתמוסס בחומצת מלח באיטיות נמוכה בהרבה מזו של אבץ מזוהם.

ב. מדוע אומרים שככל שיש יותר מלח במים (עד לריכוז מסוים), קצב השיתוך גבוה יותר?

זרם הקורוזיה (I_{corr}) מתואר ע"י הנוסחה של אום (Ohm):

$$I_{\text{corr}} = \frac{E}{R} \quad (9)$$

כל קצבי קורוזיה (כמו לחישוב של כל התגובות הכימיות והאלקטרוכימיות), וצריכים לבצע ניסוי על מנת לקבוע את קצב השיתוך. למזלנו, המהירויות של רוב תגובות הקורוזיה נמוכות מאוד. אף־על־פי שהנטייה לתגובות השיתוך של הברזל, האלומיניום והטיטניום גבוהה (ערכי ΔG שליליים מאוד!) משתמשים בנתכים על בסיס אלומיניום וטיטניום באטמוספירה, במים ובקרקע. מדוע?

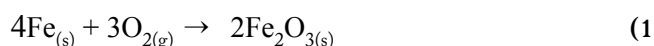
התשובה לכך היא שקיימות מגבלות קינטיות. כאשר הצידוד מנתכים אלה נמצא בתנאי הסביבה, נוצר מיד קרום דק וצפוף (עקב התגובה עם החמצן) המורכב מתחמוצות של מתכות אלו על פני השטח של הנתכים אשר מגן על הצידוד מהמשך קורוזיה. הברזל וסגסוגותיו מגיבים עם החמצן באטמוספירה, וגם נוצר קרום דק מתחמוצות הברזל (בעיקר FeO ו־ Fe_2O_3), שהוא בעל נקבוביות גבוהה והידבקות נמוכה, והוא לא מגן מחדירת מים וחמצן לפני שטח המתכת, ולפיכך תגובות הקורוזיה נמשכות.

מנגנוני קורוזיה

כאשר מדברים על "מנגנון", אנו מתכוונים להתנהגות מתכת בסביבה. התנהגות יכולה להיות "פשוטה" ולכלול שלב אחד, למשל קורוזיה של ברזל הנגרמת ע"י חמצן בטמפרטורות גבוהות. תגובת שיתוך יכולה להיות "מסובכת" ולכלול שניים ויותר שלבים, למשל, כאשר ברזל טבול במים, בקרקע או בתמיסת חומצת מלח.

אף־על־פי שקיימות כ־80 מתכות בטבע (והרבה יותר נתכים בתעשייה) והרבה מאוד תנאי סביבה (כנראה, יותר מ־80), הרי כל תגובות הקורוזיה מתוארות על־ידי שני מנגנונים: האחד בלי זרם חשמלי ופוטנציאל חשמלי על פני שטח המתכת, והאחר עם זרם חשמלי ופוטנציאל חשמלי על פני שטח המתכת.

המנגנון הראשון, זה שבלי זרם חשמלי, מתרחש כאשר המתכות נמצאות במגע עם לא אלקטרוליטים, למשל, ברזל עם חמצן בטמפרטורה גבוהה, עם כלור גזי, ברום וגפרית נוזליים. כאן תגובות החמצון־חיזור מתרחשות בתגובה אחת ללא היווצרות פוטנציאל חשמלי על פני שטח המתכת. לפעמים מנגנון זה נקרא מנגנון כימי, או קורוזיה יבשה (כי המים לא משתתפים).



המנגנון השני שכרוך בהיווצרות זרם ופוטנציאל חשמלי, מתרחש כאשר המתכות נמצאות במגע עם אלקטרוליטים. כאן תגובות החמצון־חיזור מתרחשות לא בתגובה אחת, ומהירות התגובה תלויה בפוטנציאל החשמלי שנוצר על־פני השטח של המתכות. מנגנון זה נקרא מנגנון אלקטרוכימי, או קורוזיה רטובה (כי ברוב המקרים יש השתתפות של מים).

מסוימת. הירידה בעובי המתכת (ציוד או מבנה) ביחס לתקופת השירות של הציוד הינה קצב השיתוך של מתכת. על מנת לבדוק את ירידת עובי הדופן, משתמשים בבדיקות לא הורסות.

מחשבים את קצב השיתוך K לפי הנוסחה הבאה:

$$K = \frac{D_o - D_T}{T} \left[\frac{\text{mm}}{\text{year}} \right] \quad (10)$$

כאשר: D_o – עובי המתכת (מ"מ) ההתחלתי; D_T – עובי המתכת (מ"מ) לאחר תקופה T (שנים) של שירות. השיטה שימושית מאוד בתעשייה, וקצב השיתוך נקרא חדירת קורוזיה.

