

הנדסת קורוזיה

תוכן עניינים

2.....	הגדרות בסיסיות
6.....	גורמים קורוזיביים
7.....	פסיבציה
9.....	גורמים המשפיעים על קצב קורוזיה
10.....	חישוב קצב קורוזיה
11.....	סוגי קורוזיה
11.....	קוריזה אחידה/כללית (Uniform Corrosion)
12.....	קורוזיית גימום (Pitting Corrosion)
14.....	קורוזיה גלונית (Galvanic Corrosion)
15.....	קורוזיה בין גרעינית (Intergranular corrosion)
17.....	קורוזיית קילוף (אקספוליאציה) (Exfoliation Corrosion)
18.....	קורוזיית נקיקים (Crevice Corrosion)
18.....	קורוזיה אירודה (Erosion Corrosion)
19.....	קורוזיית מאמצים (Stress Corrosion Cracking)
20.....	קורוזיית התעייפות (Fatigue Corrosion)
21.....	קורוזיה סלקטיבית (דצינקציפיקציה) (Dealloying)
22.....	ציפויים
22.....	סוגי ציפויים
23.....	צביעה
23.....	צמנטציה
23.....	ציפוי נחושת
23.....	אלקטרוליס ניקל
23.....	ציפוי כרום
24.....	ציפוי אבץ (גיליון)
24.....	ציפוי קדמיום
24.....	ציפוי אלומיניום נקי
24.....	ציפוי זהב
24.....	ציפוי בדיל
25.....	פוספטיזציה (השחרה)
26.....	בדיקת טיב הציפוי
27.....	אנודיזציה

הגדרות בסיסיות

קשר מתכתי – קשר המאפיין את המתכות. נוצר כתוצאה מכוחות המשיכה של מסת האטומים וכוחות הדחייה של מטעניהם החשמליים. כתוצאה מכך האטומים מסתדרים בסריג מתכתי סימטרי המאפשר תנועת אלקטרונים המעניקה לסריג מוליכות חשמלית.

מולקולה – מספר אטומים מחוברים. החלק הקטן ביותר בחומר.

תמיסה – הכנסת חומר למים וערבובו עד להמסתו. החומר המומס לא מאבד את תכונותיו. ניתן לקבל תמיסה גם מערבוב של נוזל בנוזל וגם גז בנוזל.

אלקטרוניט – תמיסה מימת המוליכה חשמל.

יון – אטום או קבוצת אטומים, בעלי מטען חשמלי.

קטיון – יון חיובי.

אניון – יון שלילי.

מחמצן – חומר המקבל אלקטרונים.

מחזר – חומר המוסר אלקטרונים.

אנודה – אלקטרודה שעליה מתרחשת תגובת חימצון, והיא מוסרת אלקטרונים.

קתודה – אלקטרודה שעליה מתרחשת תגובת חיזור, והיא מקבלת אלקטרונים.

תגובת חיזור – $Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^-$

אטומים מתכתיים מוסרים אלקטרונים בתהליך שנקרא חימצון. האתר שבו מתרחשת ההתחמצנות נקרא אנודה, לכן תהליך חימצון נקרא גם תגובה אנודית. האלקטרונים שנמסרים מהמתכת חייבים להימסר למולקולה אחרת ולהיות חלק ממנה.

פולריזציה (קיטוב) – האטה של התגובה האלקטרוכימית.

קורוזיה הינה תהליך אלקטרוכימי, שבו חייבים להתקיים 3 דברים:
אנודה – מוסרת אלקטרונים.

קטודה – מקבלת אלקטרונים.

אלקטרוליט – חומר מוליך חשמל, המתווך שמעביר את האלקטרונים בין האנודה לקטודה.

כמו כל תהליך, גם תהליך אלקטרוכימי של קורוזיה, מגיע לשיווי משקל.
מבחנים בין שני סוגי מקרים שבגללם תהליך הקורוזיה מגיע לשיווי משקל:

- פולריזציה אקטיבציה.
- פולריזציית ריכוזים.

פולריזציה אקטיבציה – המשותף לכל התהליכים המבוקרים ע"י פולריזציה אקטיבציה, הוא שהתהליך מתרחש בין משטח המגע של המתכת לאלקטרוליט.

כאשר נבחר מתכת בעלת טיב פני שטח מעולה, קצב הקורוזיה יהיה איטי יותר, ונאמר שהתהליך מבוקר ע"י פולריזציה אקטיבציה.

אם נבחר מתכת בעלת פוטנציאל אלקטרוכימי נמוך יותר, קצב הקורוזיה יהיה איטי יותר, ולכן נאמר שהתהליך מבוקר ע"י פולריזציה אקטיבציה.

פולריזציית ריכוזים – תהליך קורוזיה המבוקר ע"י שינוי ריכוז האלקטרוליט.

במערכת המבוקרת ע"י פולריזציית ריכוזים, הגדלה הריכוז של התמיסה הכימית מוביל להעלאת קצב הקורוזיה, ובנוסף ערבוב התמיסה, גם כן מוביל להעלאת קצב הקורוזיה.

דוגמא: אם נשים פלדה בתוך חומצה מלחית, הפלדה תיאכל ותתמוסס, וע"י שליטה בריכוז החומצה המלחית ניתן לשלוט בקצב הקורוזיה.

שורה גלוונית - מתארת את מידת האצילות של המתכות לפי רשימה המסודרת מהמתכת הכי אצילה ועד המתכת הכי פעילה.

ככל שהחומרים נמצאים במרחק רב יותר ברשימה (אחד ביחס לשני), כך התגובה ביניהם תהיה חזקה יותר כאשר יהיה ביניהם אלקטרוליט.

בתגובה ביניהם המתכת האצילה יותר תשמש כקטודה, והמתכת הפעילה יותר תשמש כאנודה.

השורה הגלוונית כולל גם נתכים וסגסוגות של אותה המתכת, מכיוון שלא רק סוג החומר משפיע על הפוטנציאל האלקטרוכימי, אלא גם תהליך הייצור, ריכוז המסגסגים, מיקרו-מבנה של המתכת.

בנוסף, בשורה הגלוונית, ניתן למצוא מתכות מסויימות שמופיעות פעמיים - בשני מצבים שונים. מתכות שיש להם שכבת פסיביציה טבעית, דוגמא: אלומיניום, פלב"מ. נהפכות מאוד ריאקטיביות במצבים מסויימים (לדוגמא כאשר שכבת הפסיביציה שלהם נשרטת), ולכן יש להם 2 מצבים:

מצב אטיבי, ומצב פסיבי.

במצב הפסיבי, הפוטנציאל האלקטרוכימי שלהם נמוך, ולכן העמידות שלהם נגד קורוזיה מצויינת.

Table 3-2 Galvanic series of some commercial metals and alloys in seawater

↑ Noble or cathodic	Platinum
	Gold
	Graphite
	Titanium
	Silver
	[Chlorimet 3 (62 Ni, 18 Cr, 18 Mo
	[Hastelloy C (62 Ni, 17 Cr, 15 Mo)
	[18-8 Mo stainless steel (passive)
	[18-8 stainless steel (passive)
	[Chromium stainless steel 11-30% Cr (passive)
	[Inconel (passive) (80 Ni, 13 Cr, 7 Fe)
	[Nickel (passive)
	Silver solder
	[Monel (70 Ni, 30 Cu)
	Cupronickels (60-90 Cu, 40-10 Ni)
	Bronzes (Cu-Sn)
	Copper
	Brasses (Cu-Zn)
	[Chlorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)
	[Hastelloy B (60 Ni, 30 Mo, 6 Fe, 1 Mn)
	[Inconel (active)
	[Nickel (active)
	Tin
	Lead
	Lead-tin solders
	[18-8 Mo stainless steel (active)
	[18-8 stainless steel (active)
	Ni-Resist (high Ni cast iron)
	Chromium stainless steel, 13% Cr (active)
	[Cast iron
	[Steel or iron
	2024 aluminum (4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)
Active or anodic	Cadmium
	Commercially pure aluminum (1100)
↓	Zinc
	Magnesium and magnesium alloys

קורוזיה (שיתוך) (Corrosion) - מצב של התדלדלות חומר בעקבות תגובה עם הסביבה שבה החומר נמצא (תהליך אלקטרוכימי).

