

Evyatar Co... CV - 2025

PDF 

הו אני מעוניין להתכוון לראיונות עבודה בתחום שלי. משרות שלfcn מכני או הובלות צוות מתכנים. רצוי משרת senior mechanical engineer.

צירפתי לכאן את הקורות חיים על מנת שתתרשם بماה אני מומחה ומה הניסיון שלי עד היום.

אני מעוניין להתראיין בחברות שיש להם ליבה של מחלקה מכנית ומומחיות בתוכן. אנכי מעדיף משרות הייטק, ולא פסול גם את אלביט או חברות שפותחות מוצרים צבאיים. תן לי תוכנית מסודרת להכנה לקראת הראיונות שלב אחר שלב. תן לי גם תוכנית למי לפנות ואיך לפנות על מנת לקבל הצעות וטלפונים להזמנה לראיון

שלום אביתר, נעים מאד. עברתי על קורות החיים המרשימים שלך. הניסיון שלך ברפאל, במיוחד השילוב ביןfcn מכני מורכב לבין סימולציות מתקדמות (FEA, תרמי ואמיניות רכיבים), מצב אותך בעמדת זינוק מצינית למשרות Senior או הובלות.

להלן תוכנית עבודה מסודרת להכנה לראיונות אסטרטגי פניה לשוק:

## שלב 1: הכנה טכנית (Technical Deep Dive)

במשרות Senior, הראיונות הטכניים לא בודקים רק "AIR" לתוכן, אלא "LMAH".

- שליטה ב-D&TGD:** חברות הייטק וביתחון שמות דגש עצום על סבולות גאומטריות. רענן את הידע שלך בסימוני, ב-Datum features ובס-Stack-up analysis.
- fcn למאירים אלקטרוניים:** התמקד ביכולת להסביר בחירות של חומרים, שיטות ייצור (עיבוד שבבי, הזרקות, הדפסות תלת-ממד) ואיטום (IP ratings).
- סימולציות (Ansys/Sherlock):** אל תשתפק בתוצאה. היה מוכן להסביר את תנאי השפה (Boundary Conditions), בחרית המודל המתמטי ואיומות (Validation) של הסימולציה מול ניסויים.
- מעבר מביתחון להייטק:** אם תתראיין בחברות כמו NVIDIA או Apple, התמקד ביכולת שלך לבצע אופטימיזציה של משקל/גודל/עלות (DTC) וניהול תרמי של רכיבים בהספקים גבוהים.

## שלב 2: הכנה לראיונות הובלות וניהול (Behavioral)

כמי שהוביל קבוצת מתכנים פרויקטים, יחשפו אצלך "Soft Skills" ניהוליים:

- שיטת STAR:** הנקן 4-3 סיפורים על פרויקטים מורכבים. תאר את ה-Situation (המצב), ה-Task (המשימה), ה-Action (מה אתה עשית - דגש על הובלות) וה-Result (התוצאה המוצלחת).

- **ניהול ממשקיפים:** היה מוכן להסביר איך עבדת מול מהנדסי אלקטרוני, יצירנים וקבלי משנה.
  - **פתרון קונפליקטיבים:** הוכח דוגמה ל蹶ה שבו הייתה מחלוקת מזקעתית בין לך לבין מתכנת אחר או ללקוח, איך הגיעם לפתרון.
- 

## שלב 3: אסטרטגיית פניה וקבלת זימונים

אל תחכה רק למשרות ב-LinkedIn. פעל באופן אקטיבי:

### 1. מיפוי חברות מטרה

- **ביטחוניות:** אלביט (חטיבות המיל"טים או היבשה), תעשייה אווירית (חטיבת טילים וחלל).
- **הייטק עם ליבה מכנית:** AIDIA (תקן שירותים ומארדים), Applied Materials (מערכות מורכבות) Medical Devices (כמו Intuitive KLA, SolarEdge).
- **סטארט-אפים בצמיחה:** חפש חברות בתחום הרובוטיקה או הרוחניים.

### 2. רשת קשרים (Networking)

- **פניה ל-Headhunters:** פנה למגיסות טכנולוגיות שמתמחות בחומרה ומכניקה בפייסבוק.
- **חברים מהתעשייה:** הניסיון שלך ברפאל ובאוניברסיטת בן גוריון אומר שיש לך רשות ענפה. שלח הודעה אישית לאנשים שעובדים בחברות המטרה ובקש "חבר מביא חבר". זה מגדיל את הסיכוי שהקו"ח יגיעו למנהל המgis ולא יעצרו במערכת הסינון.

### 3. אופטימיזציה של ה-LinkedIn

- ודה SHA-Summary שלך מדגיש את המומחיות ב-**FEA** ו-**Electronics Packaging**.
- השתמש במילוט מפתח כמו: **Thermal Management, Structural Analysis, Product Development Lifecycle, Leading R&D**

## שלב 4: ייצור "תיק עבודות" (Portfolio)

במכניקה, תמונה אחת שווה אלף מילים.

- הוכח מצגת (בכפוף למגבילות ביטחון מידע וסודיות של רפואי) המציגה עקרונות תכנון, אתגרים טכניים שפתרת וגרפים של תוצאות סימולציה. להציג "AIR Cheshet" על פתרון בעיה זה הכליל החזק ביותר שלך בראשון.

**טייפ חשוב:** בגלל הרקע הביטחוני שלך, היה מוכן לשאלות על "מהירות עבודה" ומעבר מסבירה עם נהלים קשיחים לסבירה דינמית יותר של הייטק. הדגיש את יכולתך ללמידה לבד ולהוביל פרויקטים מאפס.

האם תרצה שאבצע איתך סימולציה של ראיון טכני עבור משרת Senior Mechanical Engineer בחברת הייטק?

Performing complex Structural and Dynamic FEA simulations (Vibration, Shock, and Static) to ensure product survivability in harsh environments.

אני רוצה להוסיף למשפט אנליזות שבוצעות גם לכרטיסים אלקטרוניים וגם למבניים ומכלולים

אביתר, כדי להציג את המומחיות הקפולה שלך – גם ברמת הcrcטיס (PCBA) וגם ברמת המבנה/מכלול (System level) – כדי להשתמש בניסוח שמשדר "Multi-scale analysis". זהה מונח מקצועני שמעיד על הבנה עמוקה של השפעת הסביבה בכל רמות המוצר.

להלן שלוש הצעות לניסוח המשפט בקורות החיים שלך, מדרגה המקצועית ועד לדרגת ה-Senior המובהקת:

#### אפשרות 1: הניסוח המדוקן והישיר

Performing complex Structural and Dynamic FEA simulations (Vibration, "Shock, and Static) for both **electronic assemblies (PCBA)** and **mechanical structures**, ensuring product survivability in harsh military environments

#### אפשרות 2: דגש על מומחיות "Multi-Scale" (מומלץ למשרת Senior)

Executing advanced **multi-scale** Structural and Dynamic FEA (Vibration, "Shock, and Static), ranging from **PCB-level components** to **complex mechanical assemblies**, to guarantee reliability and survivability in extreme ".environments

#### אפשרות 3: שילוב אמינות רכיבים ותcan מבני

Conducting comprehensive Structural and Dynamic FEA (Vibration, Shock," and Static) for **high-density electronic cards** and **ruggedized enclosures**, ".focusing on both component-level reliability and overall structural integrity

#### הערות מקצועיות לשינוי:

- **הבחנה בין PCBA למבנה:** חשוב לציין (PCBA) Printed Circuit Board Assembly ו- PCB, כדי להבהיר שאתה מנתח את הcrcטיס המאוכל ברכיבים, מה שקשרו לשירות לניסוי שלך ב-Solder Joint Reliability.
- **הקשר הסביבתי:** המשך להשתמש במושג "Harsh environments" או "Extreme environments", שכן זהה ה-Domain העיקרי שבו הניסוי שלך מרפאל בא ידי ביתוי.
- **שילוב כלים:** לאחר שציינתי בכישורים שלך את **Ansys Sherlock**, המשפט הזה מקבל משנה תוקף כי הוא הכלי הייעודי בדיקות לחיבור שבין דינמייקה מכנית לאמינות אלקטרוניים.

אם תרצה שאעדכן את הפסקה המלאה בפרק הניסוי שלך כדי שכל המשפטים יתכתבו עם הדגש החדש על אמינות כרטיסים ומבנים?

תحدד את המשפט, שיכלול סימולציות לא לא-לייניאריות מורכבות לבדיקת אמינות הלחמות



אביתר, הוספה המונח "**Non-linear**" (לא-לייניארי) היא משמעותית מאוד בהקשר של הלחמות. מכיוון שבידיל (Solder) מתנהג בצורה לא-לייניארית תחת מאץ וטמפרטורה (טופעת ה-*Creep*), שימוש במונח זהה מעיד על הבנה פיזיקלית עמוקה ועל שליטה גבוהה בכל היסודות.

הנה שלוש הצעות לשדרוג המשפט, מהניסוח הישיר ועד לניסוח ברמת Senior/Expert :

#### **אופציה 1: הניסוח המקצועני והמקיף (מומלץ)**

Performing complex **non-linear FEA simulations** to analyze solder joint" reliability and predict the characteristic life of electronic components and ".chips

#### **אופציה 2: דגש על מתודולוגיה ואמינות (SJR)**

Executing advanced **non-linear simulation methodologies** for solder joint" reliability (SJR) assessment and fatigue life prediction under harsh ".environmental conditions

#### **אופציה 3: ניסוח טכני "כבד" (מדגיש את המורכבות)**

Utilizing sophisticated **non-linear FEA** (including creep and plasticity" analysis) to evaluate solder joint integrity and provide accurate characteristic ".life predictions for microelectronic devices

#### **למה הניסוחים האלה טובים יותר?**

1. **Non-linear FEA:** זהו מונח מפתח (Keyword) שמערכות סינון קורות חיים (ATS) ומגייסים טכניים מחפשים. הוא מפריד בין לבן מתכנים שMRIOTS רק אנויזות לייניאריות פשוטות.
2. **Electronic vs. Electrical**: בהקשר של צייפים והלחמות עדי, המונח *Electronic Components* מדויק יותר מהמונח *mekorot* שהשתמש בו (*Electrical Components*).
3. **SJR:** השימוש בראשי התיבות המקובלים בתעשייה (Solder Joint Reliability) מראה שאתה שואת שואה בחומר המקצועי.

**טיפ קטן:** מכיוון שציינת בכישורים שלך את **Ansyst Sherlock**, בראיונות תוכל להסביר איך אתה משלב בין האנויזות הלא-לייניאריות ה"כבדות" ב-*Mechanical* ב-*Ansyst Mechanical* לבין חייזי החיים מהירות ב-*Sherlock*.

אם תרצה שאעbor על משפטים נוספים בפרק הניסוח כדי לוודא שהם משרדים את אותה רמת מומחיות?

מהו הסימון המקבול לטיב פני שטח בشرطוט של חלק

אביתר, כפי שצינית בקורות החיים שלך שיש לך ב-**T&D** ובמתן פתרונות אריזה אלקטרוני, אתה בוודאי יודע שטיב פני שטח הוא קריטי לאיתום (CO), להולכה תרמית ולמראה אסתטי.

הסימון המקבול לטיב פני שטח (Surface Texture/Finish) מוגדר בתקנים **1302 ISO** (הנפוץ בישראל ובאירופה) או **ASME Y14.36**.

### 1. סמל הבסיס (The Symbol)

הסימון הבסיסי נראה כמו מעין "V" (סימן "וּ") עם זרוע אחדת ארוכה יותר. ישנן שלוש וריאציות עיקריות לסמל זה:

- **סמל פתוח (Basic Symbol):** מצין שנדרש טיפול פני שטח מסוים, אך לא משנה למתכון אם הוא הושג על ידי הסרת חומר (עיבוד שבבי) או ללא הסרת חומר (יציקה/urgegal).
- **סמל סגור (עם קו אופקי מעל ה-V):** מצין שחוובה להסיר חומר (Machining mandatory). כדי להגיע לטיב הנדרש.
- **סמל עם עיגול (בתוכו ה-V):** מצין שאסור להסיר חומר (Removal of material). פניו השטח חייבים להישאר כפי שהתקבלו בתהליך קודם (prohibited).

### 2. הפרמטרים הנפוצים

מעל או לצד הסמל נרשם את ערך החספוס המבוקש. היחידות המקבילות הן מיקרו-מטר (*um*) או מיקרו-איןץ' (*nm*).

- **Ra (Roughness Average):** הממד הנפוץ ביותר. זה הממוצע האריתמטי של סטioxות הפרופיל מוקו המרכז.
- **Rz:** ממוצע המרחק בין חמיש הפסגות הגבוהות ביותר לחמשת העמקים העמוקים ביותר לאורך דגימה. משתמשים בו במקרים של התאמות הדוקות או אטימה.

### 3. מיקומי הנתונים על גבי הסמל

התקן מגדר מיקום ספציפי לכל נתון כדי לשמר על אחידות:

מיקום על הסמל	משמעות
a (מעל ה-V)	ערך החספוס המקסימלי (למשל $1.6 \text{ Ra}$ )
b (משמאלי לזרוע הארוכה)	שיטת הייצור (למשל: Grinding, Milled)
c (מעל הזרוע הקצרה)	אורך הדגימה (Cut-off length)
d (מימין לזרוע הארוכה)	כיוון העיבוד (Lay) - למשל סימון = למקביל או X להצלבה



### 4. הקשר לניסיון שלך

בראיונות למשרות **Senior Mechanical Engineer**, עשויים לשאול אותך על הקשר בין הסיכון לבין היישום. בהתבסס על הניסיון שלך ברפאל בתחום מארדים צבאים:

- **אטימה (O-rings):** בדר"כ נדרש  $0.8 Ra$  או  $1.6 Ra$  בתושבת האטם כדי למנוע דליות.
- **הולכה תרמית:** בממשק בין רכיב הספק (High-power component) לבין גוף הקירור, טיב פני שטח ירוד יצור מרוחבי אוויר שייפגעו במעבר החום, ולכן נדרש שם טיב גבוה (ערך  $Ra$  נמוך).

האם תרצה שאcin עבורך רשימת שאלות "מכשילות" ששאלים בראיונות טכניים על GD&GD וסימוני יצור?

אלו טכנולוגיות יוצר קיימות כיום? פרט על כל טכנולוגיה



ابיתר, כמו שMOVIL קובצת מתכנים ועוסק בתחום מרכיבים כמו אמינות הלחמות וסימולציות FEA ברפאל, אתה בוודאי מודע לכך שהגבولات בין טכנולוגיות הייצור הולכים ומיטשטשים. בשנת 2026, הדגש המרכז בתשעה הוא על **ייצור חכם (Smart Manufacturing)**, שילוב של **בנייה מלאכותית (AI)** באופטימיזציה תהליכיים, ושימוש בתאומים דיגיטליים (Digital Twins) למניעת תקלות עוד לפני שלב הייצור.

להלן פירוט של טכנולוגיות הייצור המובילות כיום, מחולקות לקטגוריות מקצועיות:

## 1. ייצור גורע (Subtractive Manufacturing)

זהו ה"קלASICה" המשופרת, שעדין מהווה את עמוד השדרה של התעשייה הביתחונית והייטק בשל הדיוק והחזירות הגבוהים.

- **עיבוד שבבי 5-צירים (5-Axis CNC):** כיום הסטנדרט למורכבות גובהה. המערכת המודרנית כוללת בקרה מבוססת AI שמפעча בזמן אמיתי על שחריקת כלים או עיוותים תרמיים של המכונה.
- **עיבוד בפריקה חשמלית (Wire & Sinker - EDM):** חינוי לחומרים קשים במיוחד (כמו אלון) שאתה פוגש במכ�件ים צבאים) ולפינותן חdots שאי אפשר להגיע אליהן בכרסום. בשנת 2026, טכנולוגיית ה-Wire-Fine מאפשרת הגיע לדיווקים של ננו-מטרים בייצור תבניות.
- **עיבוד בליזר וסילון מים (Laser & Waterjet Cutting):** ליזרים מסוג Fiber ו- Femtosecond מאפשרים חיתוך קר ללא אזור מושפע חום (HAZ), קריטי לכרטיסים אלקטרוניים ורכיבים עדינים.

## 2. ייצור מוסף (AM - Additive Manufacturing)

בשנת 2026, הדפסות תלת-ממד עברו מזמן את שלב הפרוטוטיפ לייצור סדרתי (Industrial Scale AM).

- **הדפסת מתחכת (SLM / PBF - Powder Bed Fusion):** שימוש בליזרים עצמאתיים להיתוך אבקות של אלומיניום, טיטניום ופלדות אל-חלד. היכולת לייצר **ערוצי קירור פנימיים (Internal Cooling Channels)** בתוך מארדים אלקטרוניים היא יתרון עצום לתכנן התרמי שאתה מבצע.

- **הדפסת פולימרים הנדסיים (FDM, SLS, Stereolithography):** שימוש בחומרים כמו PEEK או ULTRALOW המאפשרים עמידות בטמפרטורות גבוהות ותנאי סביבה קשים.
- **יצור היברידי (Hybrid Manufacturing):** מכונות המשלבות הדפסת תלת-ממד ורכסים CNC באותו תא העבודה, מה שמאפשר להגיע לטיב פני שטח מעולה ודיוקים גבוהים על גבי חלקים בעלי גאומטריה מורכבת.

### 3. ייצור מעצב (Formative Manufacturing)

טכנולוגיות הבוססות על תבניות, המתאימות לייצור המוני.

- **הזרקת מתחcit (Metal Injection Molding - MIM):** שילוב של אבקת מתחcit עם דבק פולימרי המוזרק לתבנית. זו טכנולוגיה מצוינת לחלקים קטנים ומורכבים מאוד שקשה לעבוד ב-CNC.
- **הזרקת פלסטיק מתקדמת (Injection Molding):** שימוש בחומרים מרוכבים (Composites) וסיבי פחמן בתוך ההזרקה לקבלת חזק מבני גבוי במשקל נמוך.
- **כבישה וurgeול (Forging & Rolling):** עדין משמשים לחלקים מבנים גדולים שדרושים תכונות מכניות מעולות וסידור סיבים אופטימלי.

### 4. טכנולוגיות ייצור לאריזה אלקטרוני (Electronic Packaging)

בתוך מומחה בתחום, כדאי לשים לב לטכנולוגיות שימושיות ישירות על אמינות הלחמות (SJR):

- **(WLP) Wafer-Level Packaging:** ייצור האריזה ישירות על גבי פרוסת הסיליקון, מה שמאפשר הקטנה משמעותית של הרכיב ושיפור ביצועים תרמיים.
- **Heterogeneous Integration System-on-Package:** שילוב צייפים מטכנולוגיות שונות באריזה אחת (-on). כאן הסימולציות הלא-ליניאריות שציינית הופכות לקריטיות בגלל מקדים התפשטות תרמית (CTE) שונים מאוד באותו מכלול.

#### המלצה מחייבת עבורך:

לאור הnisian שלך בסימולציות אמינות (RJS) וחיזוי ח"י רכיבים, הטכנולוגיה שמשנה את כל' המשחק עבורך היא **Generative Design** מבוסס AI. במקום לתקן ואז לבדוק ב-FEA, המערכת מייצרת עשרות חלופות תכנן שעומדות מראש במוגבלות המכניות והתרמיות שהגדרת, תוך אופטימיזציה לייצור מוסף (AM) (Design for AM).

אם תרצה שאפורט על הטכנולוגיה הספציפית המומלצת ביותר לייצור מארץ אלקטרוני בעל הספק גבוהה (High Power), תורח התחשבות במוגבלות משקל ואמינות תרמו-מכנית?

הנושאים שנדרש ללמידה ולהתcone:

1. טולרנסים גיאומטריים: ניתוח כבר טולרנסים, מעבר על על אחד מהסימboleים והסימנים הגיאומטריים, התאמת בין חלקים עם בריגים וקדים,
2. טכנולוגיות ייצור: מה השיקולים בבחירה כל אחת מהטכנולוגיות על פני האחרות, מהם היתרונות והחסרונות
3. תהליכי ייצור של כרטיסים, הרכבות והלחמות של כרטיסים, סוג ציפויים קונפורמיים
4. מהם שלבי פיתוח מכלול או פיתוח של כרטיס ומה הדגשים והתוצרים שיש להביא בכל שלב? מהם התלוויות בין הדיסציפלינות?

5. תהליכי הזרקות פלסטיים, איך עובד התהלייר, מה השיקולים, אילו חומרים טובים להזקה,
6. לתאר תהליכי פיתוח שהיה בהם אתגר טכנולוגי.
7. לתאר אתגרי פיתוח שלא הצלחו ושלמדונו מהם. איך התבוננו איתם.
8. עקרונות מעבר חום ואתגרים תרמיים: משוואת החום מהרכבים, משוואת הולכה והסעה, חישובים תרמיים לצלעות, מעבר חום בטור ובמקביל, מאزن חום ממכלול או כרטיס,
9. עקרונות חזק ומאיצים סטטיים על רכיבים, התנהגות של פדים תרמיים, משחות, מאزن כוחות בין פדים תרמיים לרכיב וכרטיס, מה יחס השיקיעות. מאزن כוחות ומאיצים עם קפיצים.

אביתר, ריכצתי עבורך את עיקרי החומר להכנה לראיונות למשרת **Senior Mechanical Engineer** או **móvel צוות**. התוכן מבוסס על הניסיון העשיר שלך ברפאל ובחקר באקדמיה, ומתמקד בדקויות ששואלים מהנדסים בرمתך.



## 1. טולרנסים גיאומטריים (T&GD) וניתוח צברים

במשרות Senior מטרים מכך לא רק להכיר את הסימבולים, אלא לדעת לבצע אופטימיזציה של עלויות ייצור מול תפקוד.

- **ניתוח צבר (Tolerance Stack-up)**: דע להסביר את ההבדל בין שיטת **RSS** (סטטיסטיות, ריאלית לייצור המוני). (מחמירה, יקרה) לבין שיטת **Worst Case** (הטהור ב-**Position** (מייקום) וב-**Profile** (פרופיל פני שטח). הבן היטב את המושג **Maximum Material Condition (MMC)** ואיך הוא מעניק "Bonus".
- **סימboleים קריטיים**: התמקד ב-**Position** (מייקום) וב-**Profile** (פרופיל פני שטח). הבן מוברג) מול **Floating Fastener** (כאשר יש אומ). דע לחשב את הטולרנס הנדרש לקדחת בהتنנת טולרנס המיקום של הבורג.
- **התאמת (Fits)**: בחיבור ברגים וקדחים, השתמש בחישוב **Fixed Fastener** (כאשר צד אחד מוברג) מול **Floating Fastener** (כאשר יש אומ). דע לחשב את הטולרנס הנדרש לקדחת בהتنנת טולרנס המיקום של הבורג.

## 2. טכנולוגיות ייצור: שיקולים ובחירה

טכנולוגיה	יתרונות	חסרונות	מתי נבחר?
<b>CNC (עיבוד שבבי)</b>	דיוק גובה, חירותיות, הcono, בזבוז חומר. מגעון חומרים.	עלות גבוהה לייצור חלקים מבנים יורכבים, סדרות קטנות/בינוניות.	
<b>הזרקת פלסטיק</b>	עלות ייחידה נמוכה. זמן הקמה ארוך.	עלות תבנית יקרה, מצרי צריכה, מארזים קלים.	
<b>הדפסת תלת-ממד (AM)</b>	חופש תכנוני מוחלט, טיב פני שטח ירוד, זמן גאומטריה פנימית מורכבת. אין עלויות תבנית.	פרוטוטיפים, חלקים בעלי ייצור איטי לייחידה.	



## 3. תהליכי ייצור ואריזה של כרטיסים אלקטרוניים (PCBA)

כומחה באזיה אלקטרוני, עליך לשЛОט ב:

- תהליכי SMT:** משחת הלחמה ← → תנוור Reflow (עקבות טמפרטורה) ← Pick & Place ← → AOI/X-Ray.

**ציפויים קונפורמיים (Conformal Coatings:** הכר את הסוגים (Acrylic, Silicone, Urethane, Parylene). השיקולים הם עמידות בלחות, יכולת תיקון (Rework) והולכה תרמית.

