

עקרונות תכנון אטימה למכלולים ותיבות

תסביך ל-^י 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 עיניות. עבור מהנדס מכונאות, ההבנה צריכה לחרוג מרמת ה- "IP67" הבסיסית ולצלול למכניקה של דפורמציה חומרית, 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-(Ingress Protection) IP. הדירוג מורכב משתי ספרות:

- **ספרה ראשונה (0-6):** הגנה מפני חדיות מוצקים (אבק). רמה 6 היא אטימה מוחלטת לאבק.
- **ספרה שנייה (0-9):** הגנה מפני חדיות נזולים.
- **IP67:** טבילה זמנית (עד מטר אחד במשך 30 דקות).
- **IP68:** טבילה ממושכת בתנאים שהוגדרו על ידי היצרן (בדרכם כל עمق יותר או זמן רב יותר).
- **IP69K:** עמידות בפני סילוני מים בליח גבוה ובטמפרטורה גבוהה.

2. עקרונות תכנון לאטימה סטטית

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

א. תכנון החריץ (Gland Design)

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

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

ב. טיב שטח (Surface Finish)

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

3. בחירת חומרים (Material Selection)

הבחירה תלויה בשלושה גורמים מרכזים:

1. **תאמות כימית:** עמידות לשמנים, דלקים, חומצות או קרינת UV (אם התיבת חשופה לשמש).
2. **טווח טמפרטורת:** ***Silicone:** מצוין לטמפרטורות קיצונית אך בעל עמידות נמוכה לקרינה.
- **EPDM:** טוב למים וקיטור, גרוע לשמנים.
- **Viton (FKM):** עמידות כימית וטרמית גבוהה מאוד, אך יקר.
3. **Outgassing:** ביישומים תעופתיים או אקוום, יש לוודא שהחומר לא פולט גזים שיכולים להתרכז על רכיבים אופטיים או אלקטронיים.

4. ניהול לחצים והשוואת לחצים (Breather Valves)

טעות נפוצה היא לתכנן תיבת אוטומה לחילוטין מבלי להתחשב בשינוי לחץ פנימיים. לפי חוק הגזים האידיאליים:

$$PV = nRT$$

כאשר הטמפרטורה בתוך התיבה עולה (עקב פעולת רכיבי אלקטטרוניקה או חשיפה לשמש), לחץ הפנימי P עולה. אם התיבה אוטומה לחילוטין, נוצר הפרש לחצים (ΔP) המפעיל כוח על המבנה ועל האטמים.

- במקרה של קירור מהיר (גוף על תיבת חמה), עשוי להיווצר תת-לחץ שיישאב מים פנימה דרך האטמים ("Vacuum effect").
- **הפתרון:** שימוש בשסתומי השוואת לחצים (Pressure Compensation Plugs) או ממברנות נשומות (כמו Tex-Tex), המאפשרות מעבר אויר אך חוסמות מים ואבקן.

5. קשיחות המבנה ופריסת ברגים

אטימה טובה דורשת לחץ אחד לאורך כל קו האטם.

- **Flange Stiffness:** אם מכסה התיבה דק מדי, הוא יתכווף בין הברגים (תופעה המכונה "Scalloping"), והלחץ על האטם במרכז שבין הברגים ירד 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 מעולם המקצועי, מומלץ לבצע אנויזה מכנית לבדיקה מגע (Contact Analysis) כדי לוודא שכומונט הסגירה מייצר לחץ מגע גבוה מלחץ הנוזל החיצוני בכל נקודה.

6. שיטות בדיקה (Validation)

לאחר הייצור, יש לוודא עמידה בדרישות:

1. **בדיקה בועות (Bubble Test):** דחיסת אויר לתיבת בטבילה במים.

2. **בדיקה נפילה לחץ (Pressure Decay):** מדידת קצב דליפת האויר מהתייבה לאחר זמן. זו שיטה פשוטה ומדויקת מאוד.