קורוזיה יכולה להתרחש במגוון מתכות כגון: אלומיניום, נחושת, בדיל, טיטניום, מגנזיום, פלדה, ברזל יציקה.

ההבדל בקורוזיה של סוגי מתכות שונים הוא בתוצרי הקורוזיה, וקצב התפשטות הקורוזיה. תוצרי הקורוזיה במתכות שונות:

- אלומיניום – אלומינה.
- מגנזיום – מגנזיה.
- נחושת – פטינה.
- ברזל/פלדה – חלודה (הידרוקסיד הברזל).

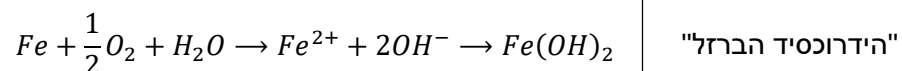
צורת ההתקפה הקורוזיבית תלויה בגורמים שונים של המתכת, תנאי העובדה, האופי הכימי של הסביבה.

קורוזיה איננה תמיד הרסנית, ובמקרים מסויימים היא דווקא מועילה, לדוגמה סוללה היא בעצם תא-גלווני, שבתהליכי קורוזיה למעשה מייצרת זרם חשמלי. תהליך אלקטרוכימי מועיל: ציפויים, איכולים.

חלודה (Rust) - מקרה פרטי של קורוזיה שמתרחש במתכות ברזליות – פלדות, ברזל יציקה. חלודה נוצרת כתוצאה תגובה כימית של התחמצנות ברזל, בתהליך זה אטומי הברזל מגיבים עם אטומי החמצן (שנמצאים במים או בלחות שבאוויר). אטומי הברזל מוסרים אלקטרונים ונהפכים ליונים, האלקטרונים שנמסרו עוברים לחמצן וביחד עם מימן נוצר "הידרוקסיד הברזל" $Fe(OH)_2$, הברזל ממשיך להתחמצן ונצרת תרכובת Fe_2O_3 שזה בעצם החלודה. בסיכומו של תהליך במקום פלדה חזקה מקבלים חלודה מתפוררת (כלומר התדלדלות חומר).

תכונה גרועה נוספת של החלודה היא שהחלודה איננה מונעת את המשך התחמצנות הברזל מכיוון שהיא חדירה למים ולאוויר ולכן הברזל ממשיך להתפורר ולהחליד עד שהוא נהפך כולו לחלודה. קצב התפשטות קורוזיה נמדד ביחידות של מילימטרים-בשנה, ומושפע מטמפרטורה, סוג הסביבה הכימית.

דוגמה להתחמצנות של ברזל ($Fe = Iron$) עם מים, המים מכילים מולקולות של חמצן, וביחד עם הנוכחות של אטומי הברזל מתרחשת תגובה כימית – שבה הברזל מוסר אלקטרונים (מחזר) ונהפך ליון, האלקטרונים שנמסרו עוברים לחמצן וביחד עם המימן נוצר



הידרוקסיד- תרכובת המכילה את היון OH^- (בסיסים).

הקורוזיה הנפוצה ביותר של ברזת מתרחשת בסביבה לחה בנוכחות חמצן.

בד"כ מתפתחים על פני אותה המתכת אזורים אנודיים ואזורים קטודיים.
באזורים אנודיים – נאכל הברזל.

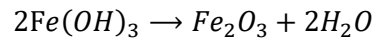
באזור הקטודיים – מתרחשת תגובת החיזור של החמצן ליוני הידרוקסיד.

באותו זמן יוני הברזל Fe^{2+} נעים דרך האלקטרוליט (תמיסה מוליכה) לפני השטח,

יוני הברזל נעים מהאנודה דרך התמיסה, לעבר האזור הקטודי מתחברים ליוני ה- OH^- ויוצרים

"הידרוקסיד-הברזל" $Fe(OH)_2$

הברזל ממשיך להתחמצן ע"י O_2 ל Fe^{3+}



התרכובת שנוצרה היא מה שאנחנו מכירים כ-חלודה.

חלודה (Rust) – חומר שנוצר כאשר תרכובות של ברזל עוברות קורוזיה בנוכחות מים וחמצן.

זוהי תערובת של תחמוצות והידרוקסידים.

החלודה היא אחר מתוצרי התהליך של קורוזיה, בדרך כלל אין היא מופיעה במקום ההתקפה

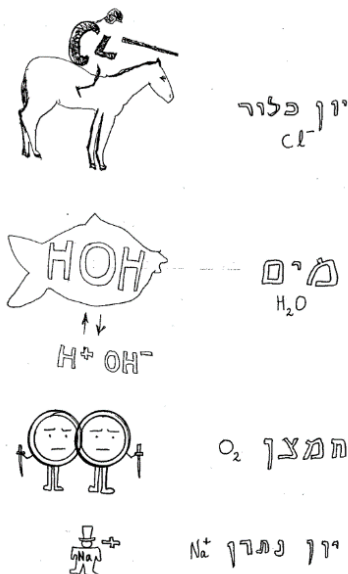
הקורוזיבית שבה נאכלת מתכת הברזל.

התהליך שמתואר לעיל יכול להתחיל במשקעי טיפות מים בלתי אחיד, שכבת מים, לחות אחידה,

מאמצים ועוד.

גורמים קורוזיביים

- יוני כלור (חומצות, אקונומיקה).
- מים.
- חמצן (אוויר, לחות, מי חמצן).
- יוני נתרן (בסיסים, סודה קאוסטית, מלח בישול).



צירוף 3,7 - הסכימה הערייכת

פסיבציה

שכבה טבעית שנוצרת על פני המתכת ומגינה עליו מפני קורוזיה. קיימות מתכות ואל מתכות מסויימות שבסביבה מסויימת מפסיקות להגיב כימית והופכות להיות אדישות לסביבה הקורוזיבית. התופעה הזאת נקראת פסיבציה, תופעה שבה נוצרת שכבה דקה טבעית על פני השטח שמשמשת כמגן עבור החומר כנגד המשך התחמצנות.

אלומיניום לדוגמא עמיד מאוד בפני קורוזיה בסביבות רבות, בזכות שכבת הפסיבציה (תחמוצת טבעית) שנוצרת עליו. במידה והשכבה הזו נפגמת, מתרחש תהליך טבעי ומהיר של החלמה ונוצרת מחדש שכבת פסיבציה.

יחד עם זאת עבור סביבות קשות בעלות פוטנציאל אלקטרוכימי גבוהה, אלומיניום עובר ממצב פסיבי למצב אקטיבי ועובר תהליך של קורוזיה בקצב של עד פי 100,000 .

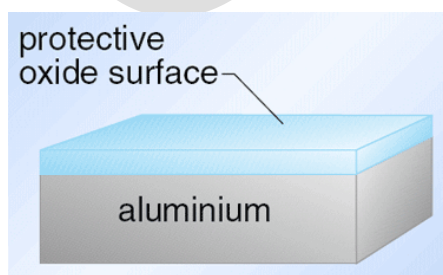
שכבת פסיבציה טבעית של אלומיניום

נתי אלומיניום מאופיינים בשכבת הגנה טבעית כנגד קורוזיה מתמשכת. שכבת ההגנה נקראת "שכבת פסיבציה", ובמקרה של אלומיניום השכבה עשויה מתחמוצת האלומינה Al_2O_3 . השכבה נוצרת באופן אחיד על פני המתכת, בעובי מיקרוני, והיא נוצרת מיידית בזמן 0 כאשר האלומיניום נחשף לחמצן. במידה והשכבה נפגמת (שריטה, שחיקה), מתרחש תהליך טבעי ומהיר של החלמה, והשכבה נבנית מחדש באזור השחיקה. שכבת האלומינה מגיעה לעובי מסויים ומשם מפסיקה לגדול, ובכך מגינה על האלומיניום מפני התחמצנות נוספת.

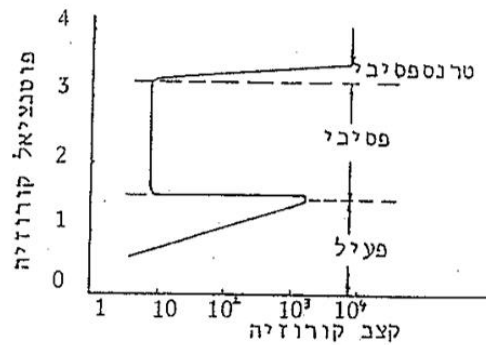
תכונות של תחמוצת האלומינה:

- צבעה אפור בהיר.
- מבדדת חשמלית.
- טמפרטורת התכה מאוד גבוהה.
- קשיות גבוהה.