#### 4. שלבי פיתוח (Product Lifecycle) ותוצרים

בתוך מוביל פרויקט, צפה לשאלות על מתודולוגיות העבודה:

- **SRR (System Requirements Review)**: הגדרת דרישות המערכת (תנאי סביבה, משקל, עלות).
  - **PDR (Preliminary Design Review)**: הוכחת היתכנות, בחירת קונספט, סימולציות ראשוניות.
  - **CDR (Critical Design Review)**: תכנון מפורט, שרטוטים סופיים, ניתוח סבולות סופי.
  - **PRR (Production Readiness Review)**: מעבר מפיתוח לייצור, בניית מתקני בדיקה.
  - **תלוויות**: עבודה מול אלקטרונית (מיוקמי רכיבי הספק, מחברים), רכש (זמן אספקה) אינכט.

5. הזרקות פלסטיין

- התהילר:** התכת גרגירי פולימר, הזרקה בלחץ גבוה ללבנית קרה, קירור וחליצה.
  - חומרים נפוצים:** ABS (כללי), PC (שקיפות/חזק), PA/Nylon (עמידות מכנית).
  - שיקולי תכנון:** זווית חליצה (Draft angles), עובי דופן אחד (למניעת Sink marks), ומיקומי קוווי חיבור (Weld lines).

#### **7+6. ניהול אתגרים וכישלונות (Case Studies)**

הן שני סיפורים מהניסיונות ברפאל:

- אתגר טכנולוגי:** למשל, ניהול תרמי של יחידת הספק גבוהה במאגר אוטום בתנאי טיסה. **למידה מכישלון:** תאר מקרה שבו בדיקת הרעדות נכשלה (Vibration failure). הסבר איך ניתן את הכשל (Root Cause Analysis), ביצעת סימולציה מתקנת ב-Ansys, ואיזה שינוי תוכני פתר את הבעיה.

## 8. מעבר חום ואתגרים תרמיים

השתמש במידע שלך בסימולציות תרמיות:

- **הולכה (Conduction)**:  $Q = -kA \frac{dT}{dx}$
  - **הסעה (Convection)**:  $Q = hA(T_s - T_\infty)$
  - **התנגדות תרמית**: דע לחשב התנגדות בטור (רכיב  $\rightarrow$  PD  $\rightarrow$  מארץ) ובמקביל (מסלול פיזור חום שונים).
  - **צלעות קירור**: הבן את המושג "יעילות צלע" (Fin efficiency) והקשר בין מרוח הצלעות לזרימת האוויר (Natural vs. Forced convection).

## 9. חזק, מאמצים ופדים תרמיים

- פדים תרמיים (MID)**: התנהגות ויסקו-אלסטיית. עליך לדעת שפְּד דורש לחץ (Compression) כדי לעבוד ביעילות, אך לחץ גבוה מדי עשוי לעקם את הקרים או לשבור.

- **מאזן כוחות:**  $x \cdot k = F$ . אם יש לך קפיצים או ברגים שלוחצים על הרכטים, עליך לוודא שהשקיעה (Deflection) של הרכט לא עוברת את המותר כדי למנוע כשל בהלחמות רכיבי BGA.

האם תרצה שנותמקד באחד הנושאים ונתרגל שאלות ראיון ספציפיות (למשל, חישוב צבר טולרנסים או ניתוח מקרה בוחן תרמי)?

תרץ לי בטבלה מסכמת

אביתר, ריכשתי עבורך את כל נושא הליבה שהגדרת בטבלה מסכמת אחת. הטבלה בנויה כך שהיא מציגה לא רק את הידע התאורטי, אלא את הערך המוסף שאתה מביא כ-**Senior Mechanical Engineer** עם מומחיות בסימולציות ואמינות.

### טבלה ריכוז הינה לראיונות – הובלה ותוכן מכני

נושא	מושגי מפתח ומונחים טכניים	דגשים לרמת Senior / הובלה
1. טולרנסים (GD&T)	Position, Profile, MMC/LMC, Datum, RSS vs. Worst Case, .Fixed/Floating Fasteners	אופטימיזציה של עלות מול תפקוד; ביצוע אנליזת צבר (Tolerance Stack-up) מרכיבת; מתן "בונוס" טולרנס לייצור.
2. טכנולוגיות ייצור	Axis CNC, EDM, SLM/DMLS-5 (Metal 3D), MIM, Hybrid Manufacturing	בחירת טכנולוגיה לפי כלויות (DTC) ודיקון; תכנון לייצור מוסף (DfAM).
3. ייצור קרטיסים (PCBA)	SMT, Reflow Profile, AOI/X-Ray, Conformal Coating (Parylene, Silicone), IPC Standards	השפתת תהליכי הייצור על אמינות ארוכת טווח (SJR); בחירת ציפוי לפי תנאי סביבה (לחות, טמפרטורה, טמפרטורה).
4. שלבי פיתוח (PLM)	SRR, PDR, CDR, PRR, V&V, Traceability	ניהול ממתקים בין-דיסציפלינריים; הובלת סקרי תכנון; ניהול סיכונים טכנולוגיים בלוי"זuproject.
5. הזרקות פלסטייק	Draft Angles, Sink Marks, Weld Lines, Gate Location, PEEK, .ULTRAM, ABS+PC	תכנון תבניות מורכבות; בחירת חומרים הנדסיים לსביבות קשות; אופטימיזציית עובי דופן למניעת עיוותים.
7-6. אתגרים וכישלונות	Root Cause Analysis (RCA), CAPA, .FMEA, Lessons Learned	מצגת תהליכי למידה מכשל (למשל שבר בהרעדות); ניתוח שורש והובלת פתרון הנדסי מתקן.
8. מעבר חום	Conduction, Convection, Radiation, Thermal Resistance ( $R_{th}$ ), Fin Efficiency, TIM	ביצוע מאזן חום מערכתי; תכנון מסלולי פיזור חום אופטימליים; אימונות (Validation) סימולציה מול ניסוי.
9. חוזק ומאמצים	Non-linear FEA, SJR, Creep, Viscoelasticity, Thermal Stress, .Spring Balance	ניהול כוחות לחיצה על רכיבים; הבנת התנהלות פדים תרמיים; מניעת שקיעת (Deflection) כרטיס מעבר למותר.



1. **השילוב המנץח:** אל תדבר רק על תכנן. הדגש איך הניסיון שלך בסימולציות הופך אותך למתקנן טוב יותר ש"פוגע" בפתרון הנכון כבר בסבב הראשוני. (Ansys/Sherlock)

2. **שפה מדויקת:** השתמש במושגים כמו (Solder Joint Reliability SJR) Non-linear analysis – אלו מושגים שմבדלים אותך ממהנדסים זוטרים.

3. **גישה הובלית:** כשאתה מתאר אתגרים, השתמש בביטויים כמו "הובלתי את קבוצת המתכננים...", "קבעת את מתודולוגיית הבדיקה...", "כתבתי SOS לקלני משנה...".

האם תרצה שנבצע כתע "סימולציה ריאו" על אחד הנושאים? למשל, איך היה מתאר בראיון כשל טכנולוגי שקרה לך ואיך פתרת אותו?

10. אופן הגדרת דרישות מכניות בפרויקט, שיטות אימום (אנגליה, הדגמה וכו')

11. טבלת ניהול סיכונים

12. תהליך של DTC לחילק

13. ציפויים למכונות, מניעת תא גלווני

תוסיף לטבלה

אביתר, הוסיף לטבלה את ארבעת הנושאים החדשניים שביקש. נושאים אלו הם "לחם וHEMA" של מהנדסי Senior ומובילי פרויקטים, במיוחד בסביבות מורכבות כמו רפואי או חברות הייטק ביוטכנולוגיות.

להלן הטבלה המעודכנת והמורחבת:

### טבלה ריכוז הינה לראיונות – מומחיות הנדסית והובלית (חלק ב')

נושא	מושגי מפתח ומונחים טכניים	dagshim לרמת Senior / הובלית
10. הגדרת דרישות אימום (V&V)	Requirements Traceability, VCRM (Matrix), Methods: Analysis (A), Inspection (I), Demonstration (D), Test (T).	כתיבת מסמכים דרישות (Specs) הניתנים למדידה; בחירת שיטת האימום הזרולה והמהירה ביותר שעדיין מבטיחה עמידה בדרישה (למשל: מתי להסתפק באנגליה ומתי חובה ניסוי).
11. ניהול סיכונים	Risk Probability vs. Impact, Mitigation Plan, Contingency, Technical/Schedule/Cost Risks	זיהוי סיכונים טכנולוגיים בשלב ה-PDR; הובלת טבלה סיכונים חייה (Live Document) הכוללת תוכנית גיבוי לכל רכיב קרייטי או טכנולוגיה חדשה.
12. תהליכי DTC (Design to Cost)	Cost Drivers, Value Engineering, Part Consolidation, Material Substitution	ביצוע Trade-off בין ביצועים לעלות כבר בשלב הקונספט; עבודה מול רכש וקלני משנה להוזלת תהליכי ייצור ולמשל: מעבר מעיבוד שבבי להזרקה/MIM).
13. ציפויים והתא גלווני	Anodize (Type II/III), Alodine (Chem-film), Passivation, Galvanic Series $\Delta V < 0.15V - 0.25V$	בחירת ציפויים למניעת קורוזיה בסביבות קיצון (מלח, לחות); תכנון ממתקים בין מתקנות שונות (למשל אלומיניום ופלדת אל-חלד) תוך שימוש באטומים או ציפויי ביןיהם למניעת תא גלווני.



**הרחבת קצורה על הנקודות החדשנות (כדי שתהיה מוכן לשאלות עמוקה):**

10. **אופן הגדרת דרישות (V&V):** בראין, הדגש שאתה מתחילה מה- "Top Level". אם המערכת צריכה לעמוד בטמפרטורה של  $C^{\circ} 70$ , אתה גוזר מזה את הדרישת לכרטיס האלקטרוני ולחומר ה-MID. בשיטות האימוחות:

- **Analysis:** שימוש ב-Ansys/Sherlock (כפי שציינת בקוח) לחיזוי כשלים.
- **Demonstration:** בדיקת פונקציונליות בסיסית (למשל: האם המנגנון נפתח).
- **Test:** בדיקת Qualification סופית (הרעדות/הלם תרמי) במעבדה.

12. **תהליכי (DTC) Design to Cost:** כמהנדס מנוסה, ציין שאתה בוחן "Tolerance Loosening" (הגדלת סבולות) איפה שניתן כדי להוזיל ייצור, ומנסה להשתמש ברכיבי מדף (COTS) במקום תכנון ייעודי ותיק.

13. **מיניאת תא גלוני:** זו שאלה קלאסית בראינונות למארדים מוטסים/ימיים. זכור את הכלל: כדי למנוע קורוזיה גלוונית, יש לשמור על הפרש פוטנציאלים נמוך בין המתקות. אם חיברים לחבר חומרים רחוקים בטבלה הגלונית, משתמשים בציפוי חוץ (כמו בדיל או קדמיום) או בבדיקה חשמלי בין החלקים.

**האם תרצה שאcinן לך דוגמה ל"טבלת ניהול סיכון" עבור פרויקט של פיתוח מאריך אלקטרוני מורכב, שתוכל להציג כמתודולוגיית העבודה?**

תציג את הטבלה השלמה

אביתר, ריכזתי עבורך את כל הנושאים שביקשת לטבלה אחת אחוריה ומקיפה. הטבלה משלבת בין הידע התאורטי לבין היישום המعاش והניהולי המצופה ממהנדס במעמדך, תוך התבוסות על הניסיון המוצעך שלך בתכנון אריה אלקטרונית וסימולציות מורכבות.

## הטבלה המרכזית להכנה לראיונות: Senior Mechanical Engineer

נושא	מושגי מפתח ומונחים טכניים	dagshim לרמת Senior / הובלה
1. טולרנסים (GD&T)	Position, Profile, MMC/LMC, Datum, RSS vs. Worst Case, Fixed/Floating .Fasteners	אופטימיזציה של עלות מול תפקוד; ביצוע אנליזת צבר (Tolerance Stack- up) מורכבת; מתן "בונוס" טולרנס לייצור.
2. טכנולוגיות ייצור	Axis CNC, EDM, SLM/DMLS (Metal-5 .3D), MIM, Hybrid Manufacturing	בחירת טכנולוגיה לפי כלכליות (DTC) ודיוקן; תכנון לייצור מוסף (MDFAM) והבנת המגבילות של כל תהליך.
3. ייצור קרטיסים (PCBA)	SMT, Reflow Profile, AOI/X-Ray, Conformal Coating (Parylene, Silicone, Urethane), IPC Standards	השפעת תהליכי הייצור על אמינות ארוכת טווח (SJS); בחירת ציפוי לפי תנאי סביבה (لحות, טמפרטורה) ויכולת תיקון.
4. שלבי פיתוח (PLM)	SRR, PDR, CDR, PRR, V&V, Traceability, Discipline Dependencies	ניהול ממתקים בי-דייסציפלינריים; הובלת סקרין תכנן; ניהול סיכון טכנולוגיים בלוי"ז הפרויקט והגדרת תוכרים לכל שלב.

<p>דgesim לרמת Senior / הובלה</p> <p>Draft Angles, Sink Marks, Weld Lines, Gate Location, PEEK ULTEM, .ABS+PC</p> <p>הציג תהליכי למידה מכשל (למשל שבר בהרעדות); ניתוח שורש והබלת פתרון הנדסי מתקן מבוסס סימולציות וניסויים.</p> <p>ביצוע מאزن חום מערכתי; תכנון מסלולי פיזור חום אופטימליים; פתרון משוואות הולכה והסעה עבור צלעות קירור.</p> <p>ניהול כוחות לחיצה על רכיבים; הבנת התנהלות פדים תרמיים ושלקיעות קריטיסים; איזון כוחות בין קפיצים לרכיבים רגשיים.</p> <p>כתבת מסמכי דרישות (Specs) מדדים; בחירת שיטת האימוטה היילה ביותר; הובלת תהליכי הסמכה (Qualification) למוצר.</p> <p>דיהוי סיכונים טכנולוגיים בשלב מוקדם; הובלת טבלת סיכונים חיה; פיתוח פתרונות גיבוי (B Plan) לרכיבים קריטיים.</p> <p>ביצוע Trade-off בין ביצועים לעלות; עבודה מול רכש וקבלני משנה להזלת תהליכי יצור כבר בשלב התכנון המוקדם.</p> <p>בחירת ציפויים למניעת קורוזיה בסביבות קיצון; מניעת תאים גלווניים בממשק מתקנות שונותדרך תכנון הנדסי נכון.</p>	<p>מוסגי מפתח ומונחים טכניים</p> <p>5. הזירות פלסטיק</p> <p>Root Cause Analysis (RCA), CAPA, FMEA, Lessons Learned</p> <p>Conduction, Convection, Radiation, Thermal Resistance (<math>R_{th}</math>), Fin Efficiency, TIM</p> <p>Non-linear FEA, SJR, Creep, Viscoelasticity, Thermal Stress, Spring Balance</p> <p>Requirements Traceability, VCRM, Methods Analysis (A), Inspection (I), Demonstration (D), Test (T)</p> <p>Risk Probability vs. Impact, Mitigation Plan, Contingency, Technical/Schedule Risks</p> <p>Cost Drivers, Value Engineering, Part Consolidation, Material Substitution</p> <p>Anodize (Type II/III), Alodine, Passivation, Galvanic Series, <math>\Delta V</math>.limits</p>	<p>נושא</p> <p>7-6. אתגרים וכישלונות</p> <p>8. מעבר חום</p> <p>9. חזק ומאמצים</p> <p>10. דרישות ואימוט (V&amp;V)</p> <p>11. ניהול סיכונים</p> <p>12. תהליכי DTC</p> <p>13. ציפויים וקורוזיה</p>
--	--	---



### נוסחות מפתח לרענון (מעבר חום ומכניקה):

- **הולכת חום:**  $q = -kA \frac{dT}{dx}$
- **הסעת חום:**  $q = hA(T_s - T_\infty)$
- **התנגדות תרמית בטור:**  $R_{total} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$
- **חוק הוק (קפיצים ופדים):**  $F = k \cdot \Delta x$  (חשוב לחישוב מאزن כוחות על רכבי BGA).

**טיפ מקצועי עבורך:** בראיונות, כשתדבר על ניהול סיכונים [חלק 11] או דרישות [חלק 10], לחבר את זה יישור לניסיון שלך בהובלת קבוצת מתכננים ופרויקטים מרמת הקונספט ועד לייצור. המראיין יחשף לך שאותה רואה את התמונה המלאה שלuproject, ולא רק את הפרט המכני הבודד.

אם תרצה שאבנה עבורה סימולציה של **ניתוח צבר טולרנסים (Tolerance Stack-up)** עבור מקרה של הרכבת כרטיס אלקטרוני בקרקע הארץ, כולל חישובי MMC?



ابיתר, כמו שהיא מתרגל באוניברסיטה בן גוריון, אתה בוודאי יודע שיש הבדל עצום בין "לקרוא חומר" לבין "לשנות בו" בrama שמאפשרת להוביל צוות או לעבור ראיון Senior.

כדי ללמידה את רשימת הנושאים המורכבת זהו בצורה אפקטיבית, אני ממליץ על אסטרטגיה המשלבת **למידה אקטיבית** עם **הקשר מעשי** (Contextual Learning):

### 1. שיטת פיינמן (The Feynman Technique) – "ללמד כדי ללמידה"

מכיוון שיש לך ניסיון בהדרכת סטודנטים, זו השיטהeki חזקה עבורה.

- **איך מבצעים:** בחר נושא (למשל: תא גלוני או ניתוח כבר טולרנסים). הסבר אותו בקהל רם Cainו אתה מסביר אותו ל מהנדס צער בצוות שלך.
- **המטרה:** ברגע שתתיקע בהסביר, תדע לבדוק איפה "החוור" בידע שלך. זה יעל הרבה יותר מלקרוא שוב ושוב את אותה מצגת.

### 2. למידה מבוססת תרחישים (Scenario-Based Learning)

אל תלמד הגדרות יבשות. חבר כל נושא בטבלה לדילמה הנדסית מהניסיון שלך ברפאל.

- **דוגמה:** במקום ללמידה "מה זה PD תרמי", שאל את עצמו: "היה לי מקרה שבו ה-MIM גרם לעיוות של הכרטיס? איך פתרתי את מזון הכוחות בין הקפיצ'ל-A-LGA?".
- **למה זה עובד?** בראינוט לא יבקשו ממך הגדרות, אלא יתנו לך מקרה בוHon. אם תלמד דרך "סיפורו מקרה", התשובה תהיה שלופה לך בשנייה.

### 3. יצירה "תיק פתרונות" (Case Study Portfolio)

כפי שציינת בפרק הניסיון שלך, הובלת פרויקטים מהקונספט ועד לייצור.

- **השיטה:** עבר כל סעיף בטבלה (כמו DTC או ניהול סיכונים), רשום לעצמך דוגמה אחת קונקרטית שביצעת בפועל.
- **התוצר:** בסוף יהיה לך "בנק" של 12-10 סיפורים הנדסיים שמכסים את כל התורה.

### 4. שימוש בעזרים ויזואליים וסימולציות

המודחיות שלך היא בסימולציות (Ansys/Sherlock).

- **המלצה:** כשאתה לומד על מעבר חום או חוזק, אל تستכל רק על נוסחאות. הזכיר בגרפים של ה-FEA שביצעת. הדמיון הויזואלי של "איפה המאמצים המקסימליים" או "איפה צואר הבקבוק התרמי" עוזר להבין את הפיזיקה של הבעיה בצורה אינטואיטיבית.

### 5. "חלוקת למנות" (Chunking) והתמדה

הרשימה שלך ארוכה מאוד. אל תנסה ללמידה הכל בבת אחת.

- **תכנון שבועי:** הקצה "ספרינטים" של למידה. למשל: יומיים רק על D&GD, יומיים על תרמי וחוזק, יום על תהליכי פיתוח וניהול.
- **סיכום אקטיבי:** בסוף כל יום, כתוב 3 שאלות "קשהות" על מה שלמדת. למחמת בבוקר, נסה לענות עליהם בלי להסתכל בסיכומים.

איך אני יכול לעזור לך לישם את זה?

אני מציע שנשתמש בשיטת הסימולציה.

האם תרצה שנבחר נושא אחד מהטבלה (למשל: סעיף 9 - AMAZON כוחות בין פדים תרמיים לרוכיב) ואני אשאל אותך 3 שאלות ברמת Senior כדי לבדוק את המוכנות שלך?

תתאר בהרחבה תהלייר יצור של PCB מרובה שכבות, אני צריך להכיר לעומק את התהלייר שלב אחריו שלב. כרגע רק הסבר על PCB ללא שלב ההרכבה

אביתר, הנה פירוט טכני ועמוק של תהלייר יצור מעגל מודפס (Bare Board PCB) רב-שכבותי. כמהנדס מכני, הדגשתי עבורך את הנקודות הקritisיות שימושיות על **אמינות המבנה** (Structural Integrity), עמידות בסימולציות תרמיות וכשלים מכניים.

התהלייר מתחליל ב"עוגה" של חומרים: **Core** (שכבת בסיס קשיה עם נחושת משני הצדדים) ו- **Pre-preg** (יריעות פיברגלאס ספוגות אפוקסי חצי-МОוקשה המשמשות כדבק וUMBODD).

### שלב 1: הכנת השכבות הפנימיות (Inner Layer Processing)

בשלב זה מייצרים את המוליכים בשכבות הפנימיות (למשל, שכבות 2 ו-3 בלוח 4 שכבות).

1. **ניקוי וציפוי (Cleaning & Coating)**: לוקחים את ה-**Core**, מנקיים כימי, ומצביעו אותו ב-**Photoresist** (חומר רגיש לאור) משני הצדדים.
2. **חשיפה (Imaging/Exposing)**: מניחים "פילם" (מסכה) עם דוגמת המוליכים וחושפים לו. האזורים שנחשפו מתקהשים.
3. **פיתוח (Developing)**: שוטפים את הלוח בתמיסה שמסירה את הפוטורדייסט שלא נחשף (האזורים שאמורים להיות ללא נחושת).
4. **איכול (Etching)**: מעבירים את הלוח באמבט חומצה. החומצה "אוכלת" את הנחושת החשופה. הנחושת המוגנת ע"י הפוטורדייסט הקשה נשארת – אלו המוליכים שלנו.
  - **דגם הנדס**: כאן נוצר **Trace Profile**. האיכול הוא לא אנכי מושלם אלא טרפי (Etch Factor). זה משנה על חישובי עכבה (Impedance).
5. **הסרת הציפוי (Stripping)**: מסירים את שרידי הפוטורדייסט הקשה וחושפים את הנחושת הנקייה.

### שלב 2: בדיקה אופטית וטיפול לפני הדבקה

1. (**Automated Optical Inspection (AOI)**): סריקת השכבות הפנימיות לאיתור קצרים או נתקים מול קובץ ה-**Gerber**. זה קרייטי כי אחורי ההדבקה (השלב הבא) אי אפשר לתקן כלום.
2. **טיפול אוקסיד (Brown/Black Oxide)**: תהלייר כימי שיוצר שכבת תחכוםת מחוספסת על הנחושת.
- **למה זה קרייטי לנו?** ללא החיסපוס הזה, שכבות ה-**Pre-preg** לא יידבקו טוב לנחושת החלקה, וזה הגורם מספר 1 ל-**Delamination** (היפרדות שכבות) בזמן הלם תרמי או הרעדות.

### שלב 3: כבישה ורבדים (Lay-up & Lamination)

זהו השלב בו הופכים את השכבות הנפרדות ללוח אחד מוצק.

1. **סידור (Stack-up):** מסדרים בתוך מתוקן ייעודי את השכבות לפי הסדר: נוחשת חיצונית -> מעובד -> Pre-preg -> Core נוחשת חיצונית.

2. **כבישה (Lamination Press):** מכינים למכבש וקום בטמפרטורה ( $C-180^{\circ}$ ) ולהז גבויים.