3. **בדיקה הליום (Helium Leak Detection):** לרמות אטימיה גבוהות מאוד (ואקום או רכיבים רגיסרים במיוחד).

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

מה לגבי אטימות מחברי דוף?

אטימות מחברי דוף (Panel Mount Connectors) היא אחת הנקודות הרגישות ביותר בתכנון מארדים, שכן היא מהוות "חדרה" מבוקרת לבניית המכני. ה成败 כאן הוא לרוב לא במחבר עצמו, אלא בממשק (Interface) שבין גוף המחבר לדוף התיבה.

כמו הנדרס, עליך להבחין בין שני מסלולי דליפה פוטנציאליים:

1. **Panel Seal:** האטימה בין גוף המחבר לתיבה.

2. **Mating Seal:** האטימה בין המחבר הזכר לנקבה (כאשר הם מחוברים).

להלן הדריכים המקצועיות להבטיח אטימות דוף אינטגרטיבית:

1. שיטות אטימה נפוצות למחברי דוף

א. אטימת O-Ring (מעגלית)

זו היא השיטה האמינה ביותר למחברים עגולים. ה-O-ring יושב בתווך חריש (Groove) המובנה בגוף המחבר או בשקע ייעודי לדוף.

- יתרון:** יכולת עמידה בלחצים גבוהים (גム הידראוסטטיים).
- דגש תכנוני:** יש לוודא שהקוטר הקדח לדוף תואם לטולרנסים של יצורן המחבר. חופש גדול מדי (Clearance) יגרום ל-O-ring להישאב" למרוחת תחת לחץ (Extrusion).

ב. אטם שטוח (Flange Gasket)

נפוץ במחברים מרובעים (38999-3-DTL-MIL-CDT וגדומה). האטם עשוי לרוב מסיליקון או ניאופרן ולוחץ על שטח פנים רחב.

- האתגר:** דרוש הידוק אחיד של 4 ברגים. אם הברגים לא מהודקים בmomentum 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 כלפי הדוף בזמן הבריגת האום.

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

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

2. שיקולי תכנון מכני (Hole-D וסיבוב)

אחד ההצללים הנפוצים באטיימת דופן הוא סיבוב המחבר בזמן הברגת הכבול אליו, מה שגורם לשחיקה פיזית של האטם (Shear) ולדליפה.

- **Hole D / Double-D:** תכנון קדח בדופן שאינו עגול לחלווטין אלא בעל צד שטוח אחד או שניים. גופו המחבר מתוכנן בהתאם, מה שמנע ממנו להסתובב (Anti-rotation) ושומר על שלמות האטם.
- **עובי דוף (Wall Thickness):** יש לוודא שעובי הדוף נמצא בטוויה המוגדר על ידי יצרן המחבר. דוף דקה מדי לא מאפשר דחיסה מספקת של האטם, ודוף עבה מדי לא תשריר מספיק כריכות להברגת אום ההידוק.

3. חומרים ותנאי סביבה

- **Galvanic Corrosion:** אם התיבה עשויה אלומיניום וה לחבר עשוי פלדת אל-חלד או ברונזה, נוצר הפרש פוטנציאלי חשמלי. בנסיבות לחות (אלקטROLיט), תתרחש קורוזיה גלונית שתאכל את דופן התיבה מתחת לאטם ותחרוס את האטימה.
- **פתرون:** שימוש בציפויים תואמים (כמו Zinc-Nickel Cadmium או Cadmium-Nickel) או בידוד גלוני.
- **Thermal Cycling:** בגלל השינוי במקדי ההתפשטות הטרמי (α) בין גופו המחבר (מתכת), התיבה (מתכת/פלסטייק) והאטם (אלסטומר), שינויים טמפרטורתיים קיצוניים יכולים לגרום ל"נשימה" של האטם ולהידרת לחות.