אלומינה במבנה חד-גבישי (קריסטל) זה זכוכית ספיר – שזו זכוכית שמשמשת עבור יישומים שדורשים שקיפות יחד עם חוזק גבוהה, וקשיות גבוהה. לדגומא זכוכית עבור שעונים, ראשים של טילים.



תיאור סכמתי של תהליך קורוזיה במתכות בעלי שכבת פסיביציה



ציור מס' 2.8 - תיאור קצב קורוזיה של מתכת עם תכונה של פסיביות

מהציור ניתן לראות שבמתכות בעלי שכבת פסיביציה (אלומיניום, פלב"מ), תהליך הקורוזיה מתחלק ל 3 תחומים.

תחום פעיל – בתחום זה, המתכת עוברת קורוזיה באופן דומה למתכת רגילה ללא שכבת פסיביציה. קצב הקורוזיה תלוי לינארית בפוטנציאל הקורוזיה (תנאי הסביבה, חומציות, פוטנציאל גלוני וכולי..).

תחום פסיבי – בנקודה מסויימת, כאשר פוטנציאל הקורוזיה מגיעה לערך מסויים, קצב הקורוזיה קטן באופן דרסטי, ומגיע לערכים מאוד נמוכים עד כדי זניחים. הסבר לתופעה זו היא מכיוון שבנקודה זו נוצרה שכבת תחמוצת המגינה על המתכת מפני המשך תהליך הקורוזיה.

תחום טרנספסיבי – כאשר הפוטנציאל הקורוזיה גדל לערכים גבוהים, מתחיל תהליך של עלייה בקצב הקורוזיה, אך באופן קצת מתון יותר. דוגמא לתחום זה, היא כאשר נציב פלב"מ בסביבה כלורידית, שהיא בעלת פוטנציאל קורוזיה גבוהה, ולכן הפלב"מ למרות שאנו מכירים אותו בתור מתכת שלא מחלידה בתנאים רגילים, פתאום נתקף בקורוזיה.

גורמים המשפיעים על קצב קורוזיה

טמפרטורה – רוב התגובות הכימיות מתרחשות בקצב מהיר יותר עם עליית הטמפרטורה ולכן עם עליית הטמפרטורה, קצב הקורוזיה גדל.

הרכב כימי של הסביבה – סביבה חומצית גורמת לעלייה בקצב הקורוזיה בגלל ריכוז גבוה של יונים ניידים.

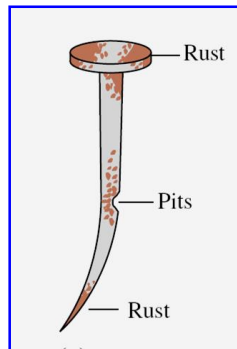
$$PH \text{ מ-} 8.5 \sim 8$$

מהירות הזרם – ברוב המקרים עלייה במהירות הזרם מגבירה את קצב הקורוזיה.

עיבוד פלסטי – חומרים שעבור תהליכים של עיבוד פלסטי (Cold work) חשופים יותר לקורוזיה מאשר חומרים שעבור עיבוד בחום בלבד (מצב Annealed).

לדוגמא מסמר שיוצר בעיבוד פלסטי.

ראש המסמר עבר דפורמציה גדולה יותר (מכיוון שהוא עוצב ע"י חבטה) לעומת קנה המסמר, וכתוצאה מכך, ישנו הבדלים בפוטנציאלי הכימי בין ראש המסמר לבין קנה המסמר. כתוצאה מכך, הברזל יעבור קורוזיה, כך שהראש שלו ישמש כאנודה, והקנה ישמש כקטודה.



יחסי שטחים – היחס בין שטח האנודה לשטח הקטודה, משפיע על קצב הקורוזיה. כאשר הקטודה היא גדולה, והאנודה היא קטנה, קצב הגורוזיה גדל.

קצב הקורוזיה יכול להיות גדול עד פי 1000 לעומת המצב שבו יחסי השטחים הם זהים.

דוגמא

בניסוי מסויים, הניחו שתי דגמים באותם תנאי סביבה (סביבה ימית), למשך תקופת זמן זהה (15 חודשים).

דגם אחד היה בנוי מלוחיות נחושת, כאשר המסמרות המחברות את הלוחיות עשויות פלדה. דגם שני, היה בנוי מלוחיות פלדה, כאשר המסמרות המחברות את הלוחיות עשויות נחושת.

בתום הניסוי, הדגם הראשון שהיה בנוי מלוחיות נחושת המחוברו באמצעות מסמרות פלדה, מסמרות הפלדה נאכלו לגמרי כתוצאה מקורוזיה.

מכיוון שהנחושת היא אצילה יותר בסביבה ימית לעומת פלדה, הפלדה שימשה כאנודה, ומסרה אלקטרונים לנחושת, ולכן נאכלה לחלוטין.

לעומת בזאת, בדגם השני, לוחיות הפלדה עברו קורוזיה, אך המסמרות עדיין נשארו שלמות והמשיכו להחזיק את הלוחיות גם תחת עומס.

כאשר מצפים מתכת במתכת אצילה (המתכת האצילה משמשת כציפוי הגנה) יש לדאוג שלא יהיה מגע גלוני בין המתכת האקטיבית למתכת האצילה.

לדוגמא: ציפוי פלדה רגילה בפלב"מ, יש לדאוג לבידוד בין הפלדה הרגילה לפלב"מ.

חישוב קצב קורוזיה

קצב הקורוזיה נמדד ביחידות mpy, שזה Mills Per Year

$$1 \text{ mpy} = 0.0254 \frac{\text{mm}}{\text{yr}} = 25.4 \frac{\mu\text{m}}{\text{yr}} = 2.90 \frac{\text{nm}}{\text{hr}} = 0.805 \frac{\text{pm}}{\text{sec}}$$

$$\text{CorrsionRate} = \frac{534W}{DAT}$$

נוסחא לחישוב קצב הקורוזיה

קצב קורוזיה $\text{CorrsionRate}_{[\text{mpy}]}$

מסה שהופחתה מהחומר $W_{[\text{mgram}]}$

צפיפות החומר $D_{\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]}$

שטח $A_{[\text{cm}^2]}$

זמן חשיפה לתנאים הקורוזיביים $T_{[\text{hour}]}$

Table 4-5 Comparison of mils penetration per year (mpy) with equivalent metric-rate expressions

Relative corrosion resistance*	Approximate metric equivalent†				
	mpy	$\frac{\text{mm}}{\text{yr}}$	$\frac{\mu\text{m}}{\text{yr}}$	$\frac{\text{nm}}{\text{hr}}$	$\frac{\text{pm}}{\text{sec}}$
Outstanding	< 1	< 0.02	< 25	< 2	< 1
Excellent	1–5	0.02–0.1	25–100	2–10	1–5
Good	5–20	0.1–0.5	100–500	10–50	5–20
Fair	20–50	0.5–1	500–1000	50–150	20–50
Poor	50–200	1–5	1000–5000	150–500	50–200
Unacceptable	200 +	5 +	5000 +	500 +	200 +

*Based on typical ferrous- and nickel-based alloys. For more expensive alloys, rates greater than 5 to 20 mpy are usually excessive. Rates above 200 mpy are sometimes acceptable for cheap materials with thick cross sections (e.g., cast-iron pump body).

†Approximate values to simplify ranges.

סוגי קורוזיה

- 1) קורוזיה אחידה (Uniform Corrosion).
- 2) קורוזית גימום (Pitting).
- 3) קורוזיה גלוונית (Galvanic Corrosion).
- 4) קורוזיה בין גרעינית (Intergranular Corrosion).
- 5) קורוזיית נקיקים (Crevice Corrosion).
- 6) קורוזיה – ארוזיה (שחיקה) (Erosion Corrosion).
- 7) קורוזיית מאמצים (Stress Corrosion Cracking).
- 8) קורוזיה סלקטיבית (Selective leaching / Dealloying).
- 9) קורוזיה ביולוגית (Biological Corrosion).