ב. שינוי במסת המתכת ביחס לשטחה במשך תקופה מסוימת – בשיטה זו מודדים מסה (m_o) ושטח (A) של חתיכת (פס) מתכת (שנקראת "קופון" – ראו תמונה מס' 5) מתחילת השימוש ומודדים את המסה (m_1) לאחר תקופה מסוימת (T). הפרש במסה ($m_o - m_1$) ביחס לשטח המתכת (A) ולתקופה (T) הנו קצב השיתוך (K):

$$K = \frac{m_o - m_1}{A \cdot T} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{year}} \right] \quad (11)$$

מכיוון שבתעשייה כמעט בלתי אפשרי למדוד מסה של קונסטרוקציה, משתמשים ביחידה זו בבדיקות מעבדתיות (בניסויים) וגם בתעשייה באמצעות מדידת קצב השיתוך בעזרת "קופונים". ה"קופונים" הם דגמים עם מידות מסוימות ומשקל ידוע שמרכיבים בתוך הציוד ועוקבים אחר מצב השיתוך. ה"קופונים" מייצגים ציוד ומבנים שרוצים לדעת מה עמידותם בסביבה.

כאשר E הינו הפרש הפוטנציאלים בין האנודה והקתודה על פני השטח של המתכת; R הנו ההתנגדות החשמלית של התמיסה הקרובה לפני שטח המתכת המשתתפת. כאשר מוסיפים מלח למים, ההתנגדות החשמלית של התמיסה יורדת, וזרם הקורוזיה עולה בהתאם למשוואה (9). אבל זה מתרחש עד לריכוז מסוים של המלח. מדוע? על כך נדון במאמר הבא.

תהליכים אופייניים של שיתוך, תופעות וצורות של קורוזיה

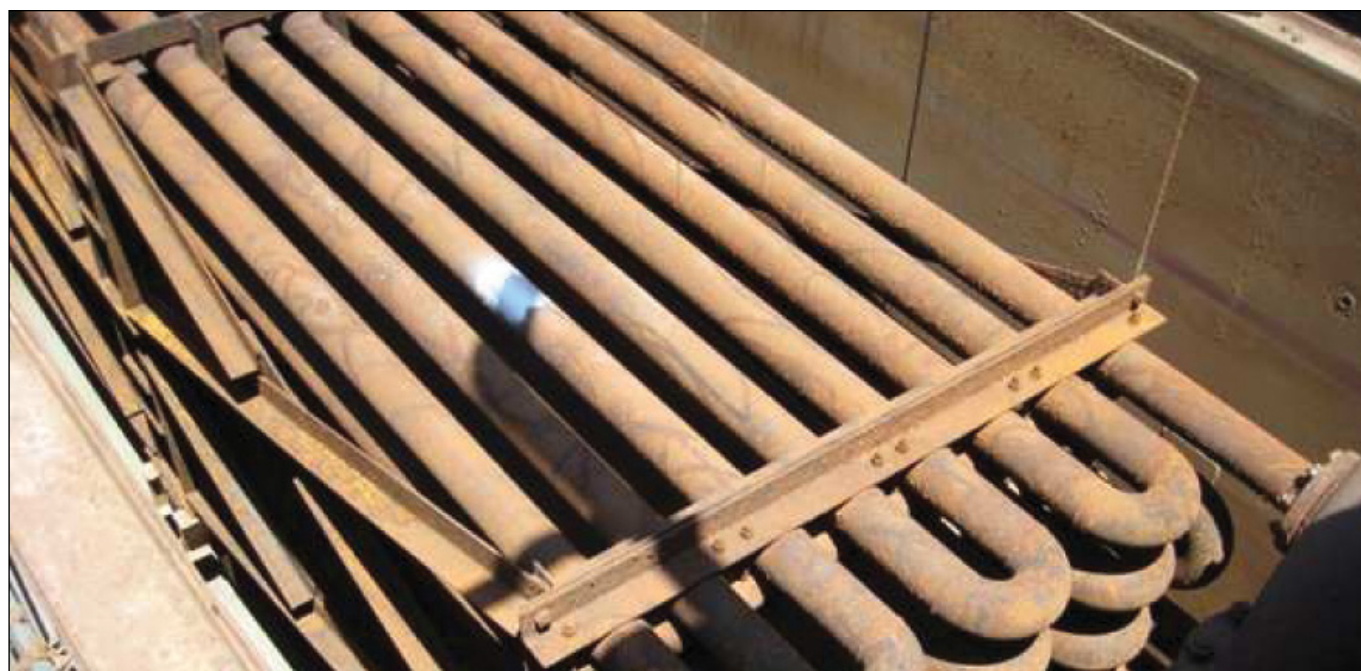
תהליך קורוזיה הינו תהליך דו-צדדי: כאשר מצד אחד משתתפת המתכת (סגסוגת), ומאידך הסביבה משתתפת. לכן תכונות המתכת (סוג, אופי ומצב פני השטח), תכונות הסביבה (פאזה נוזלית, גזית, מוצקה או תערובת פאזות שונות, הרכב כימי, טמפרטורה, לחצים, מהירות זרימה) ותנאי השימוש בציוד או במבנים (נוכחות מאמצים, תקופת פעולה) משפיעים על האינטנסיביות של השיתוך ועל אופי ההרס. כתוצאה מכך ישנן הרבה תופעות וצורות של שיתוך המתוארות על-ידי תהליכים אופייניים. צורות הקורוזיה מחולקות לשתי קבוצות:

קורוזיה אחידה (תמונה מס' 4) וקורוזיה מקומית (תמונות מס' 1-3). קורוזיה אחידה הינה התקפה שמתרחשת על כל פני השטח של המתכת בצורה אחידה או כמעט אחידה.

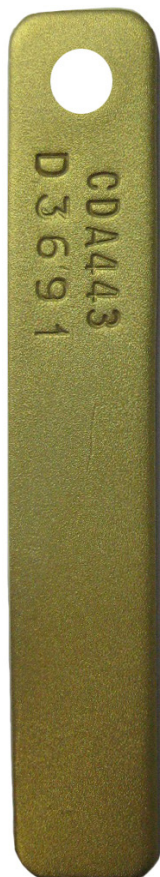
להלן כמה דוגמהות של קורוזיה אחידה: שיתוך מתכות בחומצות או בבסיסים; שיתוך בטמפרטורות גבוהות.

כיצד מודדים תופעות של קורוזיה אחידה? קיימות מספר שיטות.

א. מדידת ירידה בעובי המתכת – מודדים את עובי המתכת בתחילת השימוש בתנאים מסוימים ולאחר תקופה



תמונה מס' 4 | קורוזיה אחידה (כללית) של צינורות במים ב-60°C.



תמונה מס' 5 |
"קופון" מפליז (מסג
אבץ נחושת) רכה
למידת קצב שיתוך.

לקורוזיה גלואנית אשר קיבלה את שמה
כאשר שתי מתכות שונות נמצאות במגע
באלקטרוליט משותף (ראו תמונה מס'
6). בתמונה זו ניתן לראות כיצד המחיצות
מפלדה רכה נאכלו במגע עם צינורות
טיטניום שהיו בשירות במי קירור רק 3
שנים. במיוחד מסוכן לשלב אלומיניום
עם נחושת. האינטנסיביות של הרס הציוד
מקורוזיה גלואנית תלויה לא רק בהפרש
שבין הפוטנציאלים חשמליים של שתי
מתכות, אלא במוליכות חשמלית של
התמיסה, בגאומטריה (קורוזיה חזקה
מאוד מתרחשת כאשר שטח האנודה קטן
הרבה יותר משטח הקתודה), בטמפרטורה
ובמהירות זרימה. קורוזיה גלואנית אינה
מתרחשת בתמיסות בעלות מוליכות
חשמלית נמוכה, כמו נפט גולמי, דלקים,
ממסים אורגניים, מים טהורים (מזוקקים
או נטולי מלחים), ואינה מתרחשת
באווירה יבשה.

כיצד ניתן למנוע קורוזיה גלואנית? יש
למנוע מגעים בין שתי מתכות בעלות
פוטנציאלים שונים. ניתן לבודד שתי מתכות
שונות, לבחור שטח אנודה שהוא גדול
ככל האפשר משטח הקתודה ולהשתמש
במעכבי שיתוך.

שיטות למניעת קורוזיה ולהגנת מתכות בפני קורוזיה

בבחירת שיטות למניעת קורוזיה ניתן לטפל או במתכת או
בסביבה:

א. לצורך הדגמה נדמיין שהמתכת היא אישה שלבושה
בבגדים טובים כדי שהסביבה לא תפגע בה, כלומר לבודדה
מהסביבה. מכאן השיטה הראשונה והנפוצה ביותר אשר
השתמשו בה הרומאים והיהודים עוד לפני כאלפיים שנה:

שימוש בציפויים: אורגניים, אנאורגניים ומתכתיים.

