

## עיצוב טיטניום בלחץ גבוהה וטמפרטורות נמוכות – תהליך חדשני

האינדיקטורים מהשווקים מראים גידול עקבי ומשמעותי של שימוש בטיטניום בבניית מטוסים חדשים. כמובן שהתוצאה היא עליה בנפחים של טיטניום בשוק בשנים הקרובות. הגידול בשימוש של טיטניום מעוצב הביא לפיתוח דרך יותר מהירה ואפקטיבית לעצב חלקים לתעשיית האיירספייס.

### כאשר הטיטניום "ממריא"

קיימת סיבה טובה לשימוש מוגבר של טיטניום בייצור מטוסים. הטיטניום הוא קל משקל יחסית לפלדה ( יחס משקל לחוזק מצוין ), בעל התנגדות מעולה לקורוזיה ומסוגל עדיין לתפקד באופן אפקטיבי בטמפרטורות גבוהות (  $400-500^{\circ}C$  ). המחיר הגבוהה של חומר הגלם ושיטות העיצוב הקיימות מהווים חסם לשימוש מסחרי נרחב של נתכי טיטניום ומנתבים אותם למסדרון צר של אפליקציות במטוסים, בחלל, בטורבינות, במכשור רפואי ובמקומות מאומצים וקורוזביים אחרים בלבד.

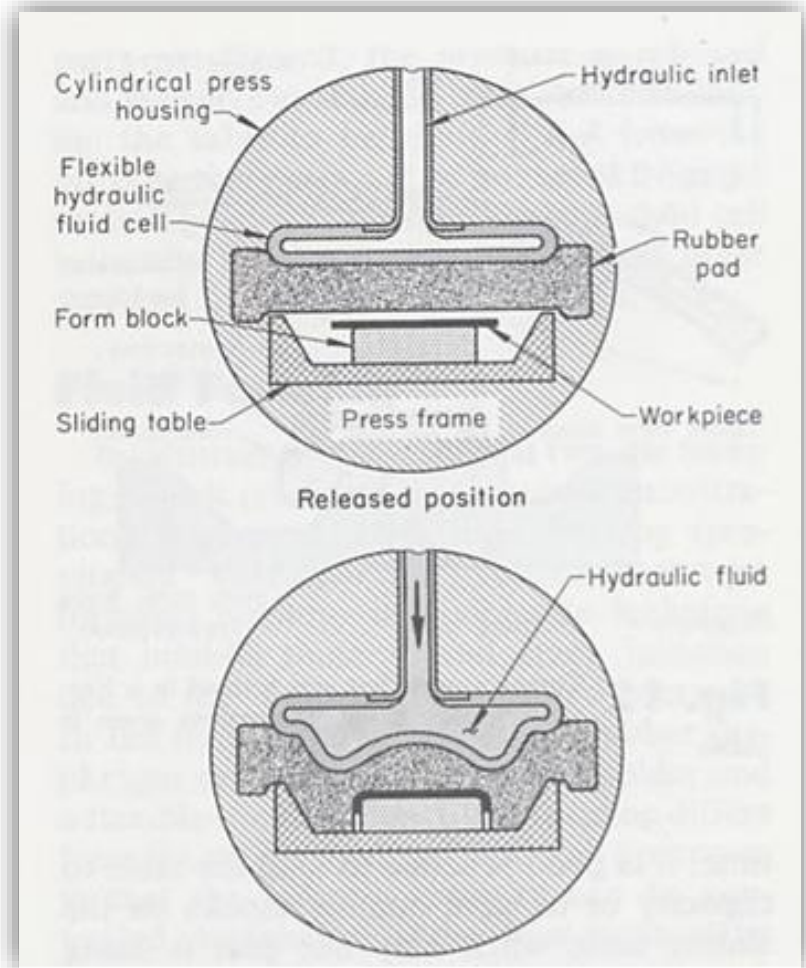
נתכי הטיטניום ( grade 1-4 ) המיוחסים לנתכי טיטניום טהור ( commercial pure ) ניתנים לעיצוב גם בטמפרטורת החדר בתנאים מסוימים. לעומתם הנתך ( grade 5 ) או מה שידוע כ- Ti 6Al-4V מועדף לשימוש לתכן במטוסים. הטיפול בנתך זה דורש שיטות ייצור כמו כרסום, תהליכי כבישה חמה שמבוצעים בטמפרטורות של  $700-900^{\circ}C$ . החיסרון המובנה בתהליכים הנ"ל הוא מחיר הביצוע הגבוהה. רמת הגריטה הגבוהה בעיבוד שבבי ( 50-70% ) המשולבת במחיר חומר הגלם הגבוהה מגבילה באופן משמעותי את הרחבת השימוש ( מתחילים לראות היום פתרון בעזרת Additive Manufacturing ). באופן דומה תהליך עיצוב בחום הוא ארוך, "אוכל" זמן ודורש כלי ייצור יקרים. אלו אינדיקטורים להחזרה איטית של טיטניום לעולם האיירוספייס מכפי שנצפה בתחילה ( הערה: חו"מ שינוי באופן קיצוני את התמונה ) ומונע מהיצרנים לממש את היתרונות באופן מלא.

## עיצוב טיטניום בלחץ גבוהה וטמפרטורות נמוכות – תהליך חדשני

### עיצוב בלחץ גבוהה וחום נמוך של 6al-4v

לאחרונה נחשפנו לטכנולוגיה חדשה ( high pressure warm forming- HPWF ), פותחה לעצב חלקי איירוספייס בטמפרטורות נמוכות מטמפרטורת הכבישה החמה לעיצוב סופר פלסטי.

טכנולוגית תא לחץ גבוהה הוכנסה לשימוש מסחרי לייצור חלקים תעופתיים מזה שנים רבות. הקדמה באפשרויות הלחיצה בשילוב כלי ייצור חכמים אפשרו לתעשיית המכששים להדביק את הצרכים של חברות האיירוספייס לכבישה בקור.



## עיצוב טיטניום בלחץ גבוהה וטמפרטורות נמוכות – תהליך חדשני

העלאת הלחץ לאזורי PSI 20,000 סיפקה את היכולת לעצב חלקים לצורתם הסופית תוך מניעת הצורך בטיפול ביניים תרמיים והיישור הידני.

במהלך שיפור מתמשך בעולם ה HYDROFORM וה ELASTOFORM הטכנולוגיה בלחץ גבוהה משתפרת כל הזמן והיום ניתן ליישם לחץ גם בטמפרטורות מוגבהות. השילוב של לחץ גבוהה וטמפרטורה שיפרו את תוצאות העיצוב, מהירות העיצוב, הפחיתו את המחיר וגרמו למחשבה של כניסת התהליך לעיצוב 6AL-4V.

הגישה החדשה הזו שהופיעה בשוק לראשונה בתחילת 2018 מציגה חימום באינדוקציה של הפריסות ומערכת הכלים לטמפרטורה של  $270^{\circ}\text{C}$  לפני הכניסה למכבש. תהליך ה HPWF דורש טמפרטורות נמוכות יותר באופן ניכר מתהליך הכבישה החמה. לתפעול בלחץ PSI 20,000 (MPa 140) מכבש הלחיצה ( Fluid Cell ) מצויד בבקרה למדידת ומעקב האלמנטים הקריטיים של התהליך על מנת לפגוש את הפרמטרים הדרושים.

### חזרתיות ה HPWF

אנליזה בלתי תלויה של חלקים שיוצרו בטכנולוגיה הנ"ל מצביעה על פרמטרי עיצוב שעומדים בטולרנסים הדרושים.