קורוזיה אחידה/כללית (Uniform Corrosion)

קורוזיה המתרחשת כאשר מתכת נמצאת בסביבה קורוזיבית, למשל טבילת מתכת בסביבה חומצית. התגובה האנודית והתגובה הקטודית מתרחשות באופן אקראי על פני השטח. האזורים הקטודיים והאנודיים מתחלפים עם הזמן, כך שמיקום הקורוזיה מתחלף במרחב ובזמן, התוצאה קורוזיה הומוגנית ואחידה. קצב הקורוזיה ניתן לחישוב, ולכן היא פחות מסוגנת מכיוון שניתן לעקוב ולצפות את הקורוזיה.

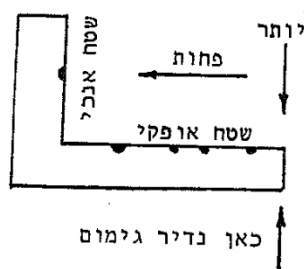
פתרונות אפשריים למניעת קורוזיה אחידה

- ביצוע ציפויים – צביעה, גיליון (פלדות), אנודיזציה (אלומיניום).
- הגנה קטודית – שימוש באנודת הקרבה, שהיא פעילה יותר מהמתכת של המוצר, כגון אנודת קרבן מגנזיום, אבץ, אלומיניום.
- שיפור תנאי סביבה - מניעת אחסון המוצר בתנאים רטובים, לחים, או במגע עם חומצות.
- מניעת היווצרות מים עומדים ע"ג החלק.
- שימון – לנקות ולשמן באופן תקופתי.

קורוזיית גימום (Pitting Corrosion)

סוג של קורוזיה שגורמת לגומות/חורים בפני שטח המתכת. קורוזיה זו מסוכנת כאשר בציוד מסויים, נוכחות של חור עלולה להיות הרסנית (צנרת, מיכלי לחץ). לעיתים קרובות קשה לגלות קורוזיית גימום, מכיוון שהגומות קטנות, ולפעמים מכוסות בתוצרי קורוזיה.

6.4 השפעת עמדה: לכוח משיכת כדור הארץ יש תפקיד (ציור 3.5)



ציור 3.5 - השפעת עמדה על מיקום הגימום

היווצרות הגומות הוא תהליך אוטוקוליטי, כלומר התהליך מאיץ את עצמו במהלך ההתרחשות. כאשר נוצרת גומה במתכת, המתכת מתמוססת והופכת ליון. בגלל היווצרות היונים, אזור הגומה נהיה טעון חיובית, כתוצאה מכך יונים שליליים נמשכים על מנת לדאוג שהאזור יהיה נייטרלי. היונים שמגיעים מזרזים את תהליך הקורוזיה. ציור: היווצרות גומה כתוצאה מקורוזיית גימום, במתכת הנמצאת בתמיסה כלורידית.

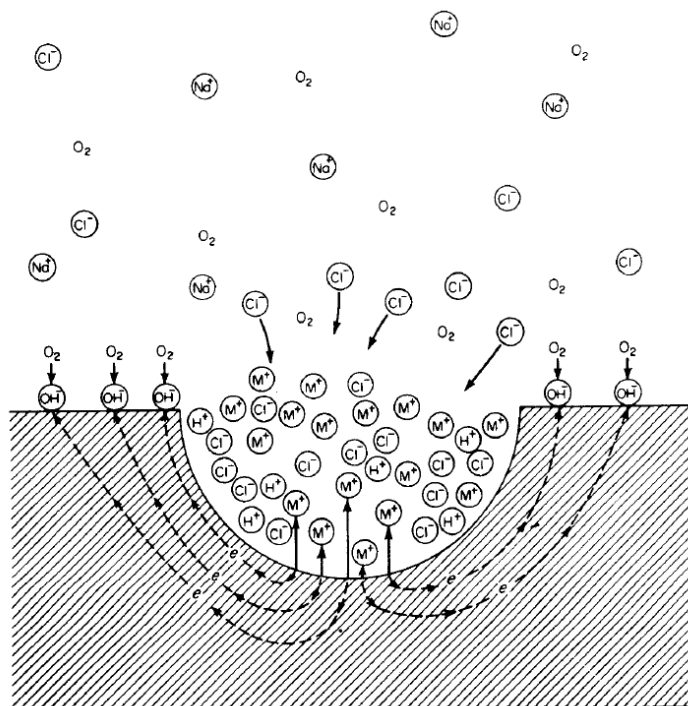


Figure 3-19 Autocatalytic processes occurring in a corrosion pit.

*U. R. Evans, *Corrosion*, 7:238 (1951).

קורוזיית גימום נפוצה ב: פלב"מ בסביבה כלורידית, נחושת בסביבה מימית, בסגסוגות אלומיניום שעבור טיפול תרמי להקשייה (טיפול המסה+זיקון), הרגישות לקורוזייה עולה, ובפרט לקורוזיית גימום.

על מנת לדעת האם החומר רגיש לקורוזיה, מבצעים לו בדיקה החוזה את מידת העמידות שלו בפני קורוזיה.

מהלך הבדיקה

טובלים את החומר בתמיסת מלח, ומי חמצן, מים רגילים. משאירים את הדגמים בתמיסה למשך 24 שעות, ולאחר מכן מבצעים להם חתכים מטאלוגרפיים, ובודקים האם החומר עבר קורוזיה. אם בחומר מתגלה קורוזיה, אז החומר אכן רגיש. הבדיקה בעצם מהווה הדמייה של שירות ממושך בתנאים רגילים, ובעזרה ניתן לחזות בזמן קצר מה יקרה לחומר לאחר שירות ממושך.

דוגמא להיווצרות קורוזיית גימום:

מלח ששוקע בסיר פלב"מ גורם לתופעה של קורוזיית גימום (Pitting). על מנת למנוע את התופעה, ניתן לערבב את המלח טוב בסיר, ועל ידי כך למוסס אותו בתמיסה ולמנוע ממנו לשקוע לתחתית הסיר. בנוסף, ניתן לבצע ציפוי אמייל (זיגוג Glazing) על תחתית הסיר, ובכך ולהגן על הפלב"מ מקורוזיה כתוצאה מנוכחות משקעים.

קורוזיה גלוונית (Galvanic Corrosion)

קורוזיה המתרחשת כתוצאה מקישור של שתי מתכות שונות (או יותר) ע"י מוליך כלשהוא. המוליך יכול להיות תמיסה אלקטרוליטית, או מגע ישיר בין המתכות. דוגמא – ברגי פלדה הנמצאים במגע עם פליז עוברים קורוזיה בסביבה ימית.

קורוזיה גלוונית יכולה להתרחש גם בין שני חלקיים העשויים מאותו החומר מאותו הנתך אך בעלי פאזות שונות – פאזה שונה הנמצאת במטריצה מתכתית יוצרת אזורים אנודיים ואזורים קטודיים באותה המתכת. דוגמא מבנה אויטקטי של פלדה – הצמנטיט משמש כקטודה וגורם לחימצון הברזל (פריט).

כאשר שתי מתכות בעלי פוטנציאל אלקטרוכימי מוצמדות אחת לשניה, בגלל הפרש הפוטנציאלים והמוליכות החשמלית של המתכות, מתרחשת קורוזיה, כאשר אחת המתכות משמשת כאנודה, והשניה כקטודה. המתכת האצילה פחות (אקטיבית) משמשת כאנודה (מוסרת אלקטרונים), והמתכת האצילה יותר משמשת כקטודה (מקבלת אלקטרונים). ככל שהמתח גבוה יותר, כך קצב הקורוזיה מהיר יותר.