ב. ניתן לשנות את האנרגיה של המתכת, כלומר, לשנות את
הפוטנציאל החשמלי שלה. מכאן נובעות שתי שיטות
אלקטרוכימיות:

בשיטת "הגנה קתודית" מביאים פוטנציאל חשמלי
שלילי כדי להפוך אנודה (שמשותתכת) לקתודה (שאינה
משותתכת). מכאן השם "הגנה קתודית". היא מבוצעת
בעזרת חיבור למתכת אצילה פחות (אנודה קרבה – בעלת
פוטנציאל חשמלי שהוא שלילי יותר מזו של המתכת
המוגנת) או בעזרת חיבור לקוטב שלילי של מיישר.

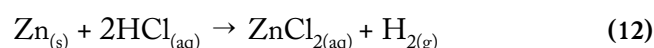
בשיטת "הגנה אנודית" משנים את הפוטנציאל של המתכת
בתמיסות מסוימות של אלקטרוליטים לכיוון החיובי על

מהנדסים בתעשייה נוהגים להשתמש ביחידות קצב שיתוך
במ"מ לשנה, ו על מנת לעבור מיחידות שבנוסחה (11)
למ"מ לשנה, צריכים לדעת את צפיפות המתכת הנמדדת
של ה"קופון". אני מציע לקוראים לבצע מעבר זה.

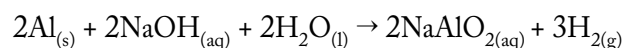
אנו יכולים למדוד לא רק את התכונות הפיזיקליות של
המתכת אלא גם את ההרכב הכימי של הסביבה, כי היא
משתנה עם התרחשות של שיתוך.

ג. מרכיבי הסביבה שניתן למדוד לקביעת קצב שיתוך: נפח
של מימן שנוצר במהלך תגובת שיתוך.

בדרך-כלל משתמשים בשיטה זו כאשר המתכת טבולה
בחומצה או בבסיס, למשל:



(13)



ניתן למדוד נפח של גז מימן שנוצר במהלך השיתוך ולאחר
מכן לחשב את מסת המתכת שנאכלה.

משתמשים בשיטה זו בניסויים מעבדתיים וגם בתעשייה.
דיברנו על קורוזיה אחידה. מה קורה כאשר הקורוזיה היא
לא אחידה?

קורוזיה מקומית

ברוב המקרים מתרחשת קורוזיה מקומית, כלומר לא כל פני
השטח משתתך, אלא רק חלק קטן מהשטח.

קורוזיה מקומית נפוצה הרבה יותר מקורוזיה אחידה. מדוע?
כי מתכות וסגסוגות הן חומרים רב-גבישיים (הטרוגניים) עם
ליקויים וזיהומים שונים. מאידך, הסביבה משתנה עם הזמן
ועם המרחק על פני השטח של המתכת: למשל, ריכוז חמצן
מומס, pH, טמפרטורה והתפלגות זרימה.

קורוזיה מקומית מחולקת לשיתוך גומות, שיתוך נקיקים,
קורוזיה גלואנית, קורוזיה ע"י חידקים, ארוזיה וקביטציה,
בריחה סלקטיבית של יסודות מסגסוגות (למשל,
דצינקיפיקציה – בריחת אבץ מפליז), קורוזיה בין-גרעינית,
סידוק קורוזיית מאמצים והתקפות ע"י מימן.

כמובן, לא ניתן להסביר ולהציג את כל סוגי הקורוזיה המקומית
במאמר אחד, אבל אתן דוגמה של קורוזיה גלואנית, כי היא די
נפוצה בתעשייה ובבתים שלנו, אף-על-פי שמודעים לקורוזיה
זו למעלה מ-200 שנה, והיום יודעים היטב כיצד למנוע אותה.