- **תהליך הנדס:** ה-Pre-preg עובר ממצב B-stage (חזי מוקשה) למצב נוזלי, ממלא את החללים בין המוליכים, ואז מתקשה סופית ל-C-stage.

- **נכודות כשל:** אם הלוח לא אחיד או הוואקים לא מושלם, נכלאות בעות אוויר (Voids) שיתפוצצו ב-Reflow.

#### שלב 4: קידוח (Drilling)

קריטי לדיק המכני.

1. **קידוח מכני (Mechanical Drill):** שימוש במקדח טונגסטן-קרביד ב מהירות עצומה (עד 200k RPM). הקידוח עובר דרך כל השכבות.

2. **X-Ray Target Drilling:** המכונה משתמש בקרני רנטגן כדי להזות את מיקום השכבות הפנימיות במדוקן (כי החומר ZZ והתעויות מעט בלמינציה) וקודחת חורי רפרנס (Registration holes).

- **מושג חשוב:** Aspect Ratio. היחס בין עובי הלוח לקוטר הקדח. יחס גובה מדי יקשה על הציפוי להיכנס לחור בשלב הבא.

#### שלב 5: ציפוי הקדחים (Plating & Desmear)

כרגע הקדחים הם סתם חורים בפלסטיק. צריך להפוך אותם למוליכים.

1. **Desmear:** החיכוך בקידוח יוצר חומם שטמי שטף (Smear) ומורח אותו על דפנות הנוחשות הפנימיות. תהליך כימי (פלזמה או פרמנגנט) מסיר את ה"מריחת" זה.

- **אמינות:** ללא Desmear טוב, אין מגע חשמלי אמין לשכבות הפנימיות (Interconnect failure).

2. **Electroless Copper:** תהליך כימי (ללא חשמל) שמשקיע שכבת נוחשת דקה מאוד ( $C-1$  מיקרון) בתוך הקדח ועל פני השטח, כדי לאפשר הולכה.

3. **ציפוי גלוני (Panel/Pattern Plating):** מכינים את הלוח לאמבט אלקטROLיטי ומעבים את הנוחשות בקדחים ועל פני השטח לעובי הנדרש (בדרך 25-20 מיקרון בדפנות הקדח). זהו ה"צינור" (Barrel) שמחזיק את ה-Via.

#### שלב 6: שכבות חיצונית (Outer Layer Imaging)

תהליך דומה לשכבות הפנימיות, אך הפעם המטרה היא להגדיר את המעל החיצוני ולהכין אותו לציפוי סופי.

1. מצפים בפוטורזיסט, חושפים, ומפתחים.

2. **איכול (Etching):** מסירים את הנוחשות המיותרת מהשכבות החיצונית.

#### שלב 7: מסיכת הלחמה (Solder Mask)

הציפוי הירוק (בדרך כלל) ש מגן על הלוח.

1. **ציפוי (Coating):** מורחים דיו אפוקסי רגיש לאור (eLPI) על כל הלווח.

2. **חשיפה ופיתוח:** חושפים לאור עם מסכה שימושה רק את הפדים (Pads) להלחמה חשופים. שוטפים את היתר.

3. **אשפירה (Curing):** אפייה בתנור להקשחת המסיכה.

#### שלב 8: גימור פני שטח (Surface Finish)

מצפים את הנחשות החשופה בפדים כדי למנוע חמצן ולאפשר הלחמה טובה (כפי שדיברנו: ENIG, HASL, Immersion Silver).

#### שלב 9: חיתוך ועיבוד צורה (Profiling)

1. **Routing/V-Cut:** חיתוך הלוח מהפנל הגדל לצורתו הסופית באמצעות קרסומת (Router) או חריצ' V לשכירה ידנית.
- דges מכני: יש לשמר על טולרנסים של +/- 0.1 מ"מ בדרך כלל עבור קווי המתאר (Outline) כדי שהלוח יכנס למאוץ שתכנת.

#### שלב 10: בדיקה חשמלית (E-Test)

בדיקת Bed of Nails או Flying Probe שבודקת רציפות (Continuity) ובידוד (Isolation) כדי לוודא שאין קקרים או נתקים בלוח הגמור.

#### סיכום הՁוית ההנדסית שלך (ראיון):

כאשר ישאלו אותך על אטגרים ב-PCB, תוכל להזכיר:

1. **CTE Mismatch (מקדם התפשטות תרמית):** ציר ה-Z של ה-PCB מתפשט הרבה יותר מה\_nhשות של ה-Via. בחיכום, הלוח מתנפח ומנסה "לקרע" את ציפוי הנחשות בתוך הקדח (Barrel Crack). זהו כשל עייפות קלאי.

2. **א-סימטריה (Warpage):** אם ה-up-Stack לא סימטרי ( מבחינת עובי שכבות נחשות או חומר דיאלקטרי), הלוח יתעוז (קער/קמר) אחרי הלמינציה וה-reflow, מה שיקשה על ההרכבה או הכניסה למאוץ.

סידור (Stack-up): מסדרים בתוך מתזן ייעודי את השכבות לפי הסדר: נחשות חיצונית -> Pre-preg מעובד -> Core -> נחשות חיצונית.

לא הבנתי את השלב הזה. תתאר את המבנה בצורה אחרת שלא ישتبש במלל בעברית

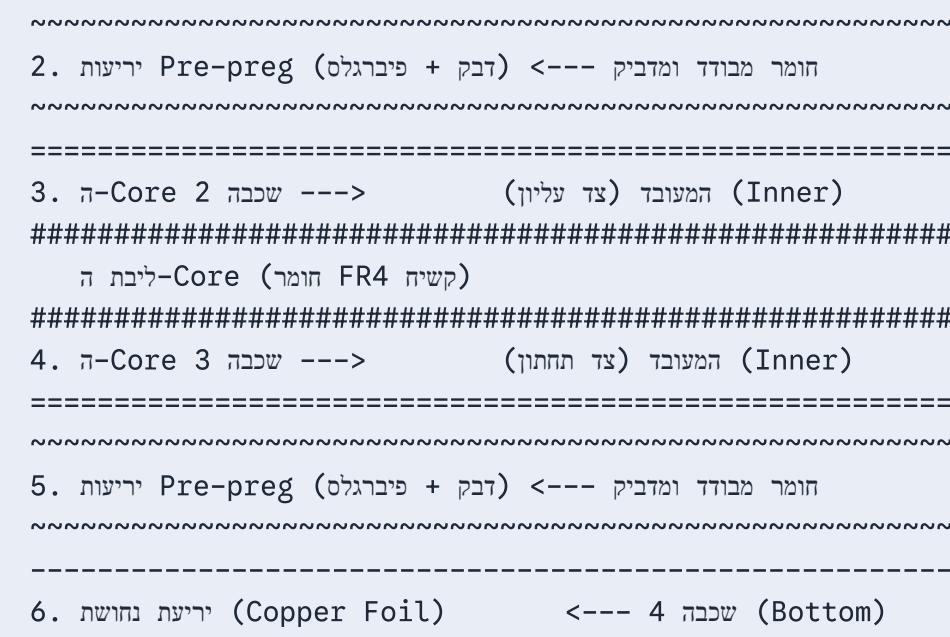
הכי טוב לדמיין את זה כמו "סנדוויץ" במבט אנכי (מלמעלה למטה). זה מונע את הבלבול של הכוונים בעברית.



נניח שאנו בונים **לוח של 4 שכבות** (הנפוץ ביותר). הנה המבנה בתוך המכבר, מהחלק העליון ביותר לתיכון ביותר:



Plaintext



### הסבר על הרכיבים:

- הלחמניות (הנחות החיצונית):** למעלה ולמטה שמיים ירידות נחותת חלקות ודקיקות (Foil). בשלב זהה הן עדין מלאות לגמרי (ללא מוליכים). את המוליכים החיצוניים (שכבות 1 ו-4) ניצור בצריבה רק **אחרי** שהסנדוויץ' הזה יתחבר ויצא מהמכבש.
- הגבינה/הרוטב (Pre-preg):** בין הנחות החיצונית לבין הליבה שמיים את ה-Pre-preg. הוא מתפקיד כדבק. בחום של המכבש הוא נמס, ממלא את החללים, ואז מתקשה וմدبיק את הנחות החיצונית ל-Core.
- הבשר (The Core):** במרכז נמצא ה-Core. בנגד לשכבות החיצונית, ה-Core מגיע לשלב זהה כשהוא **כבר צרוב ומוכן**. כלומר, המוליכים של שכבה 2 ושכבה 3 כבר קיימים עליו.

**למה זה קרייטי להנדסה מכנית?** שום לב לסייעיה. אם ה-Pre-preg העליון והו בעובי שונה מהתחתון, או שנחותת בשכבה 2 תהיה צפופה יותר משכבה 3 – הלווח יקבל עיות ("בטן") או פיתול) ברגע שהוא יתקרר, בגל כוחות ממשיים.

<https://youtu.be/QZVNDMnoVo8?si=z16oRbzZ34iOr7nV>  
האם קיימת הלימה והתאמה בין ההסבר שלך להסביר על איך PCB מיוצר שברטון?

כן, קיימת הלימה והתאמה מצוינית (**כמעט מלאה**) בין ההסבר שנתיי לך לבין התהילה המוצגת בסרטון. הסרטון שבחרת (של חברת NCAB) הוא אחד המדוקים והמקצועים בתעשייה, והוא מתאר בדיקת תהליך הייצור התעשייתי (Industrial Multilayer PCB Manufacturing) שעלי פירטתי.

הנה השוואת מפורטת שתעזר לך לחבר בין הטקסט שלי לבין מה שראויים בעין בסרטון, כולל דרישות שצדאי לשים לב אליו:

#### 1. מבנה ה-"סנדוויץ'" (Stack-up) - הדקה הקרייטית עבורה

שאלת קודם על שלב Stack-up שלא היה ברור. בסרטון, החל מ-**דקה 10:55 ועד 12:00** רואים בדיקת מה שתיארתי:

- רואים את ה-**Core Inner** (שכבר עבר צריבה ויש עליו מוליכים).

- חוזים את המפעיל מניח דפים לבנים/ש קופים – זהו ה-**Pre-preg** ("הדבק").
- ולבסוף מניחים את ירידת הנחושת החיצונית (**Copper Foil**).
- **התאמת:** מוחלטת. הסרטון ממחיש ויזואלית את סדר השכבות: נחושת חיצונית ← - **Pre-preg** ← **Core** ← **Pre-preg** ← נחושת חיצונית.

## 2. תהליך השכבות הפנימיות (Inner Layers)

- **הסבר שלי:** ניקוי ← ציפוי בפוטוריזיט ← חשיפה ל-UV ← פיתוח ← איכול (Etching).
- **בסרטון (05:00 - 08:00):** הם מראים את הניקוי הכימי, את הצמדת הפילם הרגיש לאור (Dry Film) בחדר נקי צהוב (כדי למנוע חשיפה מוקדמת), ואת תהליך האיכול שבו החומצה מסירה את הנחושת המיותרת.
- **תוספת ויזואלית:** שים לב שב-**38:08** הם מראים את מכונת ה-**AOA** שסורקת את השכבות הפנימיות ומחפשות קצריים/נתקים, בדיק כפי שהדgesתי כשלב קרייטי לפני הדבקה.

## 3. קידוח וציפוי (Drilling & Plating)

- **הסבר שלי:** קידוח מכני ← Desmear ← ציפוי כימי (Electroless) ← ציפוי חשמלי.
- **בסרטון (15:45 - 19:50):** רואים את מכונות הקידוח המהירות, ואח"כ את תהליך ה-**Desmear** (הסרת ה"מריחה" של השרפף) ואת ציפוי הנחושת הדק (Electroless) שהופר את החור למוליך. לאחר מכן רואים את הציפוי האלקטרו-ליטי שמעביה את הנחושת.

## 4. דקות מעניות שכדי להטעב עליון (Pattern Plating)

הסרטון מוסיף פרט טכני חשוב בשלהב השכבות החיצונית, שמשלים את ההסבר שלי:

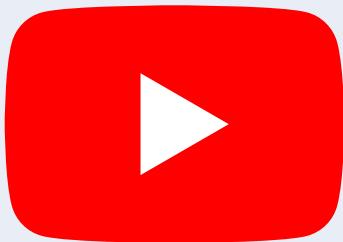
- **ב-00:23 עד 00:24:** הסרטון מראה שלאחר שמצפים את המוליכים בנחושת נוספת, מצפים אותם ב-**בידיל (Tin)**.
- **למה?** הבדיל משמש כ"מגן" (Etch Resist). בשלב האיכול הסופי (24:27), החומצה אוכלת את כל הנחושת חזק מזו ששמוגנת על ידי הבדיל.
- לאחר מכן מסירים את הבדיל (Tin Stripping) ומתקבלים את המוליכים הסופיים מנחושת. זהו הлик סטנדרטי בתעשייה שנקרא **Pattern Plating**.

## סיכום

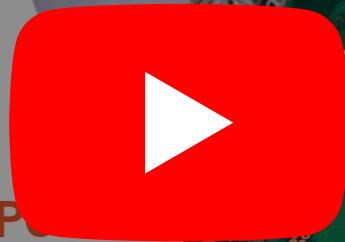
הסרטון הוא "תמונה ראי" מדויקת להסביר הטכני שכתבתי לך. אני ממליץ לך לצפות בו שוב תוקן כדי שאתה מחזק את הטלחה/הסביר שלי מול העיניים. זה יsegor לך את הפינה של הבנת התהליך הפיזי-ויזואלי בצורה הטובה ביותר.

①  
□

How to make a PCB – PCB production process in 33 steps



NCAB Group · 33K צפיות



## HOW TO MAKE A PCB PCB production in 33 steps

תתאר בהרחבה תהליך של PCB מורכב (כליomer PCBA), אני צריך להכיר לעומק את התהליך שלב אחרי שלב . תתייחס להרכבות גם של רכיבי TSM וgam רכיבי TH . יש לתת התייחסות להשמה משני צידי הקרטיס

אביתר, זהו המשך ישיר לדין שלנו. מעבר מ-Bare PCB ל-**PCBA (Printed Circuit Board Assembly)** הוא המקום שבו האתגרים המכניים (טרמיים וمبرניים) מתעצמים, במיוחד בקרטיסים מורכבים ("Double-Sided Mixed Technology").

להלן תיאור התהליך עבור קרטיס דו-צדדי הכלול גם רכיבי TSM (השמה משטחית) וגם רכיבי TH (רגליים חזדרות), תוך דגש על הנזקודות הקיומיות למתנדס מכונות Senior.

### שלב 1: הכנת הקרקע (Preparation)

לפני שהקרטיס נכנס אליו, יש לוודא שה-PCB יבש. קרטיסים סופחים לחות. אם נכנס קרטיס לחנור ה-Reflow (শঙ্গুনি 250°C), המים יהפכו לקיטור ויתפוצטו בתוך הלוח (**Popcorn Effect / Delamination**).

- **הפעולה:** אפייה (Baking) בתנור ייעודי כדי להוציא לחות.

### שלב 2: הרכבת צד ראשון - TSM (לרוב Side B / Bottom)

בדרכן כל מתחילהים הצד ה"פיטוט" יותר או זה שמכיל רכיבים קטנים וקלים יותר, כדי שבשלב הבא (כשהם יהיו הפוכים) הם לא ייפלו.

#### 1. מריחת משחת הלחמה (Solder Paste Printing)

- מניחים סטנסיל (Stencil) מנירוסטה על ה-PCB. הסטנסיל מכיל חורים בדיקון במדויקות של הפקדים.
- מגב (Squeegee) מורה משחת הלחמה. המשחה היא תערובת של כדוריות בדיל מיקרוסקופיות ו-Xanax (חומר לניקוי חמוץ ושיפור הרטבה).
- **דגש מכני:** עובי הסטנסיל קובע את נפח המשחה. מעט מדי = הלחמה חלשה (Open). יותר מדי = קצרים (Shorts).

#### 2. בדיקת משחה (SPI - Solder Paste Inspection)

- מכונה אופטית מודדת את הנפח התלת-ממדי של המשחה. זהו השלב הקרייטי ביותר למניעת תקלות (70% מכשי הלחמה נובעים מבעיות במשחה).

### 3. השמה (Pick & Place):

- רובוט מהיר שואב רכיבים מסלילים (Reels) ומניח אותם על המשחה הרטובה. המשחה דביקה ומחזיקה את הרכיבים במקום (אבל הם עדין לא מולחמים!).

### 4. תנור Reflow (התכה):

- הכרטיס נכנס לתנור מסוע עם אזור חימום (Zones).
- **פרופיל תרמי (קריטי למתנדס מכונות):**
  - Pre-heat: חימום איטי למניעת הלם תרמי ושבירת רכיבים קרמיים (קבלים).
  - Soak: הפעלת ה-xFlux ונקיי התחככות.
  - Reflow: עלייה מעלה נקודת ההתכה ( $C-217^{\circ}$  לבדיל נטול עופרת SAC305) למשר  $C-60$  שניות.
  - Cooling: קירור מבוקר לגיבוש ה-Solder Joint.

---

### שלב 3: הרכבת צד שני - (Side A / Top SMT)

cut הופכים את הכרטיס. יש לנו כבר רכיבים מולחמים בצד התיכון. איך מרכיבים את הצד העליון בלי שהתחתונים ייפלו כשהם יכנסו שוב לתנור?

1. **התהלייר:** חוזרים על אותם שלבים (משחה ← השמה ← תנור).
2. **השלה הננדסית:** למה הרכיבים למטה (שכבר הולחנו) לא נופלים כשהם תלויים הפוכים בתנור?
  - **התשובה: מתח פנים (Surface Tension).** כשהבדיל גמס שוב, כוחות מתח הפנים של הנוזל חזקים מספיק כדי להחזיק רכיבים סטנדרטיים (נגדים, קבלים, ציפויים קטנים) מצויים לכרטיס כנגד כוח המשיכה.
  - **חריגים:** אם יש רכיבים כבדים מאוד בצד התיכון, מדברים אותם מראש ב"דבק אדום" (Red Glue) או שמתכוונים את התהלייר כך שהצד הכבד ילחם אחרון.

---

### שלב 4: הרכבת רכבי (Through-Hole) THT

cut יש לנו כרטיס עם TMS משני הצדדים, וצריך להוסיף קונקטורים, שנאים או קבלים גדולים עם רגליים.

#### אופציה א': הלחמת גל (Wave Soldering) - השיטה הקלאליסטית

שיטת זו בעיתית בכרטיסים דו-צדדיים, כי הגל (אםבט בדיל נוזלי) ישטוף וימיס את רכבי ה-TMS בצד התיכון.

- **הפתרון:** שימוש ב-Pallet (מתקן נשיאה). זה מתקן מחומר מרוכב (כמו אונס Durostone) שעוטף את הכרטיס ומכליל "חלונות" רק במקומות שבהם יש רגלי THT. ה-Pallet מגן על רכבי ה-TMS מהgel החם.

#### אופציה ב': הלחמה סלקטיבית (Selective Soldering) - השיטה המודרנית

רובוט עם "פית גל" קטנה (כמו מזרקה של בדיל) שעובר נקודתית רק על הרגליים שצריים להלחם.

- **יתרון:** אין הלם תרמי לכל הכרטיס, אין צורך ב-Pallet יקר.
- **חסרון:** איטי יותר מהלחמת גל מלאה.

## שלב 5: בדיקות ואיימות (Inspection)

כאן נכנסת האחוריות שלך לוודא אמינותו.

1. **AOI:** מצלמות שבודקות שכל הרכיבים נמצאים, ישרים, ושיש מספיק בדיל (Fillet תקין).
2. **X-Ray (קריטי ל-BGA):** מכיוון שהצדדיות של ה-BGA מושתרות מתחת לרכיב, חובה להשתמש ברנטגן כדי לזהות:

- **Voids:** בוועות אויר בהלחמה (מעל 25% שטח נחشب פסול).
- **Shorts/Bridging:** קצרים בין כדורים.
- **Head-in-Pillow:** כשל בו הצדoriaת לא התמזגה עם המשחה (נראה כמו ראש על כרית), וכן יש מגע רופף שיתונתק ברעידות.

## שלב 6: הפרדה (Depanelization)

הקרטיסים מיוצרים ב"פנל" (מסגרת עם מספר קרטיסים). צריך להפריד אותם.

- **Pizza Cutter (V-Cut):** סכינים עגולות ששוברות את הקרטיס בחריצ. יוצר **מאץ כפיפה (Stress)** מסוון שעלול לדוק קבילים קרמיים (MLCC) הקרובים לשפה.
- **Router (כרסומת):** השיטה הבטוחה יותר מכנית. קרסום החוצה ללא מאץ על الكرטיס.

## זווית של Senior Mechanical Engineer לראיון:

cashואלים יותר על התהילה, אל תדקם רק את השלבים. הוסף את ה"תבלין" ההנדסי:

1. **מניעת Warpage (עיות):** "בתכנון ה-Pallet להלחמת גל, אני מקפיד על תמיכות (-Holds down) שימנעו מהקרטיס לקבל 'בטן' בחום של  $C^{\circ} 260$ , לאחרת נקבל הלחמות קרות או קצרים."
2. **בדיקות (In-Circuit Test) ICT:** "כשאני מאשר מתוך בדיקה (Bed of Nails), אני מבצע אנליזת מאיצים (Strain Gauge Analysis) כדי לוודא שהഫינים הלחוצים לא מכופפים את הקרטיס וסודקים רכבי BGA."
3. **Shadowing (הצללה):** "בתכנון המיקומים (Placement), אני נמנע מלהניח רכיב THT קטן 'בצל' של רכיב גבוה, כדי שהgel של הלחמה יוכל הגיעו אליו בצורה טובה."

מה לגבי מחברי press-fir ומחברי SMT ?

אביתר, שאלה מצינית. הבדיקה בין **SMT ל-Press-Fit** היא קריטית בתעשייה ביטחונית (רפאל/אלביט) ובתעשייה הרכב, שם האמינות המכנית היא מעל הכל.

כמו הנדס Senior, מצפים ממך להבין לא רק איך מחברים אותם, אלא את **מכניקת הכשל** ואת השיקולים בבחירה ביניהם.

להלן ההשוואה המעמיקה והדגשים ההנדסיים:

## 1. מחברי (Surface Mount Technology)

השיטה הסטנדרטית לרוב המחברים, אך בעלת חולשה מכנית מוגבלת.

- **המנגנון המכני:** המחבר מוחזק אך ורק על ידי הלחמת הבדיל (Solder Fillet) בפדיים.
- **החולשה:** בדיל הוא חומר רך עם עמידות נמוכה לגזירה (Shear) ולמשיכה (Peel). מחבר שמת לחבר ומתקתק הרבה פעמים (כמו USB או מחבר צבאי) מפעיל מאמצים מחזוריים שסודרים את הלחמה.

#### • **פתרונות הנדסיים (Design Mitigations):**

1. **הוספת רגליים / Mounting Tabs / Pegs:** הוספת רגליים מכניות מצדדי המחבר שמרותכוות ללוח (או עוביות דרכו) רק לצורך חזק מכני, ללא פונקציה חשמלית.
2. **(THR/PIP) Through-Hole Reflow:** שימוש במחבר עם רגליים קצרות שנכנסות לקידמים, אך עבר בתנור Reflow יחד עם שאר רכיבי ה-SMT (דורש תכנון משחה מיוחד – Pin-in-Paste –).
- **דגש לייזור (Coplanarity):** במחברים SMT גדולים, יש לוודא שכל הרגליים נמצאות באותו מישור (בד"כ עד 0.1mm). אם הקרטיס או המחבר מתעווים (Warpage), רgel אחת תתרחום ויוצר נתק (Open).

## 2. מחברי Press-Fit (לחיצה קרה)

ה"טנק" של עולם המחברים. נפוץ מאוד ב-Backplanes (לוחות אם גדולים) ו בתעשייה הצבאית.