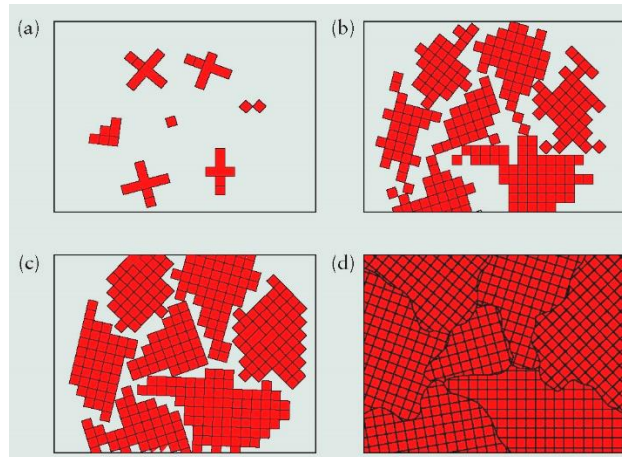
פתרונות אפשריים למניעת קורוזיה גלוונית

- כאשר במוצר מסויים יש מגע גלווני בין מתכות, יש לבודד את המתכות, ע"י אטם, או ציפוי.
- לא להצמיד מתכות שיש להם פוטנציאל אלקטרוכימי גבוה מאוד (רחוקים אחד מהשני בשורה הגלוונית).
- כאשר מחברים שתי מתכות, נעדיף שהמתכת הגדולה תהיה פעילה, והמתכת הקטנה תהיה אצילה.

קורוזיה בין גרעינית (Intergranular corrosion)

המיקרו-מבנה של המתכות וסגסוגות מורכב מגרעינים, כאשר הגרעינים מופרדים ע"י גבולות גרעיניים.

גבולות גרעיניים נוצרים כאשר החומר מתמצק (הופך מנוזל למוצק), מכיוון שבמהלך ההתמצקות נוצרים גרעינים קטנים שנוצרים במקומות שונים מרוחקים זה מזה (נוקלאוסים). הנוקלאוסים הולכים וגדלים במבנה גבישי מסודר ויוצרים גרעין. כאשר הגרעינים פוגשים זה את זה האוריינטציה שלהם במרחב שונה ונוצר חומר רב-גבישי. תחום המפגש בין הגרעינים נקרא גבולות גרעיניים.



קורוזיה בין גרעינית זו צורה מקומית של קורוזיה שמתרחשת בגבולות גרעיניים של המתכת. קורוזיה בין גרעינית גורמת להחלשת החומר, ובמקרים מסוימים להתקלפות החומר (אקספוליציה). ההתקפה בד"כ מתרחשת בקצב מהיר, חודרת עמוק לתוך המתכת וגורמת לכשל. הקורוזיה הבין גרעינית אינה חודרת/פוגעת בגרעינים, אלא מתפשטת רק לאורך הגבולות הגרעיניים. במקרים נדירים הקורוזיה יכולה סביב גרעין מסוים (לאורך כל הגבולות הגרעיניים שלו) ולגרום לניתוק.

סיבות לקורוזיה בין גרעינית

- מזהמים בגבולות גרעין.
- העשרה של אחד המסגסגים בגבולות גרעיניים.
- דילול של אחד המסגסגים בגבולות גרעיניים.
- הבדלים מטאלורגיים במטריצה מתכתית יכולים לגרום לקורוזיה בין גרעינית.

גורמים אלו מובילים ליצירת תא גלווני במטריצה המתכתית וזה גורם לקורוזיה.

הגבולות הגרעיניים הם מעט יותר ריאקטיביים לעומת המטריצה, ולמרות זאת, בד"כ הגבולות גרעיניים אינם מהווים מוקד מיוחד להתפתחות קורוזיה במתכות. אולם בתנאים מסוימים, הגבולות הגרעיניים נהפכים למאוד ריאקטיביים ומתרחשת קורוזיה בין גרעינית.

קורוזיה בין גרעינית אופיינית ב: אלומיניום (בעיקר משפחה 2), פלב"מ (סנסיטיזציה), נתכי ניקל.

פתרונות אפשריים למניעת קורוזיה בין גרעינית

- הימנעות משימוש בנתכי אלומיניום ממשפחה 2xxx שמכילים נחושת.
- שימוש בנתכי אלומיניום שעברו טיפול המסה בלבד, מכיוון שאלו כמעט חסינים מפני קורוזיה בין גרעינית SCC. (אך טיפול זה אינו מאפשר השגת חוזק גבוהה)

סנסיטיזציה בפלב"מ (Sensitization)

סנסיטיזציה - דילול של מסגס באזור מסויים במתכת. דילול של מסגס באזור מסויים גורם לשינוי בפונטנציאל אלקטרו כימי של אזור מסויים במתכת ולכן באזור זה נוצר תא גלווי שגורם לקורוזיה. דוגמא נפוצה של "סנסיטיזציה" ניתן למצוא בנתכי פלב"מ.

בנתכי פלב"מ בעלי ריכוז פחמן הגבוהה מ 0.03%, שעברו חימום לטמפ' בטווח $425^{\circ} - 870^{\circ}$, כתוצאה מהחימום הפחמן נודד לגבולות הגרעיניים מתקשר עם הכרום ונוצרים מתבדלים של כרום: $Cr_{23}C_6$ כתוצאה מהיווצרות המתבדלים, ריכוז הכרום באזור שליד הגבולות הגרעיניים קטן ומתקבל אזור דל-כרום.

הפחמן מתלכד עם 4 אטומים של כרום ויצר קרביד. הקרביד גורם לאי-רציפות בשכבת הפסיביציה. באזורים האלו ישנו דילול של הכרום, ולכן אזור זה נתקף בקורוזיה בין גרעינית. אזור דל בכרום הופך לאזור אנודי ביחס לגרעינים ומתרחשת קורוזיה מוגברת באזור הגבולות הגרעיניים. קורוזיה בין גרעינים גורמת להווצרות חורים/סדקים בחומר, ובסופו של דבר לכשל.

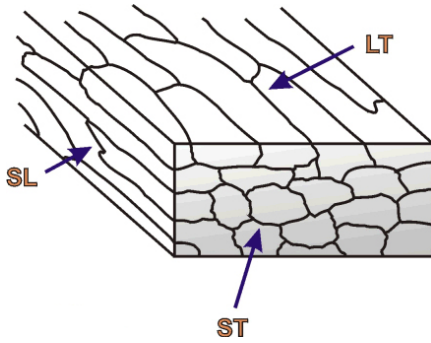
תופעה זו נפוצה כאשר מרתכים נתכי פלב"מ מקבוצה שאינה מתאימה לריתוך. קבוצת הפלב"מ שכן מתאימה לריתוך היא קבוצה שמסומנת בסיומת L (Low Carbon) שמכילה ריכוז פחמן נמוך במיוחד (מקס' 0.03%), דוגמא: 304L, 316L, 317L. פלדות בעלות ריכוז פחמן נמוך במיוחד, יקרות יותר.

בנוסף קיימים פלב"מ מיוחדים שפותחו לריתוך, אשר מכילים מסגסים כגון ניאוביום וטנטלום. מסגסים אלו לוכדים את הפחמן, ומונעים ממנו להתבדל עם הכרום בגבולות הגרעיניים ולגרום לסנסיטיזציה.

קורוזיית קילוף (אקספוליאציה) (Exfoliation Corrosion)

אקספוליאציה – קילוף היא סוג של קורוזיה בין גרעינית. אקספוליאציה נוצרת בנתכי אלומיניום בעלי חוזק גבוהה שעברו תהליך של אקסטרודיה - משיכה, או תהליך ערגול.

בתהליכים אלו המיקור-מבנה של המתכת מקבל מבנה גרעינים משוך/מוארך. ולכן בנתכים אלו הקורוזיה הבין גרעינית גורמת להפרדה בין הגרעינים המוארכים וגורמת לקילוף של שכבות שלמות מהמתכת. קורוזיית קילוף מאופיינת בהתנפחות הנוצרת כתוצאה מהימצאותם של תוצרי קורוזיה בין שכבות המתכת.



קורוזיה מסוג זה בד"כ מתחילה באזורי קצוות של גרעינים לדוגמא: קצוות חדים, קדחים, שגמים, חריצים. כיוונה מקביל לפני השטח.

קורוזיית נקיקים (Crevice Corrosion)

קורוזיה מקומית שנוצרת במקומות ששהם ישנו מחסור בחמצן.

קורוזיה זו קשורה בתמיסות שקטות הנמצאות בתוך נקיקים, מתחת לאטמים, מתחת לראשי ברגים, במרווחים קטנים בין חלקים.

קורוזיה אופיינית שמרחשת באלומיניום, ופלדות.