כאשר רופא מגלה מחלה, לפעמים היא נקראת על שמו.
האנטומאי האיטלקי לואיג'י גלואני שחי במאה ה-18 גילה
שכאשר שתי מתכות שונות באות במגע עם צפרדע מנותחת
(לא חיה), השרירים שלה מתכווצים. אחרי פרסום ספרו
ב-1791 "על חשמל חי", היו מי שחשבו שבעזרת חשמל
ניתן יהיה להחזיר לחיים כל גוף מת. היום משתמשים בשוק
חשמלי במהלך דום-לב ולעיתים מחזירים אדם לחיים. נחזור



תמונה מס' 6 | קורוזיה גלואנית של מחיצות מפלדה רכה אשר היו במגע עם צינורות טיטניום במיקור (אחרי 3 שנים של שירות)

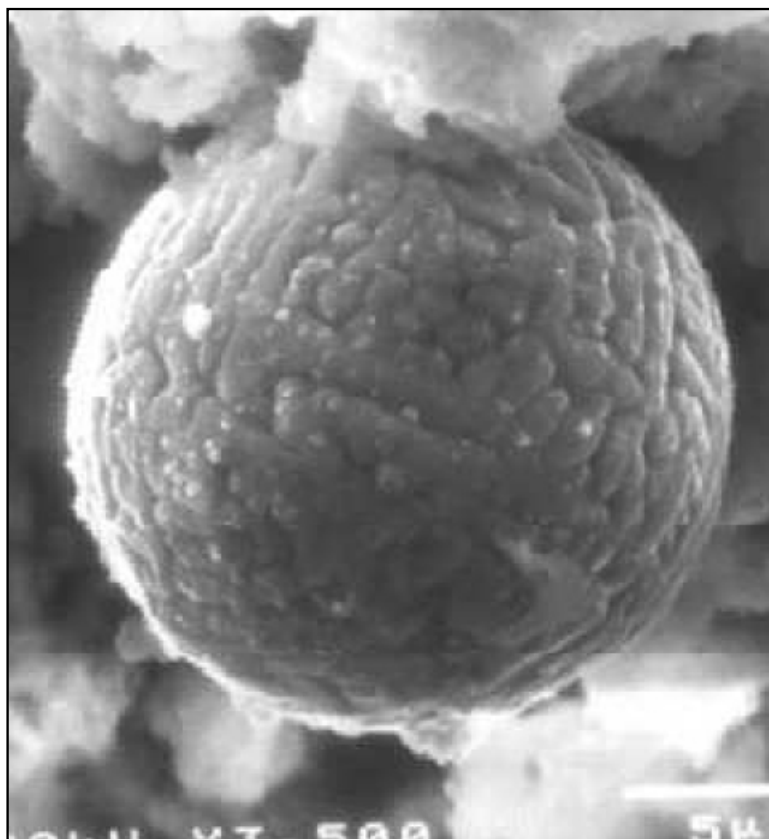
כדי לעכב תגובות קורוזיביות על-פני השטח של המתכות. בשיטה הרביעית ניתן לבחור מתכת שהיא אדישה לסביבה: בחירה נכונה של החומר לייצור ציוד מתכתי. ניתן לשנות את המטלורגיה של מתכות וסגסוגות כדי שתהיינה עמידות בתנאי הסביבה.

ניתן להשתמש בחומרים פולימריים, מרוכבים, קרמיים וזכוכייתיים במקום מתכות. יש לזכור שלכל החומרים האלמנטריים יש גם חסרונות, שהדיון בהם לא יוכל להיעשות במסגרת המאמר הזה.

ה. בשיטה החמישית אנו מתייחסים למניעת קורוזיה בשלב התכנון של ציוד ומבנים. למשל, אין להשתמש במתכות שונות במגע. הציוד צריך להיות נוח לניקוי, לניקוז ולצביעה.

מנת להגיע לאזור הפסיבי של המתכת. משתמשים בשיטת "הגנה אנודית" בתעשייה הכימית לשם הגנה על ציוד העשוי מנתכי ברזל, כרום וניקל בתמיסות של חומצות H_3PO_4 ו- HNO_3 ו- H_2SO_4 .

ג. ניתן לשנות את הרכב הסביבה, למשל, להשתמש במעכבי שיתוך (אינהיביטורים), בביוצידים (נגד חיידקי גורמי קורוזיה), דיספרסנטים (נגד הצטברות משקעים אנאורגאניים ואורגניים), לסלק חמצן מומס מהמים, לבצע פסיבציה (למשל, לייצר קרום פסיבי מגנטיט Fe_3O_4 או פוספאטים על-פני השטח של פלדות ברזליות), לייבש אוויר, לנטרל חומצות או בסיסים. אינהיביטורים הנם חומרים אשר מוספים בריכוזים נמוכים מאוד אל הסביבה



תמונה מס' 7 | חלודה שנוצרה בקו הובלת בזין (תמונה בעזרת מיקרוסקופ אלקטרוני סורק, בהגדלה 3,500)

1. ניתן לשנות את תנאי התהליך, למשל, להקטין את מהירות הזרימה או למנוע את סטגנציית המים. כמובן, ניתן לשלב שיטות שונות, למשל, הגנה קתודית יחד עם ציפויים או עם מעכבי שיתוך.