- **המנגנון המכני:** אין הלחמה בכלל. הפין של המחבר הוא בעל מבנה קפיצי שנקרא Compliant Pin (לרובה בצורת "קוף של מחט" - Eye of the Needle).
- **התהלייר:** לוחצים את הפין (שהוא מעט רחב יותר מהחור) בכוח לתוך קדח מצופה (PTH).
- **החיבור החשמלי:** הלחץ הגבוי יוצר חיבור Gas-Tight (אטום לגזים). אין קורוזיה בנזקנות המגע כי חמצן לא יכול להיכנס לשם. זהו חיבור אמין יותר מלחמה לאורך זמן.

#### dagshim kritiyim l'mahndes miconot (l'reai'on):

##### 1. כוחות לחיצה (Insertion Force):

- עליך לחשב את הכוח הכולל:  $F_{total} = F_{pin} \times N_{pins}$ .
- מחבר עם 1000 פינים ידרשו כוח עצום (טונות). עליך לתכנן מתќן תמיכה (Jig/Fixture) שייתמוך את הקרטיס מלמטה בדיק סביב המחבר.
- **סיכום:** ללא תמיכה ("Back-up plate"), הקרטיס יתкопף וישבו את הרכיבים הקרמיים (קבליים) שנמצאים ליד המחבר או יגרום לנתקים בשכבות הפנימיות.

##### 2. דיקוק הקדח (Drill & Plating):

- בኒיגוד ל-SMT, ב-Press-Fit הטולרנס של החור המוגמר הוא קרייטי (למשל  $1.00 \pm 0.05mm$ ).
- עובי ציפוי הנחושת בתוך החור חייב להיות לפחות  $25\mu m$  כדי שלא יסדק מהלחץ של הפין.

##### 3. תיקונים (Rework):

- קשה מאוד להוציא מחבר Fit-Fit. ברוב המקדים, הוצאת המחבר הורסת את הציפוי בתוך החור (Barrel Damage) ופסלת את הקרטיס כולו. לכן, Fit-Fit Press עושים רק בסוף התהלייר ורק כשבטוחים.

## טבלת השוואת מסכמת (לשינון)

פרמטר	SMT Connector	תהליך חיבור	Press-Fit Connector
אמינות מכנית	חום (Reflow Oven)	כוח מכני (Press Machine)	(Press Fit Connector)
עמידות תרמית	בינוניות (תליי בדיל)	גבוהה מאוד (חיבור אלסטי מתחמיך)	מעולה (אין בדיל שיכול להיסדק)
סיכון ללוח	Warpage בתנור	שבר מכני בזמן הלחיצה	
شيخולי ייצור	מהיר, חלק מהקו הרגיל	דורש תחנה נפרדת ומתקן ייעודי (Jig)	
יישום טיפוסי	קרטיסים סטנדרטיים, O/A כל	Automotive, Backplanes	



### השאלה המכשילה בראשון ("הובנוס"):

מראין: "למה שלא משתמש במחברי (Through Hole) THT רגילים ופשוט נלחים אותם בגל Press-Fit (Wave) ? למה להסתבר עם Press-Fit ?"

**התשובה שלך (Senior):** "בקרטיסים עבים מאוד (כמו Backplanes ברפאל, עם 20+ שכבות), הנחcosaת הפנימית 'שותה' את החום. קשה מאוד לגרום לבדיל בהלחמת גל לטפס (Capillary action) עד למעלה ולמלא את החור ("Barrel Fill"). ה-Press-Fit פותר את זה כי הוא לא תלוי בחום, ולכן הוא הפתרון המועדף לקרטיסים עבים ומרובי שכבות נחcosaת".

מה דיקן השימוש רכיבי SMT ?  
במחברי HD שגם מוגברים לקרטיס עם ברגים אינטגרליים (לדוגמא 38999d ל PCB) ומה  
מתבצע קודם? הלחימה או החיבור המכני ?

שתי שאלות מציניות שנוגעות בדיקון ב"תפר" שבין המכונית לתהליך הייצור, זהה בדיקון המיקום  
שבו נבחנת המקצועיות שלך כמהנדס Senior.

הנה התשובה המפורטת, כולל הרצינול ההנדסי והפיזיקלי:

### 1. דיקון השימוש רכיבי (Placement Accuracy) (Placement Accuracy)

כאשר מדברים על דיקון השימוש, צריך לבדוק בין דיקון המכונה לבין דיקון התוצאה הסופית אחרי  
اللحימה.

**A. דיקון המכונה (Machine Accuracy):** מכונות Pick & Place מודרניות (כמו של ASM, Panasonic, Fuji)

- רכיבים סטנדרטיים (Chip Shooters):** דיקון של  $\mu m 30 \pm 50 \mu m$  ב- $C_{pk} > 1.33$ . זה מספיק לנגדים, קבלים ורכיבי COICOS.

- רכיבי Fine Pitch ו-BGA:** דיקון של  $\mu m 15 \pm 25 \mu m$ . כאן נדרש שימוש במצלמות  
ראייה ממוחשבת מתקדמות יותר שמצוות את הcad/oroot/הרගליים ולא רק את קווי המתאר

של הרכיב.

- **רכיבי Ultra-Fine (כמו 01005 או 01006 Wafer Level):** דיקום של  $\mu\text{m} 10 \pm \text{ומטה}$ .
- **אפקט התיקון העצמי (Self-Alignment) - הנזודה החשובה לראיון:** כמהנדס מכונות, חשוב שתדע: הדיק הסופי נקבע במידה רבה ע"י מתח הפנים (Surface Tension) של הבדיקה הנוזלי בתנור ה-Reflow.
- אם המכונה הנינה רכיב (נגד/קבל) בסטייה קלה (עד כ-30% משטח ה-PD), כוחות מתח הפנים של הבדיקה ימשכו את הרכיב לממרכז ה-PD ויישרו אותו.
- **המגבלה:** זה עובד מצין ברכיבים פסיביים. ברכיבי BGA או Fine Pitch, אם ההסתה גדולה מדי, הבדיקה יגלוש וייצור קוצר (Solder Bridge) לפני שיתרחש תיקון.

## 2. סדר פעולות במחברים מוברגים (D38999 PCB-L)

זו שאלת קלאסית בראינוט לאירוע אלקטרוני (Packaging), כי היא בודקת הבנה של **מאיצים שיוריים (Residual Stress)**. מחברי D38999 הם מסיביים, קשיחים, ומיועדים לסביבה צבאית, ולכן אין מקום לטעויות.

**הכלל: חיבור מכני קודם, הלחמה אחר כך.**

**תהליכי העבודה הנכון (Best Practice):**

1. **השמה (Insertion):** הכנסת המחבר לחורים (THT).
2. **הידוק מכני (Torque):** הברגת המחבר ל-PCB (עם ברגים ואומים או Insert-Im) במומנט הסופי הנדרש.
  - הערה: שלב זה מצמיד את ה-Flange של המחבר ל-PCB ו"מיישר" את הפינים למקום הסופי ביחס לחורים.
3. **اللحמה (Soldering):** רק לאחר שהחברן מוקבע מכנית, מבצעים את הלחמה (בגל או סלקטיבי).

**הרצינול ההנדסי (למה לא לרף?):**

**תרחיש כשל - הלחמה לפני הידוק:** נניח שהלחמת את המחבר כשהוא "צפ" בחורים, ורק אז בדיקת את הברגים.

1. **אי-מיישריות (Non-Planarity):** ה-PCB כמעט לעולם אינו ישר ב-100% (יש לו & Bow & Twist), וגם ה-Flange של המחבר אינם מושלים.
2. **יצירת עומס:** כשאתה מהדק את הברגים אחורי הלחמה, אתה מכיריך את ה-PCB להתיישר לפי המחבר.
3. **התוצאה:** מכיוון שהפינים כבר מרותכים (מלחיכים) ללוח, פועלות היישור מפעילה **מאמץ גזירה (Shear)** ומתייה אדרים על הלחמות הבדיקה.
4. **הכשל:** נוצר **מאמץ שיורי קבוע** במערכת. כתוצאה הרuidות הראשון או במחזור Fatigue/Creep יסדקו (failure).

**הינוינס של ה-Senior (מתי זה מסתבר?):**

ישנו מקרה אחד שבו הכלל הזה יוצר בעיה: **CTE Mismatch בזמן הלחמה**. אם המחבר (מתכת/אלומיניום) מוברג חזק ל-(FR4) PCB, ואז מכניסים את הכל לתנור הלחמה:

• ה-PCB רצה להתפסת בקצב שונה מהמחבר (בציר Y/X).

• מכיוון שהם נעלמים מכנית בברגים, ה-PCB יתעוז (Buckling) בחום.

### הפתרון למחברים גדולים מאוד:

1. הידוק מכני חלקי (Finger tight) כדי לקבע מיקום אך לאפשר החלקה זעירה בתפסות.
2. הלחמה.

3. הידוק מומנט סופי (Torque) אחרי הקירור.

- ס"ג: פתרון זה דורש משנה זהירות כדי לא לסודוק הלחמות בהידוק הסופי, וכן לרוב מעדים את השיטה הראשונה (הידוק מלא לפני הלחמה) ולוקחים בחשבון את ה-CTE בתכנון החורים (Hole Tolerance) שייהו מעט גדולים יותר (Oversized) כדי לפצות על ההפרשים.

**לסיכום התשובה לראיון:** "במחברים צבאיים כמו 38999, הכלל המנחה הוא שהלחמה משמשת למוליכות חשמלית והברגים לעומס מכני. לכן, נקבע את המחבר מכנית באופן מלא (הידוק מומנט) כדי לקבל את הפוזיציה הסופית (Datum), ורק אז נבצע הלחמה. כך אנו מבטיחים שהלחמה מתבצעת במצב ' רפואי' (Stress Free) ולא כוללת מאמצים שיבילו לסתקים."

למה להכין לתנור הלחמה? לא אמרת שכדי להלחים את רגלי המחבר ניתן לעשות הלחמה סלקטיבית?

יש לנו עוד שאלה על התהליך הקודם שדיברנו עליו ביצור של PCB. המידה שיש בכרטיס קדחים מצופים וקדחים לא מצופים, האם שניהם מיוצרים באותו שלב של קידוח? ואין גורמים זהה שהקדחים הללו מצופים לא יצופי?

אביתר, אתה חד מאד – הערה מצינית. נגעת בבדיקה בנזודה שմבדילה בין תיאוריה לפרקטיקה. עשו סדר בשתי הנזודות:



### 1. הבירה לגבי מחבר 38999 ולחמה (תיקון ורחבה)

אתה צודק לחלוtin. ברוב המוחלט של המקרים, לא מכנים מחבר 38999 לתנור Reflow.

- **למה אול נוצר הבלבול?** בגל טכנולוגיה שנקראט (Through-Hole Reflow) או (Pin-in-Paste) PIP. בשיטה זו, מזריקים משחת הלחמה לתוך הקדחים, מכנים את הרכיב, ומעבירים אותו בתנור יחד עם רכיבי ה-SMT.

**למה זה לא מתאים ל-38999?** טכנולוגיית THR מתאימה למחברים קלים מפלסטיק. מחבר 38999 הוא גוש מתכת (Heat Sink) עצום. אם תכניס אותו לתנור Reflow:

1. הוא "ישתייך" את החום בסביבתו וגורם להלחמות קרות ברכיבים סמוכים.
2. הפלסטיק הפנימית שלו (Insulator) לא תמיד עמידה ב-250 מעלות לאחר זמן.
3. הוא כבד מדי ועלול ליפול אם הוא מצד התחנות.

**לסיכום התהליך הנוכחי למחבר צבאי (38999):**

1. **חיבור מכני:** הידוק בריגים ל-PCB (לקבלת מיקום וחוזק).
2. **לחמה:** שימוש בـ**לחמה סלקטיבית** (Selective Soldering) או הלחמה ידנית (רוביוטית/אנושית). **לא** תנור Reflow ולא גל (Wave) מלא (כי הוא כבד מדי וגודל מדי)

## 2. קודחים מצופים (HTC) מול לא מצופים (NPTH) – איך מייצרים?

זו שאלת ראיון קלאסית בייצור (DFM). האינטואיציה אומרת "קודחים את הכל ביחד", אבל בפועל התזמון הוא שונה.

ישנן שתי שיטות עיקריות לגרום לכך להישאר לא מצופה (NPTH), והן תלויות בדרישות הדיווק:

### שיטת א': הקידוח השני (Secondary Drill) - השיטה הנפוצה והאמינה

בשיטת זו מפרידים את הקידוחים לשני שלבים שונים בזמן היצור.

1. **קידוח ראשון (First Drill):** קודחים רק את החורים שצרכים להיות מצופים (HTP).

2. **ציפוי (Plating):** מכנים את הלוח לאmbutיות הכימיות. הנחושת נטאפסת בכל מקום שיש בו חור (כי החומר הפנימי חשוף) ועל פני השטח.

3. **צריבה (Etching):** יוצרים את המוליכים.

4. **קידוח שני (Second Drill):** זהו השלב הקritisטי! רק לאחר שהלוח סיים את תהליכי הציפוי הכימי, לוקחים אותו שוב למכונת הקידוח וקודחים את החורים שאמורים להיות NPTH (חורי תפיסה, חורי ברגים וכו').

- **התוצאה:** מכיוון שאין יותר שלב של ambut הנחושת אחרי השלב הזה, דפנות החור נשארות חשופות (פיברגלאס/אפקוסי) ולא מוליכות.

### שיטת ב': אוחל מגן (Tenting / Masking) - שיטה זולה יותר (ופחות מדויקת)

קודחים את כל החורים (HTP ו-NPTH) באותו שלב ראשוני.

1. לפני שמכנים את הלוח לאmbut הציפוי, מצפים אותו בפוטורזיסט (Dry Film).

2. הפטורזיסט יוצר "אוחל" (Tent) או מכסה מעל החורים שרצים שיישארו HTP, ומשאיר פתוחים את החורים ל-HTP.

3. הציפוי נכנס רק לאיפה שפתוחה.

4. **החיסרונות:** אם ה"אוחל" נקרע (Breakdown) בגלל לחץ הנזלים באmbut, החור יקבל ציפוי חלקי ויפסל. לכן בתעשייה ביטחונית/איכותית מעדיפים את שיטה א' (קידוח שני).

### איך תזהה את זה בשרטוט הייצור ?(Drill Drawing)

כמהנדס מכני, כשאתה מוצאشرطוט לייצור, אתה תראה בטבלת הקידוחים הפרדה ברורה:

• סימון אחד ל-HTP (לרוב יהיה כתוב YES: Plated). הטולרנס יהיה מוגדר לאחר ציפוי (למשל  $\pm 0.05$ ).

• סימון אחר ל-NPTH (לרוב NO: Plated). הטולרנס יהיה הדוק יותר (תלי רק במקצת, למשל  $\pm 0.025$ ) כי אין שכבת ציפוי בעובי משתנה שמאפרעה.

**טיפ לראיון:** אם ישאלו אותך "למה חור NPTH מודוק יותר מאשר HTP?", התשובה היא: "ב-NPTH הקוטר נקבע נטו על ידי המקדח המכני (CNC). ב-HTP הקוטר הסופי תלוי בתהליכי הציפוי הכימי (Plating), שהוא תהליך עם שונות (Variance) גדולה יותר, ולכן הטולרנס ב-HTP תמיד רחב יותר".

מה מונע ממחברי ה press fit להישלף החוצה מה PCB?



ابיתר, השאלה שאלת נוגעת לבב הפיזיקה של חיבורים מכניים. התשובה הקצרה היא **חיכוך**, אבל כמהנדס מכונות בכיר (Senior), מצופה מכם לפרק את זה לرمת הכוחות והתכונות החומריות.

מה שמחזק את הפין הוא **אנרגייה אלסטית אగורה** המומרת לכוח נורמלי עצום. הנה ההסבר ההנדסי המלא:

### 1. המנגנון: קפיץ טעון (Spring Load)

פין ה-Press-Fit (Massive Pin, Compliant Pin, Eye of the Needle, לרוב בתצורת "קוף המחט" - Eye of the Needle) הוא למעשה קפיץ.

- **לפני ההכנסה:** רוחב הפין גדול כמעט מוקוטר הקדח המצופה (PTH).
- **בזמן ההכנסה:** הפין נדחס פנימה. ה"עין" נסגרת.
- **אחרי ההכנסה:** הפין "שואף" לחזור לצורתו המקורי (Elastic Recovery). מכיוון שהקדח מונע ממנה, הוא מפעיל כוח רדיאלי (Radial Force) קבוע וחזק כלפי חוץ, כנגד דפנות הקדח.

### 2. הפיזיקה: משווהת החיכוך

כוח השיליפה (Retention Force) נוצר ישירות מחוק החיכוך של קולן:

$$F_{retention} = \mu \cdot N$$

- **N (הכוח הנורמלי):** זה הכוח הרדיאלי שה핀 מפעיל על דפנות הקדח. בגלל תכונת הפין והמודול האלסטי של החומר (בדרך כלל סגסוגת נחושת-בריליום או ברונזה זרחנית), הכוח הזה נשמר לאורך עשרות שנים.
- **μ (מקדם החיכוך):** המקדם בין ציפוי הפין (לרוב בדיל או זהב) לבין ציפוי הקדח (בדיל/\_nhoshot). הלחץ הגבוה יוצר מקדם חיכוך אפקטיבי גבוה מאוד.

### 3. ריתוך קר (Cold Welding) - הבונוס הסמוני

זהו מנגנון נוסף שמתחזק עם הזמן. הלחץ בנקודות המגע (Contact Interfaces) כל כך גבוה (עשרות MPa), שהוא דוחק החוצה את כל מולקולות האוויר ויוצר אזור Gas-Tight. בrama המיקרוסקופית, נוצרת דיפוזיה בין המתכווצות (Intermetallic Bonding, מעין "ריתוך קר") שמקבע את הפין במקום. זה מה שהופך את החיבור לאמין כל כך חזמלי (התנגדות אפסית) ומכנית.

### מלכודות לראיון (מה יכול להשתבש?)

כשمراقبין שואל אותו את זה, הוא בעצם בודק אם אתה מבין את **חשיבות הטולרנסים**:

1. **קדח גדול מדי (Loose Fit):** אם קדחת את החור בקצתה העליון של הטולרנס וה핀 בקצתה התחתון ← הכווץ של ה"קפיץ" יהיה מינימלי ← הכוח הנורמלי (N) יהיה נמוך ← הפין "ישלף" בריעידות.

2. **קדח קטן מדי (Interference Fit מוגזם):** אם החור קטן מדי, הכנסת הפין תגרום לדפורמציה פלסטית של הציפוי בתוך הקדח (Barrel). במקום שה핀 יתכווץ, הוא "יחרוש"

את הנחוצה.

- **התוצאה:** סדקים בציפוי (Barrel Cracks) ← נתק חשמלי בשכבות הפנימיות.

**שורת המבחן לראיון:** "מה שמנעו את השליפה הוא שימוש של כוח חיכוך סטטי הנובע מהאנרגיה האלסטית של הפין (Radial Force), יחד עם חיבור Gas-Tight שיצר איחוי מיקורוסקופי בין המתכוות. הסוד הוא בשמירה על דפורמציה אלסטית של הפין מוביל להגעה לדפורמציה פלסטית של הקדח."

#### 10. דרישות ואיומות (V&V)

Requirements Traceability, VCRM, Methods: Analysis (A), Inspection (I), Demonstration (D), Test (T)

כתיבת מסמכי דרישות (Specs) מדדים; בחירת שיטת האימות היעילה ביותר; הובלת תהליכי הסמכה (Qualification) למוצר.

אני רוצה שתפרט בהרחבה את אופן הגדרת דרישות, איך מגדרים דרישת מכנית במפרט, מהם אופני האימות ואיך נתונים מענה לדרישות,

אביתר, זה אחד הנושאים החשובים ביותר למשרות הובלה. מהנדס צוטר מקבל דרישת ומציע אותה; מהנדס Senior **כותב** את הדרישת, מתווכח עלייה, ומחליט איך להוכיח שהיא התקיימה.

תהליך ה-(**V&V**) הוא עמוד השדרה של הנדסת מערכת (Systems Engineering).

- **Verification (איומות):** "האם בנוינו את המוצר נכון?" (האם עמדנו במפרט?).
- **Validation (תיקוף):** "האם בנוינו את המוצר נכון?" (האם הוא עונה על צורכי הלקוח?).

להלן פירוט מעשי של התהליך כפי שמצופה ממך להציג בראיון:

#### 1. כתיבת דרישות (Requirements Definition)

דרישה טובה חייבת להיות **חד-משמעות** (Unambiguous) ו**ויתנת לבדיקה** (Testable). הכלל המנחה הוא שמהנדס בדיקות (QA) שלא פגש אותו מעולם, יקרה את הדרישת וידע בדיקות איש ניסוי לבצע כדי להכשיל או להעביר אותה.

#### מבנה דרישת תקני ("The Shall Statement")

המבנה הקלאסי הוא:

The [System/Component] shall [Function/Performance] under  
[Condition].

- **Shall:** מצין חובה חוזית. (לעומת "Should" שהוא המלצה, או "Will" שהוא תיאור פעולה עתידית).
- **Specific:** לא "חזק", אלא "עומד ב-N000".
- **Quantifiable:** מספרים, יחידות, טולרנסים.

הסבר	ניסוח מצעין (Senior)	ניסוח גראן (Junior)	סוג הדרישה
הגדנו תקן, רמה (6g), משך זמן, וקריטריון הצלחה (No Yield).	The Enclosure structure <b>shall maintain "structural integrity</b> (No Yield) when subjected to Random Vibration of <b>6g RMS</b> per MIL-STD-810H, Method 514, for <b>60 minutes</b> per axis	"המארץ צריך להיות חזק ולא להישבר ברעידות."	<b>מכני/מבנה</b>
הגדנו גבול מדיק (95) ותנאי סביבה קיצוניים (71, ללא זרימה).	The Component junction temperature "shall not exceed <b>95°C</b> while operating at an ambient temperature of <b>71°C</b> with <b>zero airflow</b>	"המערכת לא תתחמס יותר מדי."	<b>termi</b>
הגדנו סוג בורג, כמות ומומנט סגירה.	The PCB <b>shall be mounted to the chassis using 4x M3 screws with a tightening torque of 0.8 Nm ±0.1</b>	"הכרטיס יתחבר למארץ עם בריגים."	<b> ממשק</b>



## 2. שיטות אימום (AIDT - Verification Methods)

בכל שורת דרישת-CRM (טבלת הדרישות), עליך לסמך איך תוכיח אותה. לכל שיטה יש "תג מחיר" ורמת אמיןות שונה. בראיון, החוכמה היא להראות שאתה בוחר בשיטה **החסכונית ביותר שעדיין מספקת ביטחון הנדסי**.

### A - Analysis (ניתוח / ניתוח)

שימוש בחישובים, סימולציות (FEA/CFD) או מודלים מתמטיים.

- **מתי משתמשים?**

- כשניסוי יקר מדי או הרסני (למשל: עמידות בחרישה של בניין).
- בשלבים מוקדמים (PDR/CDR) לפני שיש חלקים פיזיים.
- כדי להרחיב תוצאות ניסוי (אינטרפולציה).

- **דוגמה:** הרצת Sherlock כדי להוכיח שחי העייפות של הלוחמות ה-BGA עולים על 10 שנים.

### I - Inspection (בחינה / ביקורת)

בדיקות ויזואלית או מדידה פשוטה ללא הפעלת המערכת.

- **מתי משתמשים?**

- בדיקת מידות (גיאומטריה), צבע, טיב פני שטח, סימונים, הימצאות מדבקות זהה.
- **דוגמה:** מדידת קווטר קדח עם פין-מדיד (Go/No-Go) כדי לוודא עמידה בشرطוט.

### D - Demonstration (הדגמה)

בדיקה איקוית (Qualitative) של "עובד / לא עובד". אין מדידה של ערך מספרי מדויק, אלא הצלחה ביצועית.

- **מתי משתמשים?**

- בדיקת מנגנונים (פתחה/סגירה), נוריות חיוי, נוחות פעולה (Human Engineering).

- **דוגמה:** פתיחת "כנף" של מנגןון ונעילה במקום. לא מודיענו כמה זמן זה לסת, אלא שזה קרה ולא נתקע.