פתרונות אפשריים למניעת קורוזיית נקיקים

- שימוש באטמים מבודדים (שרולים, שייבות, אטמי טפולן).
- איטום נקיקים בסיליקון.
- בנתכי אלומיניום – ביצוע אנודיזציה (ציפוי מבודד).
- תכנון נכון של ניקוז נוזלים במוצר המתוכנן (חורים, שיפועים).

קורוזיה אירוזיה (Erosion Corrosion)

קורוזיה הנגרמת כתוצאה מחיכוך עם גורם מכני כלשהו, כגון: שפשוף, זרימת נוזלים, זרימת חלקיקים.

הגורמים המכניים אינם אלו שגורמים לקורוזיה, אלא מאיצים את קצב הקורוזיה. למשל בזרימה, החל מקצב זרימה מסוים, פתאום קצב הקורוזיה מתחיל לעלות בצורה חדה. בכל המקרים האלו, הגורם המכני שובר את השכבה החיצונית של החומר, שמכיל את תוצרי הקורוזיה, שבד"כ מאיטים את קצב הקורוזיה. הנוזל לא חייב להיות נוזל, אלא יכול להיות גם גז. התופעה מחריפה עוד יותר, כאשר הזרם מכיל חלקיקים אברזיביים. רוב המתכות רגישות לקורוזיה ארוזיה, כאשר הם משרתות בתנאים הגורמים לשחיקה מתמדת של פני השטח.

פתרונות אפשריים למניעת קורוזיה אירוזיה

- שימוש באינהיביטורים – תוספים שנועדו לספוח אליהם את גורמי הקורוזיה, ולמנוע מהם להצטבר על פני שטח המתכת.
- שיפור טיב פני שטח של החלקים בנקודות הרגישות לארוזיה (מדחפים, צנרת מעוקלת (ברכיים)).
- ביצוע כיפופים לא חדים בצנרת.
- ביצוע ציפוי (לדגומא בצנרת פלדה שמעבירה מים, משתמשים בציפוי פנימי של מלט)
- נעדיף לתכנן מערכת בעלת זרימה למינרית ולא זרימה טורבלנטית.

קביטציה (מיעור) (Cavitation)

תופעה שבה נוצרות בועות אוויר בנוזל.

הבועות נעות עם הנוזל, וכאשר מגיעות לאזור לחץ גבוהה, הבועות קורסות ונפלט מהם פרץ חזק של סילון, שגורם לאיכול משטחים בקרבת ההתפרצות. התופעה היא תופעה מקומית שמתרשחת במקומות שנוצר תת לחץ, אופייני במשאבות, נקודות היצרות בצנרת, נקודות גבוהות בצנרת (סיפון).

קורוזיית מאמצים (Stress Corrosion Cracking)

קורוזיית מאמצים מאופיינת בהשתתפות גורם מכני בשילוב עם גורם כימי.

להתרחשות קורוזיית מאמצים נדרשים להתקיים 4 תנאים יחד:

1. סגסוגת הרגישה לקורוזיית מאמצים.
2. מאמצי מתיחה.
3. סביבה מסויימת התוקפת את הסגסוגת (אזורים רטובים, גשומים, קורוזיה זו מתרחשת פחות באזורים צחים כמו הנגב).
4. זמן.

קורוזיית מאמצים נבדלת מסוגי הקורוזיה בכך שאין סימני קורוזיה – תוצרי הקורוזיה אינם בולטים לעין, והמידות של המתכת אינה מתשנה. אולם המתכת נסדקת בסדקים פריכים, כלומר ללא דפורמציה פלסטית.

המאמצים הם מאמצי מתיחה בלבד, (לא מאמצי לחיצה), ומקורם מהפעלת כוחות בזמן השירות או מאמצים שיוריים כתוצאה מתהליך הייצור (עיבוד פלסטי, טיפול תרמי, ריתוך).

סגסוגות הרגישות לקורוזיית מאמצים: פליז 30-70, אלומיניום משפחה 7.

קורוזיית מאמצים בפליז נקראת Season Cracking מכיוון שהסידוק אינו מתרחש מיד, אלא לאחר חשיפה ממושכת לסביבה קורזיבית.

קורוזיה זו ניתן לזיהוי בקלות לאחר כשל, באמצעות בדיקת דגם מטאלוגרפי במיקרוסקופ.

פתרונות אפשריים למניעת קורוזיית מאמצים

- ביטול הגורם הקורוזיבי.
- ביצוע שחרור מאמצים (הרפייה) לחלק, ועל ידי כך להוריד את הרגישות שלו לקורוזיית מאמצים.
- ביצוע שחרור מאמצים גם למתכת שעברה עיבוד שבבי, מכיוון שעיבוד שבבי מכניס מאמצים לחומר, ולכן מעלה את הרגישות לקורוזיה.
- בחירת סגסוגת הפחות רגישה לקורוזיית מאמצים (פליז- נבחר טומבק, אלומיניום-נבחר משפחה 6xxx).

קורוזיית התעייפות (Fatigue Corrosion)

כאשר מתכת מועמסת באופן מחזורי, החוזק של המתכת קטן כתלות במספר המחזורים, והמתכת נשברת במאמץ נמוך מזה הדרוש לשבירה תחת עומס סטטי.

תהליך זה של ירידת החוזק מכונה התעייפות (Fatigue).

אלומיניום סובל מאוד מהתעייפות, מכיוון שכתלות במחזורי העמסה, החוזק שלו יורד עד אשר הוא נכשל, לעומת פלדה, שבעבור מספר מחזורים מסויים, מגיעה לחוזק התעייפות רוויה, והחוזק אינו ממשיך לרדת, אלא נשאר קבוע.

קורוזיית התעייפות, בדומה לקורוזיית מאמצים, גורמת לסידוק המתכת בעומסים נמוכים.

Guyaros

קורוזיה סלקטיבית (דצינקציפיקציה) (Dealloying)

קורוזיה סלקטיבית של אבץ (Zinc) בפליז (Brass).

קורוזיה זו מופיעה בשתי צורות:

נקודות גדולות או קטנות על פני השטח – כאשר נוצרות נקודות אדומות על פני השטח של הפליז, התופעה נקראת Plug Type Dezincification, מכונה "פקקים". תופעה זו שכיחה יותר בנתכי פליז המכילים אחוז נמוך של אבץ (15%), ובסביבה בסיסית, ניטרלית, או מעט חומצית.

שינוי גוון צבע של כל פני השטח - Layer type Dezincification, מכונה דצינקציפיקציה שכבתית. תופעה זו נפוצה יותר בסוגי פליז המכילים אחוז גבוה של אבץ (30-40%), ובסביבה חומצית מוחלטת.

בעקבות הדצינקציפיקציה, האבץ בורח, והקושי של הפליז יורד, וגם החוזק שלו.

פתרונות אפשריים למניעת הקורוזיה

- שירות בסביבה יבשה.
- שימוש בנתך בעלת 1% בדיל, מוריד את הרגישות לקורוזיה סלקטיבית.
- בחירת נתך בעל קושי נמוך, מוריד את הרגישות לקורוזיה סלקטיבית, כלומר לא לבחור את הפליז במצב ההקשייה הגבוהה ביותר.
- בחירת נתך פליז "טומבק" שהוא עמיד יותר בפני קורוזיה.
- רכישת נתך באיכות טובה (ולא הזול ביותר) מכיוון שבנתך זה ככל הנראה האבץ מעורבב טוב יותר ומפוזר באופן אחיד בנתך, לעומת הנתכים הזולים שבהם האבץ לא מעורבב טוב, ולכן הם רגישים לקורוזיה סלקטיבית.
- אסור לאחסן פליז באוזרים שבהם ישנה נוכחות של אמוניאק, מכיוון שאמוניאק מאכלת נחושת ולכן פוגעת מאוד בפליז.
- אמוניאק קיים בשתן של פרות, וסוסים.

בדיקת רגישות לסידוק

בדיקת רגישות הפליז לסידוק, לפי תקן (ASTM B154) מניחים את נתח הנחושת בתמיסת כספית או אמוניאק, וממתינים כ-15 דקות. אם החומר הוא משוך, או רגיש לסדקים, הסדק יתפתח מהר, ונוכל לראות אותם. אם החומר לא רגיש לסידוק, אז לא יתפתחו סדקים. הסדקים יכולים להיות מסוג בין גרעיני, או סדק תוך גרעיני.

