

עקרונות תכנון אטימה למכלולים ותיבות

תסביר לי באופן מעמיק על הגדרות עמידה בדרישות אטימה למכלולים ותיבות



תחום האטימה (Sealing) במכלולים מכניים ואלקטרוניים הוא קריטי להבטחת אמינות המוצר לאורך זמן, במיוחד בסביבות עבודה עוינות. עבור מהנדס מכונות, ההבנה צריכה לחרוג מרמת ה-"IP67" הבסיסית ולצלול למכניקה של דפורמציות חומרים, טולרנסים וניהול לחצים.

להלן ניתוח מעמיק של הגדרות ועקרונות העמידה בדרישות אטימה:

1. תקנים והגדרות (IP Rating)

התקן הנפוץ ביותר הוא IEC 60529, המגדיר את דירוג ה-IP (Ingress Protection). הדירוג מורכב משתי ספרות:

- ספרה ראשונה (0-6):** הגנה מפני חדירת מוצקים (אבק). רמה 6 היא אטימה מוחלטת לאבק.
- ספרה שנייה (0-9K):** הגנה מפני חדירת נוזלים.
- IP67:** טבילה זמנית (עד מטר אחד למשך 30 דקות).
- IP68:** טבילה ממושכת בתנאים שהוגדרו על ידי היצרן (בדרך כלל עמוק יותר או זמן רב יותר).
- IP69K:** עמידות בפני סילוני מים בלחץ גבוה ובטמפרטורה גבוהה.

2. עקרונות תכנון לאטימה סטטית

ברוב התיבות והמכלולים, האטימה מתבצעת באמצעות אלסטומר (O-ring או Gasket) הנלחץ בין שני משטחים.

א. תכנון החריץ (Gland Design)

כדי להשיג אטימה אפקטיבית, יש לתכנן את הגיאומטריה כך שתאפשר "דחיסה" (Compression) נכונה של האטם:

- Compression Set:** האחוז שבו האטם נשאר מעוות לאחר הסרת העומס. יש לבחור חומר עם Compression set נמוך כדי לשמור על גמישות לאורך זמן.
- Squeeze:** בדרך כלל שואפים לדחיסה של **15%-30%** מהחתך של ה-O-ring באטימה סטטית. דחיסה נמוכה מדי תגרום לדליפה, וגבוהה מדי תגרום לנזק מכני לאטם.
- Gland Fill:** אסור שהאטם ימלא 100% מנפח החריץ. מאחר שאלסטומרים הם חומרים כמעט בלתי דחיסים נפחית (Poisson's ratio קרוב ל-0.5), יש להשאיר מקום (בד"כ כ-25% "אוויר" בחריץ) להתפשטות האטם תחת לחץ או טמפרטורה.

ב. טיב שטח (Surface Finish)

משטחי המגע חייבים להיות בטיב שטח מתאים. עבור אטימה סטטית לנוזלים, נדרש בדרך כלל Ra של **0.8 עד 1.6 מיקרון**. חספוס גבוה מדי ייצור "נתיבי דליפה" מיקרוסקופיים מתחת לאטם.

3. בחירת חומרים (Material Selection)

הבחירה תלויה בשלושה גורמים מרכזיים:

- תאימות כימית:** עמידות לשמנים, דלקים, חומצות או קרינת UV (אם התיבה חשופה לשמש).
- טווח טמפרטורות:** *Silicone: מצוין לטמפרטורות קיצוניות אך בעל עמידות נמוכה לקריעה.
- EPDM:** טוב למים וקיטור, גרוע לשמנים.
 - Viton (FKM):** עמידות כימית וטרמית גבוהה מאוד, אך יקר.
- Outgassing:** ביישומים תעופתיים או ואקום, יש לוודא שהחומר לא פולט גזים שיכולים להתרכז על רכיבים אופטיים או אלקטרוניים.