4. אטימה הרמטית (Hermetic Sealing)

בישומים שבהם נדרשת אטימה מוחלטת (גזים, ואקום גבוה), משתמשים במחברים הרמטיים:

- **Glass-to-Metal Seal:** הפינים בתוך המחבר יצוקים בתוך זכוכית, מה שמנע מעבר מולקולות גז דרך גופו המחבר עצמו.
- **Potting:** מילוי החלק האחורי של המחבר בשurf אפוקסי או פוליאוריטן כדי להוסיף שכבת הגנה נוספת מפני חדירת לחות דרך הכלבים (Wicking).

5. בדיקת תקינות (Validation)

עבור מחברי דופן, השיטה המומלצת ביותר היא **Vacuum/Pressure Decay**. מכיוון שה לחבר הוא "נקודות תורפה" ידועה, כדאי לבצע אנוויז FEA מקדימה על הדוף סביב הקדח (במיוחד אם המארז דק) כדי לוודא שאין עיונות (Deflection) מקומי תחת עומס ההידוק של המחבר, מה שיכל לייצור מרוחות לדליפה.

אם תרצה שנותעמק בנושא של בחירת חומרי אטמיים למניעת קורוזיה גלונית במחברים, או אולי בשיטות להגנה על מחברים מפני לחץ מים גבוה (868)?

איזה טיב שטח מגדרים בסלוט לאטם עגול?



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

להלן הערכים המקבילים בתעשייה המכנית (לפי תקני Parker ו-Trelleborg):

1. ערכי R_a מומלצים

פרמטר המרכז הוא R_a (Roughness Average). ככל שהחלץ גובה יותר או שהוא מולקולות של הזרם קטנות יותר (גזרע נוזל), נדרש טיב שטח טוב יותר.

סוג האטימה	R_a מומלץ (מיקרון)	R_a מומלץ (μm)	שימוש
סטטית	63	1.6	נוולים (שמן/מים)
סטטית	32	0.8	גזרים / אקוום / לחץ גובה
динמית	4 – 16	0.1 – 0.4	בוכנה / ציר (תנועה קווית)
דפנות הסלוט	125	3.2	(הקרות האנכיאליים)



2. דגשים הנדרדים קרייטיים

א. כיוון העבודה (Lay)

בדירוג אטימה, לא רק ה"גובה" של החספוס קובלע, אלא גם ה**כיוון** שלו.

- החוק:** סימני העבודה המכני (למשל מסיבוב המחרטה) חייבים להיות **מקבילים** לכיוון האטם (Concentric).
- הטכונה:** סימני עבודה רדיאליים (Perpendicular) שחוצים את האטם מהפנים אל החוץ יוצרים "מייקרו-תעלות" שדרוך נוזל או גז יכולים לדלוף תחת לחץ, גם אם ה- R_a נמוך מאוד.

ב. טיב שטח דפנות הסלוט

הdpנות (Sides) פחות קרייטיות מהתחתית באטימה סטטית, ולכן ניתן להסתפק ב- $3.2 \mu m$. עם זאת, אם מדובר באטימה בתנאי רuidות (Vibrations) או שינוי טמפרטורה קיצוניים, מומלץ להשווות את טיב השטח של הדפנות לזה של התחתית כדי למנוע שחיקה של האטם בזמן "נשימה" של המכלול.

ג. ציפויים וטיפולי שטח

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

ד. פרמטרים נוספים (R_{max} ו- R_z)

במקרים של אטימה קרייטית (גזרים בלחש גובה מאוד), לא מספיק להסתכל על R_a . בliteות חדשות וגובהות מדוי (Peaks) עלולות לפצע את האטם, בעוד עמוקים עמוקים (Valleys) יוצרים נתיבי דליפה. במקרים אלו נהוג להגביל גם את ה- R_{max} לערך של פי 4 מה- R_a .

3. סיכום לשרטוט

עבור תיבת אטומה סטטית (IP67/68):

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

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