פליז (Brass) – נחושת + אבץ.
סוגי נתכים נפוצים:

- פליז 70-30 (70% נחושת, 30% אבץ)
- פליז צהוב 60-40 (60% נחושת, 40% אבץ)
- פליז טומבק (85% נחושת, 15% אבץ)

פליז אינו ניתן להקשייה ע"י חיסום, ולצורך הקשייה והעלאת חוזק מבצעים לו עיבוד בקור. הסימון של פליז שעבר עיבוד בקור, הוא ע"י האות H, כאשר המספר אחרי ה H מסמל את דרגת ההקשייה.

במעבר בין כל דרגה, מדקקים את עובי החומר ב-11%.
(מצב מאוד משוך נקרא Springy)

ציפויים

ציפוי מתכות הוא תהליך מאוד נפוץ בתעשייה. ישנם מגוון רחב של ציפויים, כאשר ההבדל הוא בתאימות לסוג המתכת שעוברת ציפוי, ומטרות הציפוי.

כאשר מבקשים לבצע ציפוי לחלק כלשהוא, יש לפרט את סוג הציפוי, ולצרף את התקן שמגדיר את הציפוי.

מגוון מטרות הציפוי

- דקורטיביות.
- הגנה מפני קורוזיה.
- שיפור עמידות בשחיקה.
- בידוד חשמלי.
- שיפור מגע חשמלי.
- מניעת רעילות במגע עם מזון.
- שיפור טיב פני שטח.

סוגי ציפויים

- ציפויים כימיים.
- ציפויים אלקטרו-כימיים (אלקטרוליזה).

ציפויים כימיים

מתבצעים בתמיסות חמות המכילות את מלחי המתכת בה רוצים לצפות את החלק, ללא העברת זרם חשמלי דרך התמיסה.

דוגמא: מגן פוספט (השחרה), אלקטרוליס ניקל, אלקטרוליס-זהב, אלקטרוליס-נחושת, פסיבציות.

ציפוי אלקטרוליזה

בתהליך זה משתמשים בתמיסה מוליכה, אלקטרודה, וקטודה. מעבירים זרם חשמלי בין האלקטרודות, וע"י כך החלק המצתפה הוא הקטודה (קוטב שלילי). האנודה עשויה בד"כ מאותה מתכת של הציפוי. התמיסה מכילה מלחים העשויים מהמתכת של הציפוי. המלח מומס במים ונשבר לחלקים קטנים, בצורה כזו שהנוזל נראה צלול ללא משקעים. כאשר עובר זרם חשמלי (DC זרם ישר) במערכת, הקטיונים והאניונים שנמצאים בתמיסה נעים לכיוון הקטודה, ומצפים אותה במתכת הציפוי.

גורמים המשפיעים על טיב ועובי הציפוי.

- הכנות השטח לפני הציפוי. (ניקוי משומנים, מזיהומים)
- צפיפות הזרם.
- שטח אנודה-קטודה.
- זמן תהליך הציפוי.
- ריכוז תמיסת הציפוי.
- טמפרטורה.
- מרחק האנודה מהקטודה.
- מגעים טובים במעגל האלקטרוליזה.

צביעה

צבע הוא סוג של ציפוי, המשמש גם ליופי, וגם להגנה על המתכת מפני מגע עם הגורמים הקרוזיביים בסביבה.

צמנטציה

תהליך של פחמון פני השטח, על מנת להעלות קושי, ולשפר עמידות בשחיקה. ע"י פחמון ניתן לגבל חלקים שהם רכים מבפנים, וקשים מבחוץ. (מעולה עבור גלגל"ש)

ציפוי נחושת

ציפוי נחושת משמש כציפוי עזר בתהליך אחר של ציפוי שנקרא צמנטציה. הנחושת אינה חדירה לפחמן, ולכן באזורים המצופים נחושת, הפחמן אינו חודר בזמן תהליך הצמנטציה ולכן הקושי באזורים אלו אינו עולה.

לדוגמא: גלגל שיניים שבו מעוניים ששטח השן יהיה בעל קושי רב, אבל הקדח שדרכו עובר הגל נדרש שיהיה רך. את הקדח נצפה בנחושת, ואז נבצע ציפוי צמנטציה.

אלקטרוליס ניקל

ניקל מסוגסג עם 7% זרחן. ציפוי אלקטרוליס ניקל הכולל זרחן, מעלה את הקשיות של השכבה החיצונית. אלקטרוליס ניקל ללא זרחן, משמש כציפוי מקדים לציפוי כרום.

ציפוי כרום

בציפוי זה משתמשים בתעשיית הנשק, לדוגמא ציפוי פנימי של קנים של נשקים, על מנת ליצור טיב פני שטח מעולה, ועמידות בפני שחיקה.

מקדם החיכוך של הכרום הוא מאוד נמוך, ולכן משתמשים בציפי זה על מנת להקטין מקדם חיכוך.

תעשיית הרכב – המון חלקי רכב מצופים בכרום, במיוחד ברכבים אמריקאיים (טמבוניס, חישוקים, מראות, ידיות, חלקי פנים).

הציפוי הוא קשה ולכן אינו מתאים לתברג.

הכנה טובה לפני ציפוי כרום, הוא ציפוי ניקל, או ציפוי נחושת.

ציפוי אבץ (גיליון)

ציפוי אבץ הוא ציפוי הקרבה, הציפוי מתכלה עם הזמן, ובכך הוא שומר על המתכת מפני קורוזיה לתקופת זמן ממושכת (יכול להחזיק שנים).

ציפוי אבץ הוא מצוין עבור חלקים שנמצאים בתנאי שחיקה, כמו למשל תבריג. עובי הציפוי מומלץ הוא 12.5 מיקרון.

ניתן לבדוק עובי ציפוי אבץ ע"י שקילת החומר לפני ואחרי שהחומר נטבל בחומצת מלח, שגורמת להסרת הציפוי.

ציפוי אבץ (ASTM B633) + טבילה בבי כרומט, גורמת לציפוי לקבל גוון צבע צהבהב-אדמדם.

אם מבצעים ציפוי אבץ לפלדה שהקושי שלה מעל 31 רוקוול סי, יש לבצע לאחר הציפוי טיפול "אפייה" (Baking), על מנת למנוע פריכות מימנית.

ציפוי קדמיום

ציפוי קדמיום הוא ציפוי הקרבה.

ציפוי קדמיום יותר טוב מאבץ אך הוא רעיל, ולכן נמצא בשימוש מצומצם, בתעשייה ביטחונית.

ציפוי אלומיניום נקי

אלומיניום ממשפחה 1xxx, הוא בעל עמידות מעולה בפני קורוזיה.

ולכן הוא משמש כציפוי בחומרים מתכתיים, על מנת לספק הגנה מפני קורוזיה.

אלומיניום ממשפחה 1, בדרגת ניקיון מאוד גבוהה (99.9% אלומיניום), מסוגל לעמוד נגד קורוזיה, גם בסביבות מאוד חומציות.

ציפוי זהב

ציפוי זהב משמש הרבה בתחום האלקטרוניקה, על מנת למנוע התחמצנות של המגעים החשמליים, ובכך לשפר הולכה חשמלית.

קרט היא יחידה שמתאר דרגת טוהר.

זהב טהור (99.9% זהב) הוא זהב 24 קרט.

זהב 18 קרט, מכיל 75% זהב, והשאר מתכות אחרות (פלטינה, נחושת).

ציפוי בדיל

ציפוי שמשמש הרבה בתעשיית האלקטרוניקה,

הבדיל מוליך חשמל טוב, וניתך בטמפ' יחסית נמוכה (200-350 מעלות), ולכן משמש הרבה למחברים אלקטרוניים.

ציפוי בדיל יכול לשמש כציפוי הגנה מפני קורוזיה עבור פלדה, אך הבעיה היא שברגע שהציפוי נשרט, מתחילה להתפתח קורוזיה חריפה.

פוספטיזציה (השחרה)

טיפול פני שטח שעיקרו טרנספורמציה של פני השטח המתכתיים לפני שטח חדשים בעלי אופי-מתכתי.

הפוספטיזציה מתאימה לסוגי מתכות שונים כגון: פלדה, ברזל יציקה, אלומיניום, כסף אבץ, קדמיום. הציפוי כלשעצמו אינו מספק הגנה מספיקה כנגד קורוזיה.