קורוזיה כאומנות

החלודה אינה יפה למראה. מדוע? מפני שקיבלנו הרגשה שהחלודה הינה חומר של דגראדציה, בלאי, התדרדרות של מתכת שהייתה מבריקה ויפה כאשר הייתה חדשה. אבל זה עניין פילוסופי. לכל דבר יש מושג "אופטימלי". כאשר אנו מסתכלים על תמונה מרחוק, אין אנו רואים דבר. כאשר מסתכלים קרוב מדי, ממרחק של כמה סנטימטרים, גם איננו רואים דבר. רק ממרחק אופטימלי אנו רואים את כל היופי שמציג הצייר. אותו דבר עם חלודה. חלודה רופפת שנוצרה בתנאים שונים אינה מעוררת תחושה טובה, אפילו להפך. לכן "חלודה" היא סמל לדברים שאינם טובים. אם נסתכל על חלודה באמצעות מיקרוסקופ אלקטרוני סורק, נוכל לזהות צורות יפהפיות ולדמיין כל מיני יצירות אומנותיות (ראו תמונה מס' 7). בהקשר זה נזכיר את המילים של אלברט איינשטיין: "דמיון יותר חשוב מידע!"

במקום הסוף

באחת מהאגדות של אנדרסן, אימא ברוזה אומרת לברווזונים הקטנים: "הנהר אינו עד לגדר, הנהר רחוק יותר." עולם הקורוזיה רחב מאוד, ולא נצא נשכרים אם נחשוב שקורוזיה הינה תופעה מזיקה מעיקרה. יש הרבה תופעות קורוזיה שניתן לנצל לתועלת החברה. להלן כמה מהן:
א. בהגנה קתודית, אנו נאכלת ותודות לכך הצידוד או המבנה המתכתי מוגנים.
ב. האנודה שבסוללות נאכלת, ועל חשבונה כנ"ל מקבלים זרם חשמלי ומתח חשמלי שמשמשים בהם להפעלת כלים שונים. איננו יכולים אפילו לדמיין מה יקרה אם ייעלמו הסוללות.
ג. בזכות קורוזיה קטנה מאוד של כלי כסף, יוני כסף מופיעים במים ומטהרים את המים מחידקים.
כשהגיע להודו, היה צבאו של אלכסנדר מוקדון על סף מוות בגלל מים מזוהמים ששתו חייליו. שם לא היו מומחים לקורוזיה, אבל החיילים קיבלו הנחיה לשתות מים מכובעים ומכלים העשויים מכסף. וכך הם ניצלו. ההנחיות

לא השתנו במשך אלפיים שנה: כדאי לספק לכל הצעירים הישראליים שמטיילים בהודו כוסות מכסף לשתייה.
ד. משתמשים בתוצרי שיתוך להגנת מתכות וסגסוגות שונות. למשל, פאטינה (תוצר שיתוך של נחושת) על גגות ופסלים מביאה לשכבת הגנה דקורטיבית ואסתטית (כמובן שזה עניין של טעם). אנודיזו הנו שיתוך מואץ של אלומיניום במטרה לייצר שכבה מגנה Al_2O_3 על ציוד מאלומיניום.
ה. לדעתי, בלי שיתוך של ברזל לא היו החיים מתקיימים, כי יוני Fe^{2+} (תוצר השיתוך) הינם חלק בלתי נפרד מההמוגלובין. כלורופיל מכיל תוצר שיתוך של מגנזיום Mg^{2+} . ויטמין B_{12} מכיל תוצר שיתוך של קובלט Co^{2+} .
דוגמהות אלה מצביעות על כך שאם נסתכל על "הקורוזיה" מבחינה פילוסופית, נראה בה גם צדדים חיוביים, על כך נרחיב במאמר הבא.

galec@orl.co.il

גם בשנת הלימודים תשע"א יתקיימו קורסים וסדנאות למורים במרכז הארצי של מורי הכימיה במכון ויצמן.
יום הפעילות יהיה יום ד'. פירוט הפעילויות יופיע בקרוב באתר של המרכז הארצי למורי הכימיה.