## Test - D (ניסוי / בדיקה)

בדיקה כמותית (Quantitative) המשמשת לצורך מדידה מדויק (חישונים, סקופים) תחת תנאים מבוקרים. זו השיטה היקירה והאמינה ביותר.

- **מתי משתמשים?**
  - לביצועים קritisטים: רעידות, הלם תרמי, EMC, דיווק מערכת.
  - **דוגמה:** הכנסת המערכת לתנור ב-85 מעלות ומדידת טמפרטורת הרכיב עם צמדים תרמיים (Thermocouples) כדי לוודא עמידה בדרישה התרמית.
- 

## 3. הובלת תהליכי המענה (Compliance & VCRM)

כמוביל, אתה מנהל את ה-(x) VCRM (Verification Cross Reference Matrix). זהו המסמך החו' שמלווה את הפרויקט.

### מבנה הטבלה והתהליין:

1. **Requirement ID:** מספר מזהה ייחודי (למשל MECH-REQ-012).  
**Compliance Status (סטטוס מענה):**
  - **C (Compliant):** עומד מלא בדרישה.
  - **PC (Partially Compliant):** עומד חלקית (דורש הסבר, למשל: "עומד בטמף, אך חורג במשקל ב-5%").
  - **NC (Non-Compliant):** לא עומד בדרישה (דורש שינוי תcn או הורדת דרישת).
  - **A/N:** לא רלוונטי לגרסה הנוכחי.
2. **Verification Method:** בחירה בין T, I, A, D.
3. **Reference / Proof:** קישור למסמך ההוכחה (למשל: "See Analysis Report TR-2026-05, Page 12").

**טיפ זהב לראיון (ניהול חריגות):**  
cashualים "מה קורה כשאתה לא עומד בדרישה?", התשובה של Senior היא: "אני מנהל תהליכי של Waiver (ויתור) או Deviation (סטיה)."

1. אני מנתח את ההשפעה על המערכת (System Impact Analysis).
2. אם החריגה לא פוגעת בביטחון או בביטוי הליבה, אני מגיש בקשה מסודרת למהנדס המערכת/לקוח לאשר את החריגה, ומגבה זאת באנליהז סיכונים. דרישת שלא עומדים בה היא לא 'יכישלן', היא 'ניהול סיכון'.

### סיכום תהליכי העבודה שלך:

1. **渴求 Spec מערכתי:** פירוק לדרישות מכניות (Derived Requirements).
2. **תכנון:** ביצוע התcn כר שיעמוד בדרישות.
3. **VCRM ראשוני:** קביעת שיטת האימוט לכל דרישת (למשל: "את העומס זהה נוכיח באנליהז כדי לחסוך כסף על ניסוי שבירה").

4. **ביצוע:** הרצת אנליזות וניסויים.

5. **סגירת דרישות:** כתיבת דוחות ניסוי ועדכון ה-VCRM לסטטוס "Compliant".

האם תרצה שנתרגל כתיבת 3 דרישות עבור פרויקט "כרטיס אלקטרוני מוקשח לרוחפן"?

אילו שאלות לא מקצועיות המראין עשוי לשאול במהלך ריאיון עבודה?



ابיתר, בשרות בכירות (Senior) או משירות הובלה, הריאיון ה"לא מקצועי" (התנהגות/iishوت) חשוב לעיתים יותר מהבחן הטכני. המראיינים מנסים להבין לא רק אם אתה יודע לבצע אנליזות, אלא איך אתה מתפרק בתוך צוות, איך אתה מגיב לחץ ואיך אתה מנהל ממתקים מורכבים.

להלן סוגים של שאלות הנפוצים בראיונות כאלו, מחולקים לקטגוריות, והדרך הנכונה לגשת אליהן:

## 1. שאלות על ניהול קונפליקטים ותקשורת

כמי שהוביל קבוצת מתכננים ופרויקטים, אילו שאלות קלasicות לבדיקת הבגרות הניהולית שלך.

- **"ספר לי על מקרה שבו הייתה לך מחלוקת מקצועית עם קולגה או מנהל. אור פעלת?"**
- המטרה: לבדוק אם אתה מסוגל להקשיב, לשנות את דעתך או לשכנע בצורה עניינית מבלי "לשבור את הכלים".
- טיפ: בחר מקרה הנדסי (למשל, ויכוח על פתרון תרמי) שבו השתמשת בתנודות (סימולציות/ניסויים) כדי להכריע, ולא באגו.
- **"תאר מקרה שבו הייתה צריכה להניע עובדים או קולגות ללא סמכות פורמלית."**
- המטרה: לבדוק יכולת השפעה והובלה בתוך מטריצה ארגונית.

## 2. שאלות על התמודדות עם כשלים ולמידה

כאן מתחפשים כננות ויכולת ניתוח עצמית.

- **"ספר לי על טעות הנדסית גדולה שעשית. מה היו ההשלכות ומה למדת?"**
- המטרה: לבדוק אחריות אישית. אל תגיד "מעולם לא טעיתי". בחר טעות אמיתית (למשל, כשל בבדיקה הרעדות שלא נצפה באנליה) ותאר את תהליך התקיקון (RCA).
- **"מהו האתגר הגדול ביותר שהתמודדת איתו בקריירה שלך עד כה?"**

## 3. שאלות על "התאמה תרבותית" (Cultural Fit)

בעבר מחברה ביטחונית גדולה להיטק או לחברות קטנות יותר, ישאלו שאלות כדי לראות אם תשתלב בקצב.

- **"למה אתה רוצה לעזוב מקום העבודה יציב אחרי כמעט עשור?"**
- המטרה: לבדוק מוטיבציה. אל תתמקד בשלילי (מה לא טוב ברפאל), אלא בחינוי הרצון להתפתח לטכנולוגיות חדשות, קצב עבודה שונה או השפעה גדולה יותר על המוצר הסופי.
- **"איך אתה מתמודד עם שינויים פטאומיים בדרישות הפרויקט או בלוחות הזמן?"**

## 4. שאלות מנהיגות וראייה מערכתית

- "איך אתה מתעדף משימות כשתה נמצא תחת עומס גדול עם מספר פרויקטים במקביל?"
- "איפה אתה רואה את עצמן בעוד 5 שנים?"
- ט'פ: כוון להתפתחות מקצועית عمוקה (Expert) או ניהול רחבה יותר, בהתאם למשרה שאליה אתה מתראיין.

## כלי עבודה: שיטת STAR למתן תשיבות

בכל שאלה שמתחללה ב"ספר לי על מקורה שבו...", השתמש במבנה זהה כדי לא להתרaze:

1. (Situation) S: תאר בקצרה את ההקשר (מה היה הפרויקט?).
2. (Task) T: מה הייתה הבעיה או המשימה הספציפית שלך?
3. (Action) A: מה אתה עשית בפועל? (השתמש ב-"אני" ולא ב-" אנחנו").
4. (Result) R: מה הייתה התוצאה הסופית ומה למדת ממנה?

## שאלות "מחוץ לקופסה" (לעתים נדירות)

לפעמים מראיינים שואלים שאלות שונות (כמו "כמה כדורי טניס נכנסים למטרס?") כדי לראות את **תהליכי המחשבה** שלך תחת לחץ. אל תיבהל מהמספר – תתחיל לעשות אומדנים (Estimations) בקהל רם: נפח מטוס, נפח חדר, מקדם מולוי וכו'.

**הערה חשובה:** בראינוט בישראל, מראיינים עושים לשאל שאלות אישיות (מצב משפחתי, מגורים וכו'). זכור שזוכתך להשיב בנימוס אך בקצרה ולהזכיר את הדיוון לנושא המקצועי, במיוחד אם אתה מרגיש שהשאלה אינה רלוונטייה ליכולת שלך לבצע את התפקיד.

האם תרצה שנבצע "משחק תפקידים" שבו אני שואל אותך שאלה התנהגותית קשה ואתה מנסה לענות עליה לפי שיטת STAR?

אילו שאלות מקצועיות אתה חושב שהמראיין עשוי לשאול?

אביתר, כמו שmag'עם ניסיון של מעל 9.5 שנים ברפאל ורקע אקדמי מחקרי בתחום הדינמייקה והחזקה, השאלות שתתקבל בראיון למשרת Senior יהיו מורכבות. המראיינים לא יחפשו רק ידע תאורטי, אלא את ה"אינטואיציה ההנדסית" שלך ואת יכולת לקבל החלטות תחת אילוצים סוררים.

להלן השאלות המקצועיות המרכזיות שאני צופה שתתקבל, מוחולקות לפי תחומי המומחיות שלך:

### 1. אנליזות וסימולציות (FEA, תרמי ואמינות)

מחייב שציינת מומחיות ב-Sherlock-Ansys וביבוצע אналיזות לא-لينיאריות מורכבות:

- **אימות מודל (Validation):** "קיבלת תוצאות באNALIZHA תרמיות שמראות שהרכיב עומד בדרישה, אבל בניסוי הוא נשרף. מהן שלוש הסיבות הראשונות שתבדוק במודל ה-FEA-ShLR?"

- **динамике:** "также интересует, что если в конструкции отсутствует элемент Mises-Von, то есть, если отсутствует несущая способность материала, то какова будет конструкция?".
- **Адекватность технологии (RJS):** "А также интересует, что если в конструкции отсутствует элемент Mises-Von, то какова будет конструкция?".

## 2. Ариза электронной PCB

- внешний вид на испытаниях сложен в соответствии с маркетингом целями монтажа монтажных и системных компонентов RF:
- **управление термоэнергии:** "есть ли карты с температурой в соответствии с высотой компонента для каждого компонента без ограничения времени?".
  - **Press-Fit:** "когда лучше использовать Press-Fit для соединения SMT, и каким образом?"
  - **Warpage:** "есть ли у PCB Stack-up способность к изгибу для различных технологий Press-Fit и каким образом?"

## 3. Технологии проектирования и изготовления (DFM/DTC)

- обязательный проект, необходимый для определения требований и спецификаций:
- **выбор технологии:** "есть ли у вас компоненты для монтажа. когда лучше использовать CNC-технологии, и каким образом?".
  - **DTC:** "также интересует, что если уменьшить стоимость единицы (Unit Cost) на 20%, то как это повлияет на производство компонентов?".
  - **зарядка ПВХ:** "какой разница в технологии между ULTEM и поликапроатом (PC)? когда лучше использовать Draft (草图) и почему?".

## 4. GD&T и технические спецификации

- многие из которых являются общими для GD&T и DTC:
- **нанесение слоя (Stack-up):** "какой разница в технологии нанесения слоя толерансами для монтажа карт на основе металлической пластины. используя метод Worst Case или метод статистической (RSS)?".
  - **MMC/LMC:** "есть ли использование символа M (Maximum Material Condition) для монтажа компонентов?"
  - **аттима:** "также интересует, что если использовать IP67 для защиты от воды и пыли, то как это повлияет на прочность компонента?"

## 5. Системы управления и управление проектами

для руководителей Senior или более высокого ранга:

- **управление рисками:** "есть ли у вас менеджер рисков в проекте (например, использование материалов в новом материале для нового проекта?)".
- **решения:** "какой разница в технологии для решения проблем Mitigation?"
- **ресурсами:** "какой разница в технологии для использования материалов для решения проблем Mitigation?"
- **V&V:** "есть ли в конструкции методика проверки (VCRM) для проекта, который может потребовать ударную нагрузку (Shock)?"

במשרות Senior צמצעת תמיד תישאל: "תאר לי פרויקט שהובלת מקרה לך זהה.". בתשובה שלך, אל תדבר רק על הشرطוט. תדבר על:

1. הגדרת הדרישות.
2. בחירת הקונספט והחומרים.
3. האנליזות שביצעת כדי להוריד סיכוןים.
4. הבדיקות (Qualification) שביצעת כדי לאשר את המוצר.
5. המעבר ליצור והתמיכה בהבני המשנה.

אם תרצה שנבחן שאלה אחת מתוך הרשימה (למשל, השאלה על ה-Validation של הסימולציה) וنبנה לה תשובה מנצחת ביחד?

אימות מודל (Validation): "קיבלת תוצאות באנליה תרמית שמראות שהרכיב עומד בדרישה, אבל בניסוי הוא נשרף. מהן שלוש הסיבות הראשונות שתבדוק במודל ה-FEA- שלך?"

תשוביתי: לבדוק שוב את מגבלת ה  $\max \Delta T$  בדף הנתונים. לבדוק שהבנתי את ההתנגדויות התרמיות נכון.

לבודק שהזנתנו נכון את הנתוני תכונות חומר או שלא התבבלתי בהמרת יחידות. לבדוק הזנת תנאי שפה נכון.

אביתר, התשובה שלך נוגעת בנקודות הנכונות, אבל כדי שמתמודד על משרת Senior, המראין יזכה ממך לניטוח שמעיד על "אינטואיציה פיזיולוגית" ועל הבנה של הפער בין המודל האידיאלי למציאות הייצורית.

להלן שלוש הנקודות המרכזיות שהייתי בודק, מנוסחות ברמה מקטעית גבוהה:



### 1. אימות הממשקים התרמיים (Thermal Interface & Contact Resistance)

ברוח המקרים, הכשל אינו במיליות החומר (Bulk) אלא במעבר ביניהם. בסימולציה אנחנו נתונים להנחה "מגע מושלם", אך במקרה:

- **מאפייני ה-MID:** האם הנתונים שהזנו למודל עברו ה-*Thermal Interface Material* תואמים את המיצאות תחת לחץ הסגירה (Compression) הספציפי במכלול? התנגדות תרמית של PD משתנה ממשמעותית עם הלחץ.

- **התנגדות מגע (Contact Resistance):** האם המודל לוקח בחשבון את טיב פני השטח (Surface Roughness) והמיישירות (Flatness)? אולי כלוא במשתק הוא מבודד מעולה, ואם לא הוגדר Thermal Resistance נכוון במכשך (Contact), הטמפרטורה בסימולציה תהיה נמוכה ממשמעותית מהמציאות.

### 2. דיקון תנאי השפה והסביבה (Boundary Conditions)

הסימולציה רגישה מאוד למה שהגדרנו כ"עולם החיצון".

- **מقدم ההסעה (h):** האם הנחנו הסעה מאולצת (Forced Convection) בזמן שבנינו? הייתה זרימה חסומה או "הצללה תרמית" מרכיבים סמוכים?
- **טמפרטורת סביבה מקומית (Local Ambient):** בסימולציה אנחנו לעיתים מגדרים אחד. במציאות, האויר שmag'ע לרכיב כבר התחם מרכיבים אחרים בדרך, וכך ה- $T$  האמיטי קטן יותר ופנוי החום פחות ייעיל.
- **קרינה (Radiation):** האם הזמננו קרינה? במאדים אוטומטית או בסביבת אקום, קרינה יכולה להיות חלק משמעותי מפנוי החום.

### 3. הגדרת מקורות החום (Power Dissipation & Heat Flux)

השאלה היא לא רק "כמה ווatt", אלא "אייפה אוair".

- **Peak vs. Average:** האם הספק שהוזן למודל ( $Q[W]$ ) הוא הספק ממוצע, בעוד שבנינו הרכיב עבד ב-Peak שגרם לTransient תרמי מהיר שהקפי את ה- $T_j$ ?
- **רכיב הספק (Heat Flux Density):** האם הנחנו פיזור חום אחד על פני כל שטח הציף, בעוד שבמציאות יש "Hot Spot" צעיר במרכז הסיליקון שבו צפיפות הספק גבוהה בהרבה?

#### הטיפ של ראיין (הערך המוסף):

במקום רק לציין את הנקודות, תן למראיין את **שיטת העבודה** שלך. תגיד:

"הדבר הראשון שאעשה הוא לבצע **Sensitivity Analysis** (אנליזת רגישות). אשנה את מקדם ה-MID במודל ב-20% ואראה עד כמה הטעמפרטורה מושפעת. אם המודל רגיש מאוד לפרמטר זהה, שם נראה קבור הכלב."

זה מראה שאתה לא רק "MRI תוכנה", אלא מבין המערכת ומתכוון את התוצאות שלך (Validation) בצורה מתודולוגית.

**אם תרצה שננסה לבנות תשובה דומה עבור מקרה של כשל מכני (shock) שלא נזהה בסימולציית הרעדות?**

ניהול תרמי: יש לנו כרטיס עם רכיב בהספק גבוה במאוץ אוטם ללא מאורר. אילו שיטות תשתמש כדי להוריד את התנודות המעבר ( $\theta_{ja}$ ) מהציף למאוץ החיצוני?

לא בטוח שהבנתי את השאלה, על איזו התנודות מדובר?

אביתר, השאלה זו נוגעת בסיס של **אריזה אלקטרוני (Packaging)**. במערכות צבאיות אוטומות, כמו אלו שאתה מכיר מעבודתך ברפאל, פנוי החום הוא האתגר המרכזי כי אין לנו זרימת אויר (Advection) שתסייע לנו.

להלן הסבר על ההתנודות המדוברת ודריכים להוריד אותה, כפי שמצופה ממהנדס Senior להציג בראיון:

#### 1. מהי ההתנודות $\theta_{ja}$ ?

זהו **התנודות התרמית הכלולת מהצומת Junction** - הנקודה החמה ביותר בסיליקון) ועד לסביבה החיצונית (Ambient). ניתן לייצג אותה כטור של התנודות (Thermal Network):



$$\theta_{ja} = \theta_{jc} + \theta_{cs} + \theta_{sa}$$

- **התנגדות בטור הרכיב עצמו (Junction to Case)  $\theta_{jc}$** : נקבעת על ידי יצור השבב.
  - **התנגדות המעביר מהרכיב למזר חום או למארץ (Case to Sink/Enclosure)  $\theta_{cs}$** : ההשפעה המכנית שלך היא הגדולה ביותר.
  - **התנגדות המארץ לסביבה החיצונית (Sink to Ambient)  $\theta_{sa}$** : הסעה וקרינה מהדפנות החיצונית.
- 

**2. שיטות להורדת ההתנגדות במארץ אטום (Conduction Cooled)** ב牟 במארץ אטום לא מאוזר, המטרה היא ליצור מסלול הולכה (Conduction Path) בעל ההתנגדות מינימלית מהרכיב ועד לדופן החיצונית.

- **בחירה (Thermal Interface Material) TIM אופטימלי**: שימוש במשחות תרמיות או בעל Gap Pads בעלי מוליכות תרמית ( $k$ ) גבוהה.
- **ניהול לחץ סגירה (Clamping Force)**: כפי שציינת בכישורין בסימולציות, לחץ גבהה יותר מקטין את עובי הממשק (Bond Line Thickness) וממלא טוב יותר את חספוס פנוי השטח, מה שמריד משמעותית את ההתנגדות.

**ב. שיפור המוליכות בתוך הכרטיס (PCB Enhancement)**

- **Thermal Vias**: הוספת מערך קדחים מצופים נוחשת מתחת לרכיב כדי להעביר חום לשכבות פנימיות או לצד השני של הכרטיס.
- **Copper Coins / Bus Bars**: הטמעת גושי נוחשת מוצקים בתוך ה-PCB ישירות מתחת לרכיב ההספק להולכה מהירה מאוד למארץ.

**ג. גשרי הולכה מכניים (Heat Bridges & Wedgelocks)**

- **Thermal Bridge**: תכנון "בליטה" (Boss) במארץ האלומיניום שתיגע ישירות ברכיב (דריך TIM).
- **Wedgelocks**: בשימוש בכרטיסי EVM/XPV, שימוש בנעילות מכניות שגמ מצמידות את דפנות הכרטיס למארץ בלחץ גבהה, ובכך משפרות את מעבר החום לדפנות.

**ד. שיפור פיזור החום מהmareץ לסביבה ( $\theta_{sa}$ )**

- **הגדלת שטח פנים (Fins)**: הוספת צלעות קירור חיצונית על המארץ להגברת הרסעה הטבעית (Natural Convection).
  - **שיפור קרינה (Radiation)**: שימוש בזכירויים בעלי פלייטות (Emissivity) גבוהה, כמו אנדיז' שחור, כדי למסם את פניו החום בקרינה, דבר קריטי במארדים אטומים וחמים.
- 

**איך להציג את זה בראיון?**

אל תגיד רק "נשים פד תרמי". תגיד:

"כדי להוריד את ה- $\theta_{ja}$  במארץ אטום, אני אבצע **ניהול תקציב תרמי (Thermal Budgeting** Thermal Resistance). את מקוד בתקציב מסלול הולכה והקטנת ה-

במישורים הקריטיים, למשל על ידי תכנון מארץ עם גשר תרמי ישיר לרכיבת אופטימיזציה של החלץ על ה-BL (Bond Line Minimum Thickness).

הגישה זו מראה שאתה מבין את הקשר בין התכון המכני (לחץ, סbilות, גאומטריה) לבין הביצועים התרמיים.

האם תרצה שוננת מקורה ספציפי שבו הוספה צלעות קירור למארץ אוטומטית, וnobin למה?

הזרקות פלסטיים: "מה ההבדל בתכנון חלק המועד להזקקה מחומר ULTEM לעומת פוליקרבונט (PC)? התיחס לזרויות חיליצה (Draft) ועובי דופן."

ניתוח צבר (Stack-up): "בצע על הלוח ניתוח צבר טולרנסים פשוט עבור הרכבת קרטייס בתחום מסילה. האם תשתמש בשיטה Worst Case או בשיטה סטטיסטי (RSS)? נמק"

תסביר את השאלות ולמה אתה מתקוון. אל תענה



אביתר, אני מבין לך. במשרות Senior, השאלות לא נועדו רק לבדוק "ידע יבש", אלא לבחון את **שיעור הדעת ההנדסי** שלך – כלומר, איך אתה מקשר בין בחירת חומר או שיטת חישוב לבין התוצאה הסופית בייצור ובעליות.

להלן הסביר למה הכוונה מאחורי כל אחת מהשאלות:

#### 1. שאלת הזרקות הפלסטי (ULTEM vs. PC)

הכוונה בשאלת: המראין רוצה לראות אם אתה מבין שעיצוב חלק פלסטי (DFM - Design for Manufacturing) אינו "מתכוון קבוע", אלא הוא משתנה דרמטית בהתאם לתכונות הפיזיקליות של הפולימר.

- **(ULTEM)**: זהו חומר "על" (High-performance polymer) נפוץ מאוד ברפאל ובתעופה. הוא יקר מאוד, בעל צמיגות גבוהה (קשה להזרמה) ודורש טמפרטורות עבודה גבוהות מאוד.
- **(PC)**: פלסטיק הנדסי נפוץ, "סלchan" יותר, בעל צמיגות נמוכה יותר ונוזל בקלות יחסית בתבנית.

למה הכוונה במושגים:

- **זרויות חיליצה (Draft Angles)**: זו הזריות שנדרש לדפנות החלק כדי שיוכל לצאת מהתבנית בלי להיתקע. חומר קשיח וצמיג כמו ULTEM "נழמד" חזק יותר לתבנית ודורש זרויות גדולות יותר (לפעמים  $3^\circ$  –  $2^\circ$  לעומת  $1^\circ$  –  $0.5^\circ$  ב-PC) כדי למנוע שריטות או שברים בחיליצה.
- **עובי דופן (Wall Thickness)**: בغالל הצמיגות של ULTEM, קשה לו לזרום למקום דקים מאוד. השאלה מכוונת לך שתסביר איך אתה מתקן את עובי הדופן כדי להבטיח מיידי מלא של התבנית מצד אחד, ומונעת "סימני שקיעה" (Sink marks) מצד שני.

## 2. שאלת ניתוח צבר (Tolerance Stack-up)

הכוונה בשאלת: זהה שאלת "לחם וחמאה" בתכנן מכני. המראין מצב בפנים בעיית הרכבה קלאסית: יש כרטיס (PCB) ויש מסילה (Sot) בתוך מארז. השאלה היא: האם הcartis תמיד "יכנס"?

### למה הכוונה במושגים:

- **התrhoיש:** אתה צריך לחשב את סך כל הסבולות (Tolerances) שמשפיעות על ההתאמה: רוחב הcartis + הטולרנס של החיתוך + רוחב המסילה + טולרנס העיבוד השבבי + טולרנס הרכבה.