פוספטיזציה בד"כ עושים כהכנה לצביעה, מכיוון שהפוספטיזציה משפר את טיב פני השטח, ולכן הצבע נדבק טוב יותר, והמוצר נראה טוב יותר.

לפוספטיזציה יש אדהזיה מעולה למתכת, ולכן הצבע (גם צבע אפוקסי) לאחר מכן נתפס טוב למתכת, ובנוסף מספקת הגנה כנגד קורוזיה.

ציפוי מאוד זול, ופשוט לביצוע.

שיטת ביצוע הציפוי

טבילה – בשיטה זו טובלים את החלק באמבטיות המכילות תמיסות מלח (פוספט האבץ, פוספט המנגן, פוספט הברזל) בתמיסה מימית עם חומצה פוספורית.

כאשר פני המתכת נתקפים ע"י החומצה שבתמיסה, נוצרת שכבה של פוספט המתכת, אז שוקע מלח הפוספט על פני שכבה זו ויוצר שכבה בלתי מסירה.

כאשר התמיסה מחוממת לטמפ' של 100 מעלות, הציפוי נדבק יותר טוב לפני השטח.

בשיטה זו מבצעים את ציפוי פוספט המנגן.

ריסוס – בשיטה זו מציבים את החלקים על מתקן מוביל, ומעבירים אותו דרך תאי ריסוס.

פריכות מימנית

ככל שהחומר קשה יותר, הסיכוי לקבל פריכות מימנית הוא גבוהה יותר.

מוצרים בעלי קושי גבוהה (31-48HRC), נדרשים לעבור לפני הפוספטיזציה טיפול תרמי לשחרור מאמצים, ולאחר הפוספטיזציה, טיפול אפייה תוך 4 שעות מגמר התהליך, על מנת למנוע פריכות מימנית.

בחלקים בעלי קושי העולה על 48HRC לא מבצעים ציפוי פוספטיזציה.

השיטה היחידה לבדוק עובי ציפוי פוספטיזציה הוא ע"י שקילת החומר לפני, ואחרי שהחומר נטבל בחומצת מלח, שגורמת להסרת הציפוי.

בדיקת טיב הציפוי

בדיקת ערפל מלח (ATM B117) (Fog test)

בניסוי זה בודקים את טיב הציפוי.

מכניסים את החלק המצופה למיכל סגור, ומוסיפים מלח בישול רגיל, מים מזוקקים. מחממים את המיכל ונוצרים אדים.

על גבי החלק מבצעים חריטה של איקס.

החלק נשאר במיכל בין שעה וחצי ל 300 שעות, תלוי בבדיקה.

אם הציפוי נעשה בצורה טובה, האדהזיה בין הציפוי למתכת היא טובה, ולכן לא תהיה התקלפות סביב האיקס.

אם הציפוי לא טוב, תהיה התקלפות/ התנפחות באזור האיקס.

אנודיזציה

אנודיזציה היא ציפוי העיקרי עבור נתכי אלומיניום.

העשרת האלומיניום בשכבת תחמוצת פסיבית נקראת אנודיזציה. התהליך מבוסס על הזרמת זרם דרך אלקטרוליט ובכך הגדלת המתח האנודי. תהליך האנודיזציה משפרת את עמידות פני השטח כנגד שחיקה, התהליך משמש גם לצביעה בצבעים מטאליים שונים שנוספים לאלקטרוליט.

ניתן בשיטה זו להגן על סגסוגת פחות עמידה עם תחמוצת אלומיניום טהור (שמאוד עמידה בפני קורוזיה).

ציפוי אנודיזציה איננה מוליכה חשמל, ומשמש כבידוד חשמלי.

באנודיזציה מתקבלת תחמוצת אלומיניום (חומר קרמי) שהיא חלק אינטגרלי מגוף המתכת.

ע"י אנודיזציה ניתן לשפר את העמידות בחום של האלומיניום.

קיימים 3 סוגים של אנודיזציה:

אנודיזציה גופרתית (Sulfuric Acid anodize)

אנודיזציה כרומית (Chromic Acid anodize)

אנודיזציה קשה (Hard Anodize)

מגבלות

- אנודיזציה היא ציפוי קשה, ולכן את כל העיבוד המכני יש לבצע לפני תהליך הציפוי.
- לא ניתן לביצוע אנודיזציה על מערכות המכילות מתכות זרות כגון פלדה, פליז, וכו.
- ציפוי שביר, ולכן יש להינמץ מתכונן חלקי אלומיניום בעלי פינות חדות, במיוחד בציפוי אנודיזציה קשה.

נקודות שחורות על פני שטח החומר בגמר הטיפול, מופיעות כאשר טרם הציפוי החומר לא נוקה כראוי.

מומלץ לפני הציפוי לבצע ייבוש בטמפ' 120 מעלות.

אנודיזציה גופרתית (Sulfuric Acid anodize)

סוג הציפוי הנפוץ ביותר (זולה), וניתן לביצוע עבור כל נתכי האלומיניום.

ציפוי זה נעשה בתמיסה מימית של חומצה גפרתית, בריכוז מקובל של 15%, מעבירים זרם דרך התמיסה, ועובי הציפוי המתקבל הוא בין 2.5 ל-30 מיקרון. הציפוי המתקבל הוא פורוזיבי-נקבובי.

ניתן לקבל מגוון גדול של צבעים בציפוי, ע"י שימוש בפיגמנטים אורגניים המסיסים במים, או ע"י החדרת פיגמנטים צבעוניים לתוך נקבוביות פני השטח. לאחר הצביעה מבצעים אטימה לציפוי, ע"י טבילה במים מזוקקים מחוממים, או מים מזוקקים המכילים מלחים אנאורגניים כגון פוטסיום די-כרומט (אבקה) $K_2Cr_2O_7$.

ניתן להחדיר לציפוי חומרים נוספים, לצורך קבלת תכונות שונות, כגון שמנים (למטרות סיכה), טפלון (להקטנת חיכוך), סבונים, שעווה.

לשיירי החומצה הגפרתית השפעה קורזיבית על האלומיניום, ולכן בחלקים שבם עלולים להילכד שיירי תמיסה כגון יציקות אלומיניום, חלקים מרותכים, חורים עוורים בקוטר קטן (פחות מ-2 מ"מ), רצוי להימנע מביצוע אנודיזציה גופרתית.

אנודיזציה גופרתית פוגעת בתכונות ההתעייפות של האלומיניום.

אנודיזציה כרומית (Chromic Acid anodize)

אנודיזציה כרומית יקרה יותר מאדנודיזציה גופרתית

פחות רגישה לקורוזיה.

תהליך הציפוי מבוצע באבמט תמיסה כרומית,

הציפוי מתקבל בגוון אפור ירקרק

תהליך אינו מומלץ עבור נתכי אלומיניום המכילים מעל 5% נחושת (2024), או 7% צורן, או תכולה כוללת של סגסוגת מעל 7.5%

מצב הטיפול התרמי של המסג יכל להיות T6 או T4.

העובי המתקבל בתהליך זה אינו עולה על 10 מיקרון ונע בין 1-8 מיקרון.

באנודיזציה כרומית משתמשים לגילוי סדקים בנתכי אלומיניום. הסדק מופיע בגוון שונה מהגוון

של הציפוי כולו. ציפוי זה משמש גם כבסיס טוב להדבקה או צביעה.

אנודיזציה קשה (Hard Anodize)
תהליך שדומה לאנודיזציה גופרתית.

טמפ' התמיסה באנודיזציה קשה היא נמוכה, נעה בסביבות 0 מעלות, ואף נמוך מזה.

בתהליך זה מקבלים ציפויים עבים, עד 150 מיקרון.

אנודיזציה קשה משפרת את עמידות של שחיקה של הנתך, וניתן להגיע לערכים גבוהים כמו של פלדה.

מקובל להספיג טפלון לצורך הציפוי, להטקנטת החיכוך

ציפוי אנודיזציה קשה יכול לגרום לירידה בתכונות ההתעייפות של האלומיניום, עד כדי 65% מהערך של החלק ללא הציפוי.

מחיר האנודיזציה הקשה גבוה פי 10-2 מיתר תהליכי האנודיזציה.