4. ניהול לחצים והשוואת לחצים (Breather Valves)

טעות נפוצה היא לתכנן תיבה אטומה לחלוטין מבלי להתחשב בשינויי לחץ פנימיים. לפי חוק הגזים האידיאליים:

$$PV = nRT$$

כאשר הטמפרטורה בתוך התיבה עולה (עקב פעולת רכיבי אלקטרוניקה או חשיפה לשמש), הלחץ הפנימי P עולה. אם התיבה אטומה לחלוטין, נוצר הפרש לחצים (ΔP) המפעיל כוח על המבנה ועל האטמים.

- במקרה של קירור מהיר (גשם על תיבה חמה), עלול להיווצר תת-לחץ שישאב מים פנימה דרך האטמים ("Vacuum effect").
- הפתרון:** שימוש בשסתומי השוואת לחצים (Pressure Compensation Plugs) או ממברנות נושמות (כמו Gore-Tex), המאפשרות מעבר אוויר אך חוסמות מים ואבק.

5. קשיחות המבנה ופריסת ברגים

אטימה טובה דורשת לחץ אחיד לאורך כל קו האטם.

- Flange Stiffness:** אם מכסה התיבה דק מדי, הוא יתכופף בין הברגים (תופעה המכונה "Scalloping"), והלחץ על האטם במרכז שבין הברגים יירד מתחת לסף האטימה.
- Bolt Torque:** יש להגדיר מומנט סגירה מדויק וסדר סגירה (Cross-pattern) כדי למנוע עיוות של האטם בזמן ההרכבה.
- ניתוח FEA:** כפי שאתה מכיר מעולמך המקצועי, מומלץ לבצע אנליזה מכנית לבדיקת מגע (Contact Analysis) כדי לוודא שמומנט הסגירה מייצר לחץ מגע גבוה מלחץ הנוזל החיצוני בכל נקודה.

6. שיטות בדיקה (Validation)

לאחר הייצור, יש לוודא עמידה בדרישות:

- בדיקת בועות (Bubble Test):** דחיסת אוויר לתיבה וטבילתה במים.

2. **בדיקת נפילת לחץ (Pressure Decay):** מדידת קצב דליפת האוויר מהתיבה לאורך זמן. זו שיטה כמותית ומדויקת מאוד.

3. **בדיקת הליום (Helium Leak Detection):** לרמות אטימה גבוהות מאוד (ואקום או רכיבים רגישים במיוחד).

האם תרצה שאפרט על שיקולי תכנון ספציפיים לאטימה של כבלי תקשורת הנכנסים לתוך התיבה (Cable Glands)?

מה לגבי אטימת מחברי דופן?

אטימת מחברי דופן (Panel Mount Connectors) היא אחת הנקודות הרגישות ביותר בתכנון מארזים, שכן היא מהווה "חדירה" מבוקרת למבנה המכני. הכשל כאן הוא לרוב לא במחבר עצמו, אלא בממשק (Interface) שבין גוף המחבר לדופן התיבה.

כמהנדס, עליך להבחין בין שני מסלולי דליפה פוטנציאליים:

- Panel Seal:** האטימה בין גוף המחבר לתיבה.
- Mating Seal:** האטימה בין המחבר הזכר לנקבה (כאשר הם מחוברים).

להלן הדרכים המקצועיות להבטיח אטימת דופן איכותית:

1. שיטות אטימה נפוצות למחברי דופן

א. אטימת O-Ring (מעגלית)

זוהי השיטה האמינה ביותר למחברים עגולים. ה-O-ring יושב בתוך חריץ (Groove) המובנה בגוף המחבר או בשקע ייעודי בדופן.

- יתרון:** יכולת עמידה בלחצים גבוהים (גם הידרוסטטיים).
- דגש טכנוני:** יש לוודא שקוטר הקדח בדופן תואם לטולרנסים של יצרן המחבר. חופש גדול מדי (Clearance) יגרום ל-O-ring "להישאב" למרווח תחת לחץ (Extrusion).