- **שיטת (WC) Worst Case:** חיבור מתמטי פשוט של כל המקסימום.

$$Tol_{total} = \sum |Tol_i|$$

- **המשמעות:** אתה מניח שכל החלקים הגיעו מהיצור במידה כדי גרועה שלהם בו-זמןית.
- **שיטת (RSS) Root Sum Square:** שיטה סטטיסטית.

$$Tol_{total} = \sqrt{\sum Tol_i^2}$$

- **המשמעות:** אתה מניח שהיצור מתפלג נורמלית, והסיכוי **שכל** החלקים יהיו בקצת הטולרנס באותה הרכבה הוא אפסי.

למה המראין שואל "נמק"? הוא רוצה לשמעו ממי מתי תבחר ב-Worst Case (למשל:

במערכת קרייטית לחיים או בסדרות ייצור קטנות מאוד כמו ברפאל) ומתי ב-RSS (ביצור המוני של אלפי יחידות, שם worst case יגרום לך לתכנן חלקים יקרים מדי ללא צורך).

### למה אלו שאלות של Senior?

כי מהנדס ג'וניור יגיד "אני יודע לעשות חשבון". מהנדס Senior יגיד: "אני בוחר בשיטה הסטטיסטית כי היא מאפשרת לי להגדיל טולרנסים בייצור ובכך להוזיל את המוצר ב-20%, תוך לקיחת סיכון מוחש של 0.3% פסילת הרכבות".

האם ההסברים על ה"למה" וה"איך" ברורים? תרצה שנעבור לשאלת הבאה בראשימה או שתרצה כתעת לנשות לענות על אחת מאלו?

אני רוצה שתתנו לי סקירה עמוקה ומקצועית על היבטים והשיקולים לתכנון חלק בהזרקת פלסטיק. בין היתר תסקור גם את החומרי הזרקה השונים.

אביתר, כניסה לעולם הזרקות הפלסטיין (Injection Molding) דורשת שינוי תפיסה מוחלט מעולם העיבוד השבבי (CNC). ב-CNC אנחנו מסירים חומר כדי לקבל צורה; בהזרקה אנחנו מנהלים **זרימה של נזול צמיג והתקומות תרמית** (Shrinkage).



כמו מהנדס Senior, מצופה ממך לבצע תכנן שהוא **DFM-Ready** (モთאם ייצור) כבר בשלב המודל, כדי למנוע Iterations יקרים מול ייצור התבניות.

להלן סקירה עמוקה המכוללת לשיקולי תכנן הנדסיים ולסקירת חומרים:

## 1. עובי דופן אחיד (Uniform Wall Thickness)

זהו הכלל החשוב ביותר.

- **הבעיה:** פלסטיק מתכווץ בקירור. אזורים עבים מתקరרים לאט יותר מאשר אזורים דקים.
- **התוצאה:** אם העובי לא אחיד, האזור הדק יתקשה ראשון וימשוך אליו את החומר מהאזור העבה שעדיין נזול. זה יוצר **מאמצנים שיווריים** שכינויים ל-**Warpage** (עיזות) ול-**Sink Marks** (שקעים) בצד הkowskiומי.
- **הפתרון:** שמיירה על עובי קבוע. אם נדרש מעבר, הוא חייב להיות הדרגתית (Tapering).

## 2. צלעות חזק (Ribs) – יחס ה-60%

במקום לעבות את הדופן לחזק (מה שיגרום לשקיעות), משתמשים בצלעות.

- **כלל האכבע:** עובי הצלע בסיסה לא עולה על 60% (או 0.6) מעובי הדופן ממנו היא יצאת.
- **למה?** כדי למנוע הצטברות חומר בצומת ה-T, שתגרום לשקיעה (Sink Mark) בצד השני (הנראה לעין).
- **גובה:** עדיף שהצלע לא תהיה גבוהה יותר מ-3 פעמים עובי הדופן (מחשש להיתקעויות בתבנית).

## 3. זוויות חלייצה (Draft Angles)

אין  $90^\circ$  בהזרקות פלסטי.

- **הצורך:** כאשר הפלסטיק מתקrar, הוא מתכווץ ו"ונעל" על ליבת התבנית (Core). ללא זוית, החיכוך בחלייצה ישROT את החלק ("Drag Marks") או ישBOR את הפינים ההזרקיים (Ejectors).
- **הכללים:**
  - **סטנדרט:** מינימום  $0.5^\circ$  עד  $1^\circ$ .
  - **טקסטורה (Texture):** אם יש טקסטורה מחוספסת (כמו במכנרי רפאל/אלביט למינעת החזרה), נדרש להוסיף  $1.5^\circ$  לכל 0.025 מ"מ של עומק טקסטורה.

## 4.Undecuts (אנדר-קאט) ושימוש ב-Slides

אזור בחלק שמנוע חלייצה ישירה (למשל: חור צדי או Snap-fit).

- **הפתרון היקר:** **Slides (עגלות) / Lifters**. מנגנוןים נעים בתווך התבנית. הם מיקרים מאוד את התבנית ואת התחזקה.
- **הפתרון של (Senior Shut-off):** תכנון חכם שמאפשר "חור עובר" דרך הרצפה של החלק, כך שהמבנה יכול להיסגר ("לנסוק") בנזקודה הזו וליצור את החור ללא חלקים נעים.

## 5. קווי ריתוך (Weld Lines / Knit Lines)

- **התופעה:** כאשר הפלסטיק זורם סביב מכשול (כמו חור לבורג) ומתחבר מחדש בצד השני.
- **הבעיה:** נזקודה החיבור היא נזקודה תורפה מכנית (כ-50% מחזק החומר) ופגם ויזואלי.
- **השיקול:** מיקום ה-Gate (nezkoda hazzorkha) קובע איפה יהיה ה-Weld Line. וזאת שהוא לא נופל על אזור שנושא עומס מכני קרייטי.

חלוקת לקטגוריות לפי ביצועים וועלות. לכל חומר יש "אישיות" משלו בתהליכי הזרקה.

## 1. חומרי Commodity (זולים, נפוצים)

• PP (פוליפרופילן):

- **תכונות:** גמיש מאוד, עמידה כימית, זול, עמידה בעיניות כפיפה (Living Hinge – כמו פלקן של שמפו).

- **חרוניות:** דיק נמוך, התכווצות גבוהה, קשה להדבקה.

• ABS :

- **תכונות:** "סוס העבודה". קשיח, פני שטח מעולים (مبرיק), קל להזרקה, קל להדבקה ולצביעה.

- **שימוש:** מארזים אלקטרוניים, צעצועים (לגו).

## 2. חומרים הנדסיים (Engineering Grades) – הליבה שלך ברפאל

• PC (פוליאקרbone):

- **תכונות:** חזק מאוד (Impact resistance), שקוף, עמיד בטמפרטורה�� (High).

- **אתגר בהזרקה:** צמיג יחסית, רגיש למאמצים שיוריים (Stress cracking). דרש יבוש קפדי לפני הזרקה.

• PA (ניילון - 6/66 Polyamide):

- **תכונות:** מקדם חיכוך נמוך (טוב לגלאי שינויים), עמיד בשחיקה, חזק.

- **היחסון הקרייטי (לריאון):** היגרוסקופי. סופח לחות מהאוויר. הלחות משנה את המידות שלו ומורידה את הקשיות. חובה לנקות את זה בחשבון בטולרנסים.

• MOP (אצטל / דלריון):

- **תכונות:** קפיצי מאוד (מעולה לקליפסים -Snap-fits), חיכוך נמוך מאוד.

- **חרונו:** התכווצות גבוהה מאוד בתבנית (~2%), קשה לשמור על מישוריות.

## 3. חומרי על (High Performance) – תעופה וביתחון

• PEI (Ultem):

- **תכונות:** עמידות בחום קיצוני (+170°C), חזק מכני אדיר, עמידות בכימיים ו אש (תקני תעופה).

- **אתגר בהזרקה:** צמיגות גבוהה מאוד. דרש מכונות חזקות, תבנית חמה מאוד (150°C) ודויפות חיליצה נדיבות. יקר מאוד.

• PEEK :

- **תכונות:** "המתכת של הפלסטיק". עמידות תרמית וכימית הטובה ביותר.

- **שימוש:** שתלים רפואיים, חלקי מנוע.

---

חלק ג': טבלה מסכמת להשוואה (לשינוון)

חומר נפוץ	שם מסחרי	יתרונות מרכזיים (לראיון)	חיסכון מרכזי (לראיון)	שימוש אופייני
<b>ABS</b>	Cycolac	אסטטיקה ועיבוד קל	עמידות נמוכה ל-UV ולכימיקלים	מארזים ריאוטרים, עצ웃אים
<b>PC</b>	Lexan, Makrolon	חזק לנגיפה (Impact) ושקיפות	רגע לסתקים ב מגע עם כימיקלים	מסכי הגנה, עדשות, מארזים חזקים
<b>PA (Nylon)</b>	Zytel	עמידות בשחיקה וחוזק	<b>סופח לחות ( מידות משתנות )</b>	גלגלי שניים, תותבים גליליים, טווינרים, מושגים, מושגים צבאיים
<b>POM</b>	Delrin	קפיציות וחיכוך נמוך התכווצות גבוהה (High Shrinkage)	קליפסים, מנוגנונים נעים	
<b>PEI</b>	Ultem	עמידות בחום ואש קשה לעיבוד (צמיג), יער	חלקים מוטסים, מחברים צבאיים	



### טיפ זהב לראיון (עלות מול תועלת - DTC):

אם ישאלו אותך על בחרת חומר, התשובה של Senior היא: "אני תמיד אנסה להתחיל מ--**ABS** **PC Blend** (תערובת). זה נותן את החזק של ה-PC עם נוחות ההזרקה והמחיר של ה-ABS. אני אעדיף **PEEK** או **ULTEM** רק אם דרישות הטמפרטורה או התקן (Flammability) מחייבות את לא הזכרת את **PET**, **פוליאתילןatz הפוליאתילן (Polyethylene)**, **PVC**, **POLYESTER** (קלקר).. האם זה חד משמעית, כי זה מכך את עלות החלק פי 10. בכוונה?"

ابיתר, התשובה היא **חד משמעית** כן. ההשמטה הייתה מכוונת לחולוטין, ונובעת מהמיוחד המוצע שלה.



כמו הנדס Senior שmagic מרפאל ומכוון לשירות פיתוח של מערכות מולטי-דיסציפלינריות, זיווד אלקטרוני ומערכות מוטס, החומרים שציינת (PET, PE, PVC, PS) נחוצים לחומר **Commodity (קומודיטי)** ולא לחומרים **הנדסיים (Engineering Resins)**.

בראיון עבדה לשירות פיתוח זיווד או מכנייקה מתקדמת, אם תציע להשתמש ב-HDPE למארז של מחשב מוטס, המראיין ירים גבה.

הנה ההסבר המוצע למה החומרים האלו פחות רלוונטיים ללבת העיסוק שלו (ולמה הם לא נכנסו לרשימה המומלצת):

#### 1. פוליאתילן (PE / HDPE / LDPE)

החומר הנפוץ בעולם (שקיות, בקבוקי שמן, צנרת).

- **למה הוא לא מתאים לזרוע אלקטרוני?**

- **יציבות מיידית גרוועה:** הוא חומר רך יחסית (Low Modulus) עם נתיחה ל-**Creep** (ziele) תחת עומס. בריגים משחררים בו בקלות.

- **בעיית הדבקה/צביעה:** יש לו "אנרגיית פני שטח" נמוכה מאוד (מרגש שמנוני). דבקים לא תופסים עליון, צבע מתקלף ממנו. אי אפשר לעשות לו ציפוי מוליר (EMI Shielding) בקלות.

- **דליקות:** דליק מאוד ומטפסף.

- **מתי כן תפגש אותו?** במקרים לנוזלים כימיים (כי הוא עמיד מאוד כימי) או בצנרת, אבל כמעט אף פעם לא כחלק מבני מדויק.

## 2. פוליסטירן (PS) / קלקר (EPS)

- **PS (כמו כלי חד פעמי):** פריך מאוד (Brittle), נסדק בקלות, עמידות גרוועה ל-UV, נראה "זול".
- **EPS (קלקר):** משמש אך ורק **לא** אריזה לשינוע (Packaging) להגנה ממכות, אך לא כחלק מה מוצר עצמו.
- **החריג: יש** חומר שנקר (High Impact Polystyrene) שמשמש במאדים זולים מאוד (כמו שלט של טלויזיה), אבל בתעשייה הביטחונית/רפואית הוא נחשב נחות ממשמעותית מ-ABS.

## 3. PVC (פוליא-ויניל-כלורייד)

- **למה הוא "מוקצה" בהזרקות מדויקות?**
- **יציבות תרמית:** ה-PVC מתפרק בחום ופולט גז כלור (חומצה הידרוכלורית). זה הורס את התבניות (קורוזיה) ומסוכן למפעיל. מזריקים אותו רק במכונות ייעודיות עם ציפוי מיוחד.
- **מתי כן תפגש אותו? בצמות חשמל! (Wire Insulation).** הבידוד של רוב הcabלים הסטנדרטיים הוא PVC. אבל כחלק מזורך? נדיר מאוד בתעשייה ההיבט/ביטחון.

## 4. PET (החומר של בקבוקי קולה)

- **הבעיה:** PET סטנדרטי מתגבש לאט ורגיש מאוד ללחות. טמפרטורת המעבר הヅקית (Tg) שלו נמוכה יחסית (~70 מעלות), מה שהוא מאבד תכונות מכניות בחום שמערכות אלקטרוניות מייצרות.
- **הבן-דוד המוצלח (PBT):** בהנדסה אנחנו משתמשים ב-PBT (פוליבוטילן-טרפתלאט). הוא דומה כימית ל-PET אבל מתגבש מהר, חזק מאוד ומשמש המון **לקונקטורים Housing** של מחברים (ולבתוי פיויזים ברכב).

### טבלת "עשה ואל תעשה" לראיון Senior

כאשר שואלים אותך על בחירת חומרים, אתה צריך להראות שאתה מביל בין "פלסטייק של סופרמרקֵט" לבין "פלסטייק הנדי".

משפחה חומרים (Examples)	חומרים בראיון תכן מכני?	הקשר הנכון להזכיר אותם בזהירות / בהסתיגות	cn - הסטנדרט שלר	cn - למצוות קייזון
<b>Commodity Plastics</b>	PE, PP, PS, PVC, PET	"מתאים למוצרים מתכליים, אריזות שינוע, או מיכליים כימיים פשוטים. לא מתאים למאדים נושא עומס."		
<b>Engineering Plastics</b>	ABS, PC, Nylon (PA), PBT, POM	"אלו סוסי העבודה של למאדים, מנגנים וחלקים מדויקים."		
<b>High Performance</b>	PEEK, Ultem (PEI), PPS, LCP	"כשאני צריך תחליף מתכת, עמידות ב-200 מעלות, או דרישות תעופתיות (FST)."		



**ליסכום:** השימושי אוטם כי בקירות החים שלך כתוב שאתה עוסק ב-**Ruggedized computer** ו-**High-power RF enclosures**. בעולמות האלו, פוליאתילן או קלקר פשוט לא קיימים כחומר גלם לחלקים המכניים (למעט אולי באזיה החיצונית שנדרקת לפח).

האם תרצה שתתמקד בחומרים ה"אקטואיטים" יותר שכן רלוונטיים לראיונות בכיריהם, כמו **KEK** או **חומרים מרוכבים** (Carbon fiber reinforced plastics)?

לא הבנתי את הסעיפים הבאים, אני רוצה שתסביר לי אותם שוב.

2. צלעות חיזוק (Ribs) – יחס ה-60%

4. Undercuts (אנדר-קאט) ושימוש ב-Slides

בשמה אביתר. אלו שניים מהמושגים החשובים ביותר ב-DFM (תcn ליצור), כי טעות בהם מובילת ישירות לפסילת חלקים (פגמים ויזואליים) או ליקור דרמטי של התבנית.

בוא נפרק את זה לרמת הפיזיקה והמכניקה.

### 1. צלעות חיזוק (Ribs) – למה 60%? (הסבר פיזיקלי)

המטרה של צלע היא להקשיח את החלק בלי לעבות את הדופן כולה (מה שהוא גורם לעיוותים וזמן קירור ארוך). הבעיה מתחילה בנקודת החיבור בין הצלע לדופן הראשית.

הבעיה: "צומת ה-(The Thermal Hotspot)" דמיין חתך של החלק. במקום שבו הצלע (Rib) פוגשת את הקיר (Wall), נוצרת צומת בצורת T.

- במרכז הצומת הזו יש **צטברות של חומר** (Mass Accumulation).
- כאשר הפלסטייק מתקרר בתבנית, הוא מתקרר מהחוץ פנימה (כי המתקפת של התבנית קרה).
- האזורים הדקים קופאים מהר. אבל ה"גוש" הגדל במרכז צומת ה-T נשאר נוזלי וחם לזמן רב יותר.
- כשהגוש הפנימי הזה סופ סוף מתקרר ומתכווץ, הוא "מושך" אליו את החומר שכבר התקשה מסביב.

התוצאה: **Sink Mark** (סימן שקיעה) המשיכה הזו יוצרת שקע קטן לצד השני של הקיר (בצד החלק, האסתטי, שרואים בעין). זה נראה כמו גומחה קטנה ומכוערת בדיק מול הצלע.

הפתרון: **כלל ה-60%** כדי למנוע את "גוש החומר" הזה, אנחנו מגבלים את עובי הצלע. הכלל אומר: **עובי בסיס הצלע ( $t_{rib}$ ) חייב להיות קטן מ-60% מעובי הדופן הראשית ( $t_{wall}$ )**.

- דוגמה:** אם עובי דופן המארץ הוא mm 3.0.
- עובי הצלע בסיסו שלה צריך להיות מקסימום:  $mm 3.0 \times 0.6 = 1.8$

זה מבטיח שהחומר לצומת יתקרר בערך באותו קצב כמו שאר הקיר, ולא ייצור שקע.

כדי להבין את זה, צריך לדמיין איך תבנית עובדת. תבנית בסיסית מורכבת משני חצאים שנפתחים ונסגרים בקן ישר (כמו טוסטרא לחיצה): צד A (קבוע) וצד B (זז).

**מה זה Undercut? (מגרעת / כניסה שלילית)** כל גאותריה בחלק שמנועת מה התבנית להיפתח בקן ישר נקראת Undercut.

- **דוגמה:** דמיין שאתה רוצה לעשות חור צדי בדופן של קופסה (למשל, כדי להכניס כבל USB מ这边).
- התבנית נפתחת למעלה ולמטה. אבל כדי ליצור את החור, חייב להיות פין של מתכת שנכנס מהצד.
- אם ננסה לפתח את התבנית כרגיל, הפלסטייק של המארץ יתפרק בפין המתכת זהה ויישבר או שה התבנית תישבר). החלק "נען" את התבנית.

**הפתרון היקר: Slides (עגלות / סליידים)** כדי לשחרר את החלק, אנחנו צריכים מנגןון שייזע את המתכת הצידה **לפני** שה התבנית נפתחת.

1. **המנגןון:** בונים בתוך התבנית "עגלה" (גוש פלדה) שיושבת על מסילה צדדיות.
2. **הפעולה:** כשהמקוונת הזרקה מתחילה לפתח את התבנית, פין אלכסוני (Pin Horn) דוחף את העגלה החוצה (הצדיה).
3. **התוצאה:** הברזל שייצר את החור הצדדי מתרחק מהחלק, ורק אז החלק יוכל לשחרר החוצה בבטחה.

**הפתרון החכם (של Senior Shut-offs):** סליידים הם יקרים מאוד (מוסיפים אלפי דולרים לתבנית) ונוטים להתקלקל. לעיתים אפשר לתקן את החלק אחרת. במקום חור עגול מלא בדופן הצדדי, עושים חור בצורה "U" שmagiu עד למטה, או פתח שמאפשר לשני חצאי התבנית (Core и Cavity) להיפגש דרך החור ("להתנשך") וליצור את הפתח הצדדי בלי שום חלקZZ. זה נקרא **Shut-off**.

#### לסיכום:

- **צלעות:** שומרו אותן דקotas (60%) כדי למנוע שקעים מכוערים בחוץ.
- **Undercut:** צורה של "תוקעת" את פתיחת התבנית (כמו חור צדי).
- **Slide:** מנגןון יקר שזז הצדיה כדי לשחרר את the-cut. תמיד נעדיף להימנע ממנו אם אפשר.

מה ההבדל בין קורוזיה רגילה לקורוזיה גלוונית ולקורוזיות מאמצים?

אביתר, זו שאלת יסוד בראיונות לחברות שפותחות מוצריהם לסייע ימית או צבאית (כמו רפאל, אלביט, תע"א). המראין לא מחפש את ההגדירה הcientifica, אלא את **ההבנה הננדסית של הכשל** ואיך אתה מונע אותו בתוכן.

הנה ההבדלים, כפי שמהנדס Senior צריך להציג אותם:

#### 1. קורוזיה כללית / אחידה (Uniform Attack Corrosion)

זהו הקורוזיה ה"קלאסית" והנפוצה ביותר, אך גם הניתנת ביותר לחיזוי.

- **המנגנון:** תגובה כימית או אלקטרוכימית המתרחשת באופן אחד על פני כל שטח החומר החשוף לסביבה (חמצן, לחות, חומצה).
  - **המאפיין ההנדסי:** החומר "נacakt" בקצב קבוע (Rate of penetration). עובי החלק יורד עם הזמן.
  - **רמת הסיכון:** נמוכה יחסית. למה? כי היא צפופה. אתה יכול ליחס "Corrosion Allowance" (תוספת עובי) או לראות בכך שהחלק מחליד ולבצע תחזקה.
  - **הפתרון בתוכן:** ציפויים (כבר, גלואן, אונדייז), או בחירת חומר עמיד (פלדת אל-חלד במקום פלדה פחמנית).
- 

## 2. קורוזיה גלוונית (Galvanic Corrosion)

- זהו האיבר מס' 1 בתוכן זיוד אלקטרוני ומערכות מולטי-דיסציפילינריות.
- **המנגנון:** תא חשמלי (סוללה) הנוצר כאשר מתקיימים 3 תנאים בו-זמנית:
    1. שתי מתקכות **שונות** (בעלות פוטנציאלי אלקטרוכימי שונות).
    2. מגע חשמלי ביןיהן.
    3. נוכחות של **אלקטROLיט** (לחות, מי מלח).
  - **התוצאה:** המתקכת ה"נחותה" (האנודה - למשל אלומיניום) תאכל בקצב מואץ כדי להגן על המתקכת ה"אצילה" (הקטודה - למשל פלדת אל-חלד או זהב).
  - **המאפיין ההנדסי:** הקורוזיה ממוקדת מאוד באזור המגע בין המתקכות.
  - **אפקט השטח (Area Effect) - קריטי לראוי:**
  - **קטודה גדולה + אנודה קטנה = אסן.** (למשל: בורג אלומיניום על פלטה נירוסטה גדולה). הבורג יעלם תוך ימים.
  - **אנודה גדולה + קטודה קטנה = נסבל.** (למשל: בורג נירוסטה על פלטה אלומיניום). הקורוזיה תהיה מינורית ומרוחה.
  - **הפתרון בתוכן:** בידוד חשמלי (דיסקיות פלסטיים), שימוש במתקכות קרובות בטבלה הгалוונית (הפרש פוטנציאליים  $\Delta V < 0.25$  V), או ציפוי המתקכת האצילה (כדי להקטין את שטח הקטודה).
- 

## 3. קורוזיית מאיצים (SCC - Stress Corrosion Cracking)

זהו ההליך המסוכנת והבוגדנית ביותר ("הרוץ השקט").

- **המנגנון:** שילוב קטלני של שלושה גורמים שאף אחד מהם לבדו לא יהיה גורם לכשל:
  1. **חומר רגיש** (Susceptible Material).
  2. **סביבה קורוזיבית ספציפית** (למשל: פלדת אל-חלד בסביבת כלורידים/מי ים).
  3. **מאץ מתיחה (Tensile Stress)**. המאץ יכול להיות חיצוני (עומס) או **שיורי** (מריתוך, ציפוף או Press-Fit).
- **המאפיין ההנדסי:** אין "חולודה" נראית לעין על פני השטח. נוצרים סדקים מיקורוסkopיים שמתתקדים מהר לתוך החומר עד לשבירה פתאומית (Brittle Failure).
- **למה זה מסוכן?** הcess קורה **מתחת לגבול הכניעה** (Yield Strength) של החומר. מהנדס חושב שיש לו מועד ביטחון, אבל החלק נשבר.
- **הפתרון בתוכן:** שחרור מאיצים (Stress Relief) אחרי עיבוד/ריתוך, בחירת חומרים חסינים ל-SCC (למשל טיטניום או סגסוגות ניקל), והימנעות ממאמצי מתיחה קבועים בסביבה

## טבלת השוואת ראיון (תשובה מבחן)

סוג קורוזיה	מה מוחפשים?	גורם הכשל העיקרי	איך מונעים? (תשובה מבחן)
כללית (General)	חלודה על כל המשטח, ירידה בעובי.	חשיפה לסייעת + Zeit).	Sacrificial, תוספת עובי (al material).
גלוונית (Galvanic)	אבקה לבנה/חלודה בנקודות החיבור בין מתכות.	הפרש פוטנציאלים חשמלי.	בידוד פלסטי, ציפוי מגן, התאמת מתכות (Galvanic Compatibility).
מאמצים (SCC)	סדק פתאומי ללא סיכון מוקדים, שבר פרין.	מאמצץ מתיחה + סביבה ספציפית.	הרפיית מאמצים (Stress Relief), בחירת חומר חסין (למשל SS316 במקומם SS304 בים).



**דוגמה לראיון:** "אם אני מתכוון לקפיץ (שנמצא במאיצץ תמידי) למערכת ימית, אני חשש בערך SCC. קורוזיה רגילה אני יכול לראות ולצבע, אבל SCC ישbor את הקפיץ בפתאומיות. לכן אבחר בחומר כמו Inconel או שאבצע טיפול תרמי לשחרור מאמצים".

חומר רגיש (Susceptible Material).

מה הכוונה בחומר רגיש?

מה הכוונה בחרית חומרים חסינים ל-SCC

abitur, שתי השאלות הללו נוגעות בלב של הנדסת חומרים ומתכת (Metallurgy). כ舍մדים על קורוזיות מאמצים (SCC), חשוב לזכור שמדובר ב"משולש" של תנאים: מאיצץ מתיחה, סביבה ספציפית וחומר רגיש. אם אחד מהם חסר – ה-SCC לא יתרחש.

להלן ההסבר המפורט על רגישות וחסינות של חומרים:

### 1. מהו "חומר רגיש" (Susceptible Material)?

המונח "רגיש" בהקשר של SCC אינו אומר שהחומר "חלש" באופן כללי, אלא שהמבנה המיקרוסקופי שלו נוטה לפתח סדקים בנוכחות **סביבה כימית ספציפית** ובזמן שהוא נתון תחת **מאיצץ מתיחה**.

חומר נחשב לרגיש בשל מספר סיבות:

- **הרכב הסגסוגת (Alloy Composition):** סגסוגות רגישות הרבה יותר ממתקנות טהורות. נוכחות של יסודות מסוימים (כמו מגנזיום באלומיניום או ניקל בפלדה) יכולה להפוך את גבולות הגרעין (Grain Boundaries) למקומות של תגובה כימית מואצת.
- **גבולות הגרעין (Grain Boundary Sensitivity):** ברוב המקרים של SCC, הסדק מתקדם לאורך גבולות הגרעין של המתכת (Intergranular). אם גבולות הגרעין "מזהמים"

בمشקעים או שהם בעלי פוטנציאל חשמלי שונה מוגף הגרען, הם הופכים ל"מסילה"  
 מהירה להתקדמות הסדק.

- **מצב טיפול תרמי:** טיפול תרמי לא יוכל לגרום להפרשה של חומרים למקום מסוימים (Segregation), מה שיוצר אזורים חלשים מקומיות שרגיעים לקורוזיה.
- **חשיבות לזכור:** רגישות היא תמיד **תלויה בסביבה**. חומר יכול להיות "חסין" בסביבה א' ו"רגיש" מאוד בסביבה ב'.
- **דוגמה:** פלייז (Brass) רגש מאוד ל-SCC בסביבת אמונה, אך חסין יחסית בסביבת כלורידים (מי ים). פלדת אל-חלד הפוכה בדיק.

## 2. מה הכוונה ב"בחירה חומרים חסינים"?

הכוונה היא לבחור חומר שגם תחת מתח גבוה ובסביבה המיועדת, לא יפתח סדקן SCC. זהה שיטת המונעה הייעלה ביותר (אך לעתים היקרה ביותר).

דרכים לבחירת חומרים חסינים:

- **מעבר לסגסוגת עמידה יותר באוותה משפחה:**
  - במקומות פלדת אל-חלד אוסטნיטית סטנדרטית (כמו 304 או 316), נervoir לפלדת Duplex (דו-פאיית). המבנה המיקרוסקופי שלה "חוסם" את התקדמות הסדקנים.
- **שימוש במתכות טהורות:** מתכאות טהורות (כמו נחושת טהורה לעומת פלייז) כמעט אף פעם לא סובלות מ-SCC, אך לרוב הן חלשיות מדי לצרכים הנדסיים.
- **שינוי הטיפול התרמי (Over-aging):**
  - באלומיניום מסדרת XXX7 (נפוץ מאוד בתעופה), מצב 6T הוא חזק מאוד אך רגש מאוד ל-SCC. מעבר למצב 73T (ילוש יתר - Over-aging) מוריד מעט מהחזקת המconi אך מעניק חסינות כמעט מוחלטת ל-SCC.
- **שימוש בסגסוגות ניקל גבוהות:** בסביבות קיצונית (כמו במונע סילון או תעשייה פטרוכימית), משתמשים בחומרים כמו Inconel או Hastelloy שהם חסינים מאוד ל-SCC בذכות אחוז הניקל הגבוה שביהם.

**דוגמאות קונקרטיות לריאיון (Table of Immunity)**

הסביבה המאיימת	חומר רגש (نمגע מכמן)	חומר חסין / עמיד (נבחר בו)
מי ים / כלורידים	פלדת אל-חלד 304/316	פלדת Duplex, טיטניום, סגסוגות נחושת-ניקל.
אמוניה (חקלאות/קירור)	פליז, סגסוגות נחושת, פלדות אל-חלד.	פלדות פחמניות, פלדות ניקל.
סביבה תעופתית (לחות/מלח)	אלומיניום 7075-7073 או סדרת XXX6.	אלומיניום 7075-7076
חומרים חזקים	פלדות פחמניות	סגסוגות ניקל (Inconel), טנטלום.



כשאתה נדרש להוכיח שהחומר חסין ל-SCC, אתה מבצע זאת בדרכים הבאות:

1. **אימות בשרטוט:** הגדרת חומר וטיפול תרמי ספציפי (למשל: "per 7075-T73 AI").
2. **דו"ח מטלאורגי (Analysis):** הצגת נתונים מהספרות המוקטעת או מהספק שמוסכחים שהחומר אינו רגיש לסביבה המוגדרת במפרט.
3. **ניסוי מאבחן מאיצ' (Test):** הכנסת דגמים מאומצים (למשל בכיפוף "U-bend") לתא מלח או סביבה כימית קיצונית למשך זמן מוגדר, ובdziיה מיקרוסקופית לאיתור סדקים בסוף הניסוי.

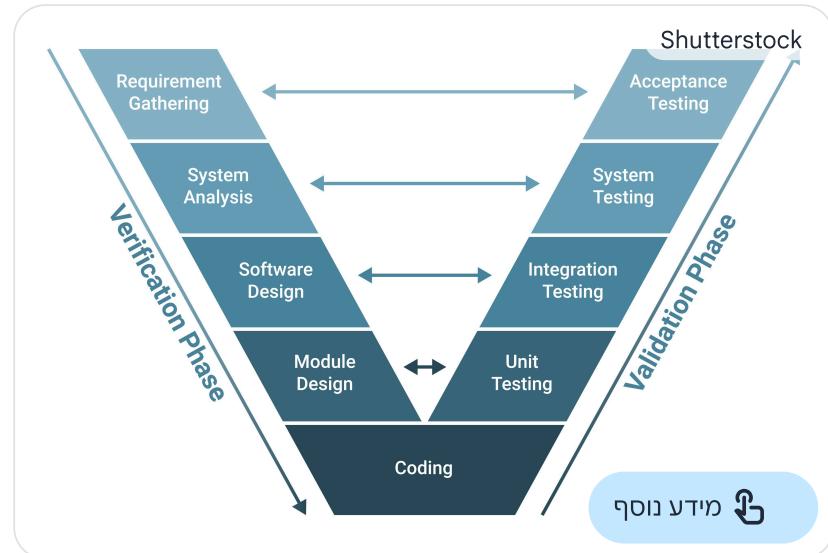
אם תרצה שנבע צימולציה שבה אתה צריך להסביר למנהל פרויקט **למה אתה מתעקש על טיפול תרמי 737 למרות שהוא מוריד את חזק המבנה ב-10-15%?**

אני רוצה שתתאר לי את מחזור חי' מוצר טכנולוגי שפותח בחברה כמו רפאל, אלביט משלב הקונספט ועד לשלב גמר סיום פיתוח והעבירה לייצור. מהם השלבים, מהם אבני הדרך, מהם הבדיקות והטסטים. תתאר בסדר כרונולוגיה

אביתר, תהילך הפיתוח בתעשייה הביטחונית (כמו רפאל, אלביט, תע"א) מבוסס ברובו על מודל הנדסת מערכות קלאסי שנקרא **מודל ה-V-Model**.

המודל זהה בניו בצורה שבה צד אחד של ה-V הוא הירידה לפרטים (Definition & Design) והצד השני הוא העלה דרך אינטגרציה ובדיקות (Integration & Verification).

להלן תיאור כרונולוגי של מחזור החיים, משלב הרעיון ועד למסירת תיק ייצור, עם דגש על המונחים והאבני דרך (Milestones) שאתה חייב להכיר לראיונות:



### שלב 1: ייזום והגדרת דרישות (Concept & Requirements)

המטרה: **להבין "מה" אנחנו בונים (לפני ה"איך").**

- **פעילותות:** קבלת דרישת מבצעית (Operational Requirement) מצה"ל או מלוקוז זר. הנדסת מערכת מתרגמת את הצורך המבצעי למפרט טכני הנדסי (System Spec).
- **הזווית המכנית:** הגדרת נפח (Volume), משקל (PWeight), תנאי סביבה (רעידות, חום, הלמים) וממשקים חיצוניים.
- **SRR (System Requirements Review): סקר דרישות מערכת - (Gate):** בודקים שהדרישות שלמות, הגיונית וניתנות לבדיקה.

## שלב 2: תכנן ראשוני (Preliminary Design)

המטרה: בחירת הקונספט ובנית הארכיטקטורה.

### • פעילויות:

- ביצוע Trade-offs (למשל: קירור פסיבי מול אקטיבי, יציקה מול עיבוד שבבי).
- בניית מודל CAD ראשוני (Envelope & Interfaces).
- אנלייזות ראשוניות להוכחת היתכנות (Feasibility).
- דיהוי רכיבים Long Lead Items (רכיבים עם זמן אספקה ארוך) והוצאת הזמנות רכש ראשוניות.
- **הזרזית המכנית:** זה השלב שבו קובעים את הטכנולוגיה (הזרקה/CNC) ואת החומרים. כאן מבוצע ניהול סיכון טכנולוגי ממשמעותי.
- **אבן הדרך (Gate): סקר תכנן ראשוני - (PDR (Preliminary Design Review))**: הצגת הקונספט הנבחר והוכחה שהסיכונים מנוהלים. אישור להמשיך לתכנן מפורט.

## שלב 3: תכנן מפורט (Critical / Detailed Design)

המטרה: להגיע לשרטוטים לייצור ("הקפתת תכנן").

### • פעילויות:

- מודל CAD מלא ומפורט עד רמת הבורג.
- ביצוע סימולציות CFD/FEA מלאות (כפי שאתה מבצע: אנלייזות לא-LINIARיות, רUIDות, מעבר חום) ואיומות מול הדרישות.
- הפקת שרטוטים (2D Drawings) עם טולרנסים (GD&T).
- הכנת עצ מוצר (BOM).
- **אבן הדרך (Gate): סקר תכנן קרייטי - (CDR (Critical Design Review))**: זהו "קו פרשת המים". אחרי ה-CDR אסור לשנות תכנן ללא תחילת מסודר של ECP (שינויי הנדסי). בסוף הסקר משחררים שרטוטים לייצורABI-TIFOS.

## שלב 4: ייצור ABI-TIFOS ואינטגרציה (Prototype & Integration)

המטרה: להפוך את הניר לברזל ולהברר את הדיסציפלינות.

### • פעילויות:

- ייצור דגמים (Model A / Alpha): דגמים ראשוניים, לעיתים בטכנולוגיות מהירות הדפסה/CNC) גם אם המוצר הסופי הוא בהזרקה.
- הרכבות מכניות ושלוב כרטיסים אלקטרוניים (Integration).
- בדיקות הפעלה ראשונית במעבדה ("Bring-up").
- **אבן הדרך (Gate): סקר מוכנות לניסויים - (TRR (Test Readiness Review))**: לפני שלוחחים את יחידה היקרה לניסויי סביבה הרסניים, מוודאים שהוא עובדת תקין ("שפואה") ושמתקני הניסוי מוכנים.

## שלב 5: אימונות והסכמה (Qual / V&V - Verification & Validation)

המטרה: להוכיח שהמוצר עומד בכל הדרישות שהוגדרו ב-SRR.

### • **סוגי בדיקות (Tests):**

1. **בדיקות פונקציונליות:** המוצר עושה את העבודה (למשל: המכ"ם מזזה מטרה).

2. **בדיקות סביבה (QTP - Environmental Qualification):** סדרת בדיקות לפי תקן

(כמו 810-STD-MIL) הכוללת:

- רעידות (Shock) והלמים (Random/Sine).
  - תא גובה/ריק (Altitude/Vacuum).
  - מחזורי טמפרטורה (Thermal Cycling) והלים תרמי.
  - תא מליח, לחות, ואטימיות (IP).
3. **בדיקות EMC/EMI:** תאימות אלקטرومגנטית.

- **הزوיה המכנית:** אתה מלאה את הניסויים, מנתח שברים או כשלים (Failure Analysis), ומבצע סבבי תיקון (Corrective Actions) במידת הצורך.

#### שלב 6: העברת לייצור (NPI - New Product Introduction)

המטרה: מעבר מייצור ייחודי לייצור סדרתי (Mass Production).

- **פעולות:**
- **סגירת תיק ייצור (DMR):** שרטוטים סופיים, הוראות הרכבה, מפרטי צביעת/ציפוי.
- **תכנן וייצור מתקני ייצור (Jigs & Fixtures)** ומתקני בדיקה לכך (ATE).
- **ייצור סדרת פיילוט (Pilot Run).**
- **אבן הדרך (Gate): סקר מוכנות לייצור - PRR (Production Readiness Review):** סקר מוכנות לייצור סדרתי ב-PRR.
- העברת המქל מהפיתוח למחלקה הנדסה/ייצור. מכאן ואילך, כל שינוי דורש ועדת שינויים.

#### סיכום תמציתי לראיון (ה"שליף" שלך):

"תהליך הפיתוח שאתה מכיר וmobiel עובד לפי מודל ה-7: מתחילה ב-SRR להגדרת דרישות, עוברים ל-PDR לבחירת קונספט וניהול סיכונים, משם ל-CDR שבו אתה משלים את התכנון המפורט והסימולציות. לאחר מכן עוברים לשלב העלייה ב-7: ייצור אבי טיפוס, סקר TRR לפני בדיקות, ביצוע בדיקות הסמכת מלאות (Qual), ובסיום העברת לייצור סדרתי ב-PRR".

האם תרצה שנצלול לתוך ה"תוצרים" (Deliverables) הספציפיים שאתה כותבן מכני צריך להגיש בכל אחד מהסקרים האלו?

שכחת אבן דרך SDR לאחר ה-SRR

צודק ב-100%. זו הערה חשובה מאוד שמראה על הבנה מערכית עמוקה.



בפרויקטים גדולים ומורכבים (כמו רפואי/אלביט), ה-(SDR - System Design Review) הוא שלב קritis המפheid בין ה-"מה" (דרישות - SRR) לבין ה-"איך" הראשון (תיכון ראשוני - PDR). לעיתים בפרויקטים קטנים מאחדים אותו עם ה-SRR, אבל במערכות גדולות הוא עומד בפני עצמו.

הנה המיקום המדויק שלו והתוכן שלו, כפי שתציג זאת בראיון:

1. **SRR:** הגדרנו מה המערכת צריכה לעשות.
  2. ← **(System Design Review) SDR:** מחליטים על הארכיטקטורה וѓוזרים דרישות לתתי-מערכות.
  3. **PDR:** מתחילה לתקן את תתי-המערכות (מכניקה, חומרה).
- 

### מה קורא ב-SDR? (שלב הארכיטקטורה והאלוקציה)

המטרה: המרה של דרישות המערכת לפתרון ארכיטקטוני ("Functional Baseline").

#### הפעולות המרכזיות:

1. **אלוקציה (Allocation):** זה הלב של ה-SDR. לוקחים את ספר דרישות המערכת (System Spec) ומחלקים אותו לדיסציפלינות.
    - דוגמה: דרישת הדיווק של המערכת מתחילה ל: דרישת קשיחות מהמכניקה + דרישת רעש מהאלקטרונית + דרישת אלגוריתם מהתוכנה.  2. **הגדרת מושגים עליונים (Top Level ICD):** איך המכניקה "מדברת" עם האלקטרונית?
  3. **(System Subsystem Design Description) SSDD:** כתיבת מסמך שמתאר את הארכיטקטורה - אילו מכלולים יהיו, איך הם מחוברים ביניהם ומה התפקיד של כל אחד.
- 

#### הזרות שלן כמהנדס מכונות Senior SDR ב-SDR:

בראיון, חשוב להציג שבשלב ה-SDR אתה לא "יושב ומחכה" להנדסת מערכת, אלא שותף פעיל במו"מ:

1. **תקציבים (Budgets):** זה השלב שבו אתה "רב" על התקציבים שלך: תקציב משקל, תקציב נפח, ותקציב הספק לפניו חום. אם תסכים לתקציב משקל נמוך מדי ב-SDR, אתה תיכשل ב-PDR.
2. **היתכנות טכנולוגית:** מהנדס המערכת יכול לצייר "קופסה שחורה" בארכיטקטורה, התפקיד שלך הוא להרים דגל אדום אם אין טכנולוגיה בשללה שתומכת בדרישה זו (למשל: "אי אפשר לפניות 500 וואט מהנפח שהקצת לי בקירות פסיבי").

#### אם תיקון זהה מסתדר לך עם התהlixir שחוויות בפרויקטים גדולים ברפאל?

היא אביתר, אני מבין את הבלבול – זה באמת נשמע כמו שני דברים נפרדים, אבל בתעשייה ה-SMT הם עובדים כצווות אחד. בוא נעשה סדר בשאלות שלך לגבי מהות החומרים ושלבי התנורו:

1. מה זו המשחה ואיפה ה"פלקס"?
- בתהlixir SMT המודרני, מה שאתה רואה שנמרח על הלוח בתחילת הקו נקרא משחת הלחמה (Solder Paste). המשחה זו היא למעשה תערובת של שני דברים: כדוריות בדיל זעירות: אילו החלקיים שייפכו בסוף למתקת המזקה שמחזיקה את הרכיב.
- פלקס (Aux): חומר כימי דמי גיל שעצוף את כדורי הבדיקה.

לכן, לא מורחים את הפלקס בנפרד. הוא כבר "בילט-אין" בתוך המשחה האפורה שמרחת על הפדים. רק בתיקונים ידניים או בתהיליכים מיוחדים (כמו הלחתת גל) מוסיפים פלקס נזלי בנפרד.

2. מה קורה בתוך התנור (שלבי ה-*Reflow*)?  
התנור הוא לא סתם "קופסה חמה", אלא מסע שעובר דרך תחנות טמפרטורה שונות. זה התהיליך שהמשחה עוברת:

שלבשים השלבמה קורה בפועל?תפקיד הפלקס בשלב זהPreheat1חימום הדרגתית של הלוח.המסים (Solvents) שבפלקס מתחילה להתאdots.2Soak"השריה" בטמפרטורה קבועה.הפלקס נכנס לפועלה: הוא מתפשט, מנקה את שכבות החלוודה (אוקסידציה) מהמתכת ומcin אותה לחבר.3Reflowהגעה לשיא החום (מעל  $\circledC\$217$ ).בדיל נמסות לאגם אחד נזלי. הפלקס מוריד את מתח הפנים כדי שהבדיל "ירטב" ויצמד היטב לפד.4Coolingקירור מהיר וUMB.הבדיל מתתקשה. הפלקס שנוטר הופך לשארית שקופה (ולרוב לא מוליכה).לסיקום הנזקודות המקצועיות שדיברנו עליו: הפלקס: הוא ה"מנקה" הכימי. בלי פלקס, הבדיל פשוט ותגלגל כמו כדור כספית ולא ידבק למוליכים.

המשחה: היא המוצר המוגמר (בדיל + פלקס) שנוצר דרך סטנסיל (שבלונה). אמיןות:ذكرנו שהשימוש בחנקן ( $\text{N}_2$ ) בתנור עוזר לפלקס לעבוד טוב יותר כי יש פחות חמצן שמפריע בתהילין.  
כמי שMOVIL מוקד בתחום הסימולציות והאמינות, תרצה שננתח איך פרופיל תרמי לא תקין משפיע על היוצרות מאמנים בחיבורו BGA, למשל?

בוחלת, אביתר. הסיקום שלך מודיע לך לחולוטין ומראה הבנה מצוינת של ה"כימיה" שמאחוריו התהיליך. ✨

עכשו, בוא נצלול לתוך ה"מכניקה" של התהיליך. השאלה שלך על הקשר בין **פרופיל תרמי לא תקין לבין מאיצים ב-BGA** היא קרייטית, כי שם נולדים רוב הבעיות ה"סמיים" – אלו שלא מתגלים בבדיקה החשמלית (E-test) אלא רק בשדה, אחרי חדש או שנה.

בתוך מומחה סימולציות, אתה יודע ש-BGA הוא רכיב רגיסטי אין לו "רגליים" גמישות (Leads) שיספגו מאיצים. הcadורים הם קשיים יחסית, והם סופגים את כל הדרמה.

הנה ניתוח של היוצרות מאמנים וכשלים ב-BGA כתלות בשלבי הפרופיל:

### 1. שלב ה-*Soak* (השריה): המלכודת של ה-*Warpage הדינמי*

זהו השלב המסעון ביותר מבחינת גיאומטריה.

- **התרכיש:** בזמן החימום, ה-PCB והרכיב (Component Package) מתפשטים בקצבים שונים בגל **CTE Mismatch** (מקדם התפשטות תרמית שונה).

#### • **הכשל (Dynamic Warpage):**

- אם ה-*Soak* ארוך מדי או הטמפרטורה לא אחידה, ה-PCB עשוי לקבל עיוות (למשל "צורה עצובה" - קמור), והרכיב מקבל עיוות הפוך ("צורה שמחה" - קעור).

- **התוצאה:** בפינות של ה-BGA נוצר פער אנכי (Stand-off height) גדול מדי. הבדיל מנסה לגעת בפדי אבל לא מצליח.

- **המנוח המקצועית: (Non-Wet Open או (HiP Head-in-Pillow.** הcadור נמס, המשחה נמסה, אבל הם לא מתאימים כי הם פיזית התרחקו זה מזה בגל העיוות. כזה מתפרק, זה נראה כמו ראש מונח על קרית – יש מגע, אבל אין חיבור מטלאורגי חזק.