ב. אטם שטוח (Flange Gasket)

נפוץ במחברים מרובעים (MIL-DTL-38999 וכדומה). האטם עשוי לרוב מסיליקון או ניאופרן ולוחץ על שטח פנים רחב.

- האתגר:** דורש הידוק אחיד של 4 ברגים. אם הברגים לא מהודקים במומנט זהה, נוצר עיוות ב-Flange שגורם לדליפה בפינות.
- שיפור:** שימוש באטמים מוליכים (Conductive Gaskets) אם נדרשת גם חסימת EMI/RFI בנוסף לאטימה למים.

ג. אטימה מובנית (Jam Nut)

במחברים אלו, האטימה מתבצעת על ידי אום הידוק מרכזי (Jam Nut). המחבר כולל אטם אינטגרלי שנדחס כנגד הדופן בזמן הברגת האום.

- יתרון:** התקנה מהירה וחסכון במקום (חור אחד בלבד).

- **נקודת תורפה:** רגישות גבוהה למומנט הסגירה. סגירה חלשה מדי = דליפה. סגירה חזקה מדי = גזירה של האטם.

2. שיקולי תכנון מכני (D-Hole וסיבוב)

אחד הכשלים הנפוצים באטימת דופן הוא סיבוב המחבר בזמן הברגת הכבל אליו, מה שגורם לשחיקה פיזית של האטם (Shear) ולדליפה.

- **D-Hole / Double-D Hole:** תכנון קדח בדופן שאינו עגול לחלוטין אלא בעל צד שטוח אחד או שניים. גוף המחבר מתוכנן בהתאם, מה שמונע ממנו להסתובב (Anti-rotation) ושומר על שלמות האטם.
- **עובי דופן (Wall Thickness):** יש לוודא שעובי הדופן נמצא בטווח המוגדר על ידי יצרן המחבר. דופן דקה מדי לא תאפשר דחיסה מספקת של האטם, ודופן עבה מדי לא תשאיר מספיק כריכות להברגת אום ההידוק.

3. חומרים ותנאי סביבה

- **Galvanic Corrosion:** אם התיבה עשויה אלומיניום והמחבר עשוי פלדת אל-חלד או ברונזה, נוצר הפרש פוטנציאלי חשמלי. בנוכחות לחות (אלקטרוליט), תתרחש קורוזיה גלוונית שתאכל את דופן התיבה מתחת לאטם ותהרוס את האטימה.
- **פתרון:** שימוש בציפויים תואמים (כמו Cadmium או Zinc-Nickel) או בידוד גלווני.
- **Thermal Cycling:** בגלל השוני במקדמי ההתפשטות הטרמית (α) בין גוף המחבר (מתכת), התיבה (מתכת/פלסטיק) והאטם (אלסטומר), שינויי טמפרטורה קיצוניים יכולים לגרום ל"נשימה" של האטם ולחדירת לחות.

4. אטימה הרמטית (Hermetic Sealing)

- ביישומים שבהם נדרשת אטימה מוחלטת (גזים, ואקום גבוה), משתמשים במחברים הרמטיים:
- **Glass-to-Metal Seal:** הפינים בתוך המחבר יצוקים בתוך זכוכית, מה שמונע מעבר מולקולות גז דרך גוף המחבר עצמו.
 - **Potting:** מילוי החלק האחורי של המחבר בשרף אפוקסי או פוליאוריתן כדי להוסיף שכבת הגנה נוספת מפני חדירת לחות דרך הכבלים (Wicking).

5. בדיקת תקינות (Validation)

עבור מחברי דופן, השיטה המומלצת ביותר היא **Vacuum/Pressure Decay**. מכיוון שהמחבר הוא "נקודת תורפה" ידועה, כדאי לבצע אנליזת FEA מקדימה על הדופן סביב הקדח (במיוחד אם המארז דק) כדי לוודא שאין עיוות (Deflection) מקומי תחת עומס ההידוק של המחבר, מה שיכול ליצור מרווח לדליפה.

האם תרצה שנתעמק בנושא של בחירת חומרי אטמים למניעת קורוזיה גלוונית במחברים, או אולי בשיטות להגנה על מחברים מפני לחץ מים גבוה (IP68)?

איזה טיב שטח מגדירים בסלוט לאטם עגול?



הגדרת טיב השטח (Surface Finish) בסלוט (Groove) לאטם עגול (O-ring) היא קריטית, שכן היא קובעת את רמת האטימה ואת אורך החיים של האטם. הדרישה משתנה משמעותית בין אטימה סטטית (ללא תנועה) לאטימה דינמית (בוכנה או ציר מסתובב).

להלן הערכים המקובלים בתעשיית המכניקה (לפי תקני Parker ו-Trelleborg):

1. ערכי Ra מומלצים

הפרמטר המרכזי הוא Ra (Roughness Average). ככל שהלחץ גבוה יותר או שהמולקולות של הזורם קטנות יותר (גז לעומת נוזל), נדרש טיב שטח טוב יותר.

סוג האטימה	יישום	Ra מומלץ (מיקרון)	Ra מומלץ (μin)
סטטית	נוזלים (שמן/מים)	1.6	63
סטטית	גזים / ואקום / לחץ גבוה	0.8	32
דינמית	בוכנה / ציר (תנועה קווית)	0.1 – 0.4	4 – 16
דפנות הסלוט	(הקירות האנכיים)	3.2	125

2. דגשים הנדסיים קריטיים

א. כיוון העיבוד (Lay)

בדירוג אטימה, לא רק ה"גובה" של החספוס קובע, אלא גם הכיוון שלו.

- החוק:** סימני העיבוד המכני (למשל מסיבוב המחרטה) חייבים להיות **מקבילים** לכיוון האטם (Concentric).
- הסכנה:** סימני עיבוד רדיאליים (Perpendicular) שחוצים את האטם מהפנים אל החוץ יוצרים "מיקרו-תעלות" שדרכן נוזל או גז יכולים לדלוף תחת לחץ, גם אם ה- Ra נמוך מאוד.

ב. טיב שטח דפנות הסלוט

הדפנות (Sides) פחות קריטיות מהתחתית באטימה סטטית, ולכן ניתן להסתפק ב- Ra 3.2. עם זאת, אם מדובר באטימה בתנאי רעידות (Vibrations) או שינויי טמפרטורה קיצוניים, מומלץ להשוות את טיב השטח של הדפנות לזה של התחתית כדי למנוע שחיקה של האטם בזמן "נשימה" של המכלול.

ג. ציפויים וטיפולי שטח

אם החלק עובר אנודיז (Anodize) או ציפוי אחר, יש להגדיר את טיב השטח **לפני** הציפוי, תוך התחשבות בכך שהציפוי עלול להעלות את החספוס. באנודיז קשיח (Hard Anodize), פני השטח הופכים קרמיים ומחוספסים יותר, מה שעלול "לשייף" אטמים ביישומים דינמיים.

ד. פרמטרים נוספים (Rz ו- $Rmax$)

במקרים של אטימה קריטית (גזים בלחץ גבוה מאוד), לא מספיק להסתכל על Ra . בליטות חדות וגבוהות מדי (Peaks) עלולות לפצוע את האטם, בעוד עמקים עמוקים (Valleys) יוצרים נתיבי דליפה. במקרים אלו נהוג להגביל גם את ה- $Rmax$ לערך של פי 4 מה- Ra .

3. סיכום לשרטוט

עבור תיבה אטומה סטטית (IP67/68):

- בתחתית החריץ (Bottom): סמן $Ra\ 1.6$ (או 0.8 אם מדובר בוואקום/גז).
- בדפנות (Sides): סמן $Ra\ 3.2$.
- הוסף הערה: "Machining marks shall be concentric to the groove".

האם תרצה שאשלח לך דוגמה לטבלת טולרנסים של עומק ורוחב הסלוט עבור אחוז דחיסה (Squeeze) אופטימלי?