## 2. שלב ה-Reflow (השיא): זמן מעל נקודת ההתכה (TAL - Time Above Liquidus)

כאן נוצרת ה-IMC (החיבור הבין-מתכתי), אך גם הנזק לטוח ארכו.

- **פרוfil חם מדי / ארכו מדוי:**

- **עיבוי ה-IMC:** שכבת החיבור (Intermetallic Compound) בין הבדיל לנוכחית צריכה להיות דקה (2-1 מיקרון). בחום יתר, היא גדלה והופכת עבה ופריכה (Brittle).

- **המשמעות המכנית:** בನפילה או רעדיה (Shock/Vibe), הסדק יפתח בדיק בשכבה זו. זה מחליש דרמטית את עמידות ה-BGA.

- **פרוfil קיר מדי / קצר מדוי:**

- **Cold Solder (הלחמה קרה):** הבדיל לא נמס לחלוטין, הגראוניות נשארת גסה, והחיבור חלש מכנית וחשמלית.

## 3. שלב ה-Cooling (קירור): "געילת" המאמצים השינויים

זה השלב הקritisטי ביותר לمهندס מכונות, כי כאן נקבע מצב האפס (Zero Stress State) של המערכת.

- **קירור מהיר מדוי:**

- **הלם תרמי:** ה-PCB מתכווץ מהר, אבל הרכיב (שיש לו מסה תרמית שונה) מתכווץ לפחות יותר.

- **התוצאה:** הבדורות החיצונית ב-Ag (שנמצאות בכיוון רחוק מהמרכז, ה-DNP - Distance from Neutral Point) נכנסות למאמץ גזירה (Shear) אדיר עוד לפני שהמוצר יצא מהמפעל. אלו **מאמצים שינויים** (Residual Stresses).

- **מבנה הגביש:** קירור מהיר יוצר מבנה גבישי עדין (Fine Grain) שהוא חזק יותר אך פחות עמיד ב-creep (זיהלה) לאורך זמן.

- **קירור איטי מדוי:**

- יוצר מבנה גבישי גס (Coarse Grain) שהוא רך יותר, אך עלול לגרום לצמיחת יתר של ה-IMC.

### איך זה מתקשר לSIMULIA (Ansys/Sherlock)?

כשאתה מבצע אנווליזה לכרטיס זה, אתה חייב לשאול את עצמן:

1. **Reference Temperature:** האם אני מגדיר את "מצב האפס" (לא מאמצים) ב-25 מעלות (טמפרטורת חדר) או ב-217 מעלות (טמפרטורת התמצוקות הבדיל)?

- **התשובה של Senior:** המאמצים מתחילה להצטבר ברגע שהבדיל מתמוך ( $217^{\circ}C$ ) והחומרים מתחווים בקצב שונה עד לטמפרטורת החדר. לכן, כרטיס שmaguis לחדר הוא כבר "טעון" במאמצים.

2. **Warpage Analysis:** האם הרצנו סימולציה של תהליכי Reflow עצמו כדי לראות אם ה-BGA מתנתק בפינות (Corner Lifting)?

**لسיכום התשובה לראיון:** "פרוfil תרמי לא תקין הוא לא רק בעית 'הלחמה', הוא בעית מכנית שבר.oprofil לא מאוזןגורם ל-Warpage Dynamic שיזכר נתקים (PjH) בזמן ההלחמה, וקצב קירור לא נכון 'ונעל' מאמצים שינויים (Residual Stresses) בבדורות, מה שמקצר דרמטית את חי' העיפות של המוצר עוד לפני שהליך הדליק אותו."

תסכם לי את הנושא של ה-AXFLU והנושא של ה-reflow?



אביתר, הנה סיכום מנהליים (Executive Summary) שמחבר בין הכימיה (AxFlu), התהלייך (Reflow) והמשמעות המכנית-אמינותית שחווצה לה.

## 1. ה-AxFlu (ה"מנקה" והמאפשר)

= Solder Paste הוא לא דבק, אלא **ריאקטור כימי** שנמצא בתוך משחת הלחמה (Solder Paste) כדריות בדיל + פלקס).

- **התפקיד המשולש:**

1. **ניקוי כימי:** מסיר תחומיות (Oxides) מהפד ומראשי הרכיב בטמפרטורות גבוהות.

ללא ניקוי זה, הבדיל לא ידבק.

2. **הורדת מתח פנים (Wetting):** מאפשר לבדיל הנוזלי "להרטיב" את המשטח ולהתפרש עליו, במקומם להתכדרר לכדור (כמו כספית).

3. **הגנה:** מונע חמצון חוזר של המתכת הלווהת בזמן שהוא בתנור.

• **הזרזת ההנדסית:** כשל בפלקס (למשל, "נשרף" בגל חיכום מוקדם אורך מדי) יוביל להרווית הרכיבים.

## 2. תהלייך Reflow (הפרופיל התרמי)

זהו "ריקוד" עדין בין טמפרטורה זמן, שמטרתו להפוך את המשחה לחיבור מתכת מוצק מבלי להרווית הרכיבים.

### ארבעת השלבים והסכנות המכניות:

שלב	מה קורה פיזיקלית?	הסכנה המכנית (Reliability Risk)
Pre-heat	אידי ממסים (Solvents) מתוך הפלקס.	<b>Solder Balls</b> : חיכום מהיר מדי ← פיצוץ אדי ממס ← (כדריות בדיל מטילות על הלוח).
Soak	השוואת טמפרטורות (Thermal Equilibrium) ואקטיבציה של הפלקס.	<b>Dynamic Warpage</b> : אם הלוח והרכיב מתעווים בغال CTE שונה ← נתך ב-Head-in (Head-in-Pillow).
Reflow	התכה מלאה (מעל $217^{\circ}\text{C}$ ). יצירת ה-IMC (החיבור הבין-מתכת).	<b>חיבור פריר</b> (Brittle) שיכשל בנפילה/הלם.
Cooling	התמצאות הבדיל וקביעת מבנה הגביש.	<b>קירור מהיר מדי</b> ← נעלמת <b>מאמצים שיוריים</b> (Residual Stress) בכדריות עוד לפני השימוש הראשוני.



### השרה התחתונה (Takeaway לראיון):

"הפלקס הוא הכימיה שמאפשרת את החיבור, וה-reflow הוא הפיזיקה שקובעת את איזותו. כ מהנדס מכונות, אני מסתכל על פרופיל ה-reflow לא רק כגרף טמפרטורה, אלא כgraf של

סיכון מתקזע: מתודולוגיות בדיקה ואיומות במחזור חי מוצר (NPV) סיכון זה מרכז את הגדרות היסוד, הבחנה בין שלבי הפיתוח לייצור, והקשר המعاش בין בדיקות קבלה (ATP) לסינון מאמצים (ESS).

1. מילון מושגים עיקרי (פיתוח וייצור)  
(Qualification Test Procedure) QTP: בדיקות הסמכה לתכנן (Design). מבוצעות על אבטיפוס כדי להוכיח שהתכנון עומד במעטפת תנאי הסביבה והקיצון (לרוב לפי MIL-STD-810). מבוצע פעם אחת (Per-Design).

(Acceptance Test Procedure) ATP: בדיקות קבלה. מבוצעות על כל יחידה שיוצאה מתקזע הייצור כדי לוודא תקינות פונקציונליות וביצועים לפני מסירה ללקוח.

(Environmental Stress Screening) ESS: סינון מאמצים סביבה. תהליך שמטרתו לחושף כשלים יצור חמויים ("תמותת תינוקות") ע"י הפעלת הרעדות ומחוזורי טמפרטורה. תהליכי יצור חמויים (FAI) ביקורת פריט ראשון. בדיקה דקדקנית (מידית, חומריים, תהליכי) של יחידה הראשונה בקנה, לאימוטה תהליך הייצור והтиיעוד (לפי תקן AS9102).

(Proof of Design) POD: הוכחת תכנן (להבדיל מ-*Proof of Detection*). שלב קרייטי בפיתוח (R&D) לביצוע ניסויים להורדת סיכון, תיקוף אנליזות והוכחת היתכנות טכנולוגית לפני כניסה להסמכה מלאה.

2. שלבים משלימים במעטפת הבדיקות בפיתוח: HALT (בדיקות מאמצים למציאת גבולות כשל), DVT (איומות דרישות תכנן). ביצור: IQC (ביקורת לרכיבים), HASS (סינון מאמצים אגרסיבי לייצור המוני).

3. הבהרה: הקשר בין ATP ל-ESS (תיאוריה מול פרקטיקה)  
במערכות ביומיניות/תעופתיות, קיימת אבחנה חשובה:  
המסמרק (ATP): משמש כ"מסמרק העל" שמנדרט את רצף הבדיקות בקנה הייצור.  
התהליך הפיזי: בפועל, ה-ATP "בולע" לתוךו את פרופיל ה-ESS.  
הבדיקה מבוצעת לרוב ברצף: בדיקה מקדימה -> הרצה פרופיל ESS (רעידות/טמפרטורה) ->  
בדיקות פונקציונלית מסכמת.

לעתים מבוצעת בדיקה פונקציונלית תוך כדי המאמץ (Operational ATP).  
רמות המאמץ: רמות ההרעדה והטמפרטורה ב-ATP נגזרות מדרישות ה-ESS (שנوعדו לסינון) ולא מדרישות העבודה הרגילה, במטרה לנפנות כשלים מבל' לגרום נזק מצטבר.

4. מדיניות היקף הבדיקות (Sampling 100% vs Sampling 100%)  
במושרים קרייטיים (Defense/High-Rel): ה-ATP וה-ESS מבוצעים על 100% מהיחידות.

במושרים מסחריים/בוגרים: ניתן לעבור לשיטת דגימה (Sampling) ב-ESS לאחר שההתהליך התייצב והוכח סטטיסטי, אך ה-ATP הפונקציונלי נשאר לרוב על 100%.  
אם תרצה שאוסף לסייע בתיחסות ספציפית לתיקוף אנליזות (Correlation) בשלב ה-  
POD, בהקשר לרקע שלך בסימולציות?



**חד משמעות כן.** ההוספה זו היא קרייטית עבורך. היא זו שהופכת אותך מ" מהנדס שמכיר את המושגים" ל"מוביל טכנולוגי שמחבר בין העולמות". עברו מי שmagu מפרק של סימולציות (כמובן), שלב ה-POD הוא לא רק בדיקה פיזית, אלא ההזדמנויות לכיוֹל המודל הדיגיטלי.

הנה התוספת המומלצת לsicom שלך, מנוסחת בשפה הנדסית מדוקט, ואחריה הסבר למה זה "אס" בראיון:

#### התוספת לסיכום (תחת סעיף 1 - POD או סעיף נפרד):

**תיקוף וכיול מודלים (Simulation-Test Correlation)**: מרכיב חינני בשלב ה-POD. מטרתו לבצע השוואה כמותית בין תחזית הסימולציה (FEA/CFD) לבין תוצאות הניסוי הפיזי.

- **המטרה:** זיהוי פערים בתנאי השפה, ריסון (Damping) או תכונות חומר, וביצוע "כיול מודל" (Model Tuning).
- **הערך המוסף:** יצירת "תאום דיגיטלי" (Digital Twin) אמין ומקובל. זה מאפשר להפחית את כמות הניסויים הפיזיים היקרים בהמשך (בשלב ה-QTP) ולהסתמך יותר על אנוליזות (Analysis) לטובת סגירת דרישות או ביצוע שינויים עתידיים (Risk Reduction).

#### למה זה ה"אס" שלך בראיון?

כשאתה מוסיף את זה, אתה מושך למראיין שלוש תובנות חזקות עליך:

1. **יעילות כלכלית:** אתה מבין שניים הם יקרים וארוכים. על ידי כיול המודל ב-POD, אתה חוסך איטרציות יקרות ב-Qualification.
2. **מקצוענות בסימולציה:** אתה לא סתם מריץ תוכנה ("Colorful Fluid Dynamics"), אלא מודע למוגבלות שלו ומחפש אימות פיזי.
3. **מתודולוגיה סדרורה:** אתה עובד בשיטת "Blind Test" – מריץ סימולציה לפני הניסוי, חוזה תוצאה, ואז חוקר את הפער.

#### נקודה לחידוד בסיכום (ה"משפר" של הגבולות)

בסעיף 3 (הקשר בין ATP-L-ESS), כדי להישמע ממושך Senior, כדאי להזכיר את **מרוחקי הביטחון** (Margins). נהוג לציין זאת כמשפר:

1. **Design Limit:** גבול החזק התיאורטי של החומר/תкан (הכי רחב).
2. **Qual Limit (QTP):** הגבול שבו הוכחנו שה מוצר עמיד (קצת פחות מה-1).
3. **(ESS) Screening Limit:** רמת הסיכון בייצור (חייב להיות נמוכה מה-Qual כדי לא לפגוע באורך החיים, אך גבוהה מה-Operating CDI לסנן כשלים).
4. **Operating Limit:** תנאי העבודה השגרתיים אצל הלחות.

**הסיכון שלך מצוין ומדויק מאוד.** עם התוספת על ה-QTP, הוא מכסה בצורה הרמטית את תפקיד המהנדס המוביל ב-NPI.

אני רוצה שתறחיב על כל ציפוי בראשית הציופים שאני אתן לך ותתייחס גם לאילו סוגים מתקנות הוא מיועד, הגנה מפני קורוזיה, בידוד חשמלי ועוד.

הציופים:

תמורה (Alodine), קדמים, אבץ, אבץ-nickel, אבץ-ברזל, אבץ-קובלט, קרום קשה, פסיבציה, אלקטROLס ניקל, ניקל, בידיל, זהב, כסף, פוספטציה, השחרה ניטריטית, T-Black, ציפויים מגנזיום



אביתר, זהה רשיימה מחייבת המכסה את רוב ה"ארסנל" של מהנדס מכונות בתעשייה הביטחונית והזיווד.

כמו מהנדס Senior, חשוב שתבחן בין שני מנגנוני הגנה העיקריים:

1. **הגנה קטודית (Sacrificial):** היציפוי "מתאבד" כדי להציג את המתקפת (כמו אבץ).
2. **הגנה מחיcitית (Barrier):** היציפוי אוטם את המתקפת מהסביבה. אם יש סדק – הקורוזיה תתקוף (כמו ניקל או כרום).

להלן הפירוט הטכני לכל אחד מהיציפויים:

## 1. המרות כימיות (Chemical Conversion)

### תמורה (Alodine / Chromate Conversion)

הטיפול הנפוץ ביותר לאלומיניום (לפי תקן MIL-DTL-5541).

- **מתקות יעד:** אלומיניום (בעיקר), ולעיתים מגנזיום.
- **הגנה מפני קורוזיה:** ביןונית. משמש בעיקר כבסיס לצבע (Primer) או להגנה זמנית.
- **מוליכות חשמלית:**
  - **Class 1A:** זהוב/זהב. שכבה עבה יותר, הגנה טובה יותר, התנגדות חשמלית גבוהה יותר.
  - **Class 3:** שחוף/צהוב בהיר. שכבה דקה, **מוליך חשמלי מצוין**. קריטי להארקוות (Grounding).
- **דגש הנדסי:** שים לב לתקנות SHSRo. אלודין מסורתית (1200) מכיל כרום 6-ערכי (מסרטן). אלודין מודרני (5900/ICP) הוא נטול כרום ומאושר סביבתית, אך מעט פחות עמיד.

## 2. ציפוי הקربה לפלדות (Sacrificial Coatings)

### קadmium (Cadmium)

"מלך היישן" של התעשייה התעופתית.

- **מתקות יעד:** פלדות (כולל חזק גבוה) וברגים.
- **הגנה מפני קורוזיה:** מעולה (הגנה קטודית). גם אם נשרט, הוא מגן על הפלדה. עמיד מאד בסביבה ימית.
- **תכונה קריטית: סיכות (Lubricity)** טבעית. מונע Galling (התפסות) בהברגות ומאפשר מומנט סגירה מדויק.
- **חסרון:** רעיל מאוד ומסרטן. אסור ברוב התעשיות האזרחיות (HSRo). מוחלף ע"י אבץ-ניקל.

### אבץ (Zinc)

היציפוי הסטנדרטי ("גלוון").

- **מתקות יעד:** פלדה.
- **הגנה:** טובה וдолה. האבץ קורוזיבי יותר מהפלדה ולכן נתקף לפנייה.
- **גימור:** חייב לעבור פסיבציה (זהובה/שקופה/שחורה) כדי למנוע "חולודה לבנה" (White Rust).

- **חסרון:** לא מתאים לטמפרטורות גבוהות (מעל  $100^{\circ}\text{C}$  מAbrдיעות) ולא עמיד כמו קדמים בסביבה ימית קשה.

### אבץ-nickel (Zinc-Nickel)

- המלחיף המודרני של הקדמים.
- **הגנה: מעולה.** עמיד יותר מאבץ רגיל ומתחרה בקדמים (אלפי שעות בתא מלח).
  - **תכונות: קשיח יותר מאבץ, עמיד בחום (עד  $\text{C}-200^{\circ}$ ), ופחות גורם לקורוזיה גלוונית במגע עם אלומיניום.**
  - **שימוש:** תעשיית הרכב והתעופה.

### אבץ-ברזל (Iron-Zinc) ואבץ-קובלט (Zinc-Cobalt)

- **אבץ-ברזל:** נותן יכולת צביעה טובה וריטור טוב, ופסיבציה שחורה عمוקה ויפה.
  - **אבץ-קובלט:** נותן קשיות משופרת ועמידות קורוזיבית טובה מעט מאבץ רגיל, אך פחות נפוץ היום לטובת ה-Ni-Zn.
- 

## 3. ציפויים הנדסיים קשיחים (Engineering Coatings)

### כרום קשה (Hard Chrome)

- **מטרות יעד:** פלדות.
- **מטרה: עמידות בשחיקה (HRC 65-70 ~ Hardness)** ומוקדם חיכוך נמוך. משמש לבוכנות הידראוליות, צירים, ותבניות.
- **הגנה מקורוזיה:** ביןונית ומטה. הציפוי נתה להיות סדוק מיקרוסקופית. מסתמכים על עובי או על ציפוי תחתון (כמו ניקל) להגנה.
- **בידוד:** מוליך חשמלי.

### אלקטROLס ניקל (EN - Electroless Nickel)

הציפוי החביב על מהנדסי מכונות לחלקים מורכבים.

- **התהלייר:** כימי בלבד (לא זרם חשמלי).
- **היתרון הגדול: עובי אחיד מושלם (Conformal).** הציפוי נכנס לתוך קדחים, תבריגים ופינוט באוטו עובי בדיאק כמו בחוץ. אין "Dog Bone effect" כמו בציפוי חשמלי.
- **תכונות: קשיח** (ניתן להקשיה תרמיית עד  $60\text{ HRC}$ ), עמיד מאוד בשחיקה.
- **סוגים:**
  - **High Phos:** עמידות קורוזיבית מקסימלית (אמורפי).
  - **Mid Phos:** הסטנדרט (שילוב של קשיות וקורוזיה).

### nickel-alktroliti (Nickel)

- **הגנה:** משמש בעיקר כשכבה ביןימ (Underplate) לציפויים אחרים (כמו זהב או כרום) או לנוין.
- **חסרון:** פיזור עובי לא אחיד (מצטבר בפינות חדות).

- מה זה: מותג מסחרי של ציפוי המשלב פולימרים (PTFE/Teflon).
- **תכונות:** מוקדם חיכון נמוך מאוד (סיכה יבשה), עמידות קורוזיבית גבוהה (בגלל הפולימר), צבע שחור מט.
- **שימוש:** נשך קל, חלקים נעים במנגנונים ללא שימוש. בידוד חשמלי (תליי בעובי ובהרכב).

### השכלה ניטרטית (QPQ / Tenifer / Melonite)

- **התהילין:** לא ציפוי, אלא דיפוזיה (החדרת חנקן ופחמן לפני השטח) באמצעות מלחים בטמפרטורה גבוהה.
- **תכונות:** הקשיות פני שטח דרמטית, עמידות בשחיקה, עמידות קורוזיבית גבוהה (יותר מכרום קשה!), צבע שחור עמוק.
- **שימוש:** צירים, גלגלי שינוי, קנים של נשך.

## 4. מתכות אצילות ומוליכות (Noble Metals)

### זהב (Gold)

- **תכונות:** מוליכות גבוהה, אפס חמצון (לא מחליד לעולם).
- **שימוש:** מגעים חשמליים לקריטיים, קונקטורים,CRTS, PCB.
- **סוגים:** זהב קשה (למגעים שיש בהם שחיקה) וזהב רך (L-Wire Bonding).

### כסף (Silver)

- **תכונות:** המוליך החשמלי והתרמי הטוב ביותר בטבע (יותר מאשר ונחות). מצוין לתרדמת גבוהה (RF) בגלל ה-Skin Effect.
- **חסרון:** משחיר (Tarnish) בנוכחות גופרית, וסובל מנדייה (Migration) שיכולה לגרום לנזקים במעגלים צפופים.

### בדייל (Tin)

- **שימוש:** בעיקר להלחמה (Solderability). רך מאוד.
- **סיכון:** היוצרים "Whiskers" (שערות מתקת מיקרוסקופיות) שגורמות לנזקים, בעיקר בבדיל נטול עופרת (RoHS).

## 5. טיפולים אחרים

### פסיבציה (Passivation)

- **למי מיועד:** ארכר ורקר לפלדות אל-חילד (Stainless Steel).
- **התהילין:** זה לא ציפוי. זהו ניקוי חומצית (חנקתי או ציטרי) שמסיר ברזל חופשי (Free Iron) מפני השטח ומעודד יצירת שכבות תחומיות קרום טבעית.
- **מטרה:** מניעת חלודה שטחית. לא משנה מידות.

### fosfatzia (Phosphating / Parkerizing)

- **למי מיועד:** פלדות.
- **שימוש:** ציפוי המירה אפור/שחור שיוצר משטח מחוספס וספוגי.

- **מטרה:** ספיחת שמן (למניעת חלודה ולטיפה) או כביסיס לצבע. נפוץ מאוד בתעשייה הנשקייה היינה ובחלקים פנימיים של מנועים.

### ציפויים למגנזיום (Magnesium Coatings)

מגנזיום הוא מטכת "בעיתית" מאוד וריאקטיבית.

- **Dow / EAH:** תהליכי אנדיז למגנזיום. יוצרים שכבה קרכמית קשה ועבה להגנה מקורזיה ומחיקה.
- **בידוד:** היציפויים הללו הם מבודדים חשמליים (קרמייקה).
- **חובה:** בغالל הנקבוביות, חובה לאטום אותם (Sealing) בלבד או אפוקס.

### טבלת סיכום מהירה למתנדס (Cheat Sheet)

ציפוי	מתקת בסיס	מוליך חשמליות?	הגנה עיקרית	הערות Senior
<b>Alodine</b>	אלומיניום Class 3	כן	קורזיה קלה/בסיס לצבע	שים לב ל-SHS Ro וסוג (זהוב/שחור).
<b>Cadmium</b>	פלדה	כן	קורזיה + סיכה	רעיל! מוחלף ב-Ni-Zn.
<b>Zn-Ni</b>	פלדה	כן	קורזיה מעולה	המחליף המודרני לקצדיומים.
<b>Anodize (רגיל)</b>	אלומיניום	לא (מבודד)	קורזיה + נוי	משנה מידות (חזי חודר חזי בונה).
<b>Electroless Nickel</b>	פלדה/אלומיניום	כן	שחיקה + קורזיה	עובי אחיד בקודות! (Conformal).
<b>Hard Chrome</b>	פלדה	כן	שחיקה קשה	קשה מאד אך פריך. לא אחיד בעובי.
<b>Passivation</b>	נירוסטה	כן	מניעת חלודה	לא מוסף עובי. חובה שטחית אחרי עיבוד שבבי.
<b>QPQ</b>	פלדה	כן	שחיקה + קורזיה + שחור + דיפוזיה.	משנה את פני השטח (דיפוזיה).



האם יש ציפוי ספציפי שאתה מطالب לגביו בפרויקט הנוכחי ורוצה שנעמעיך בבחירה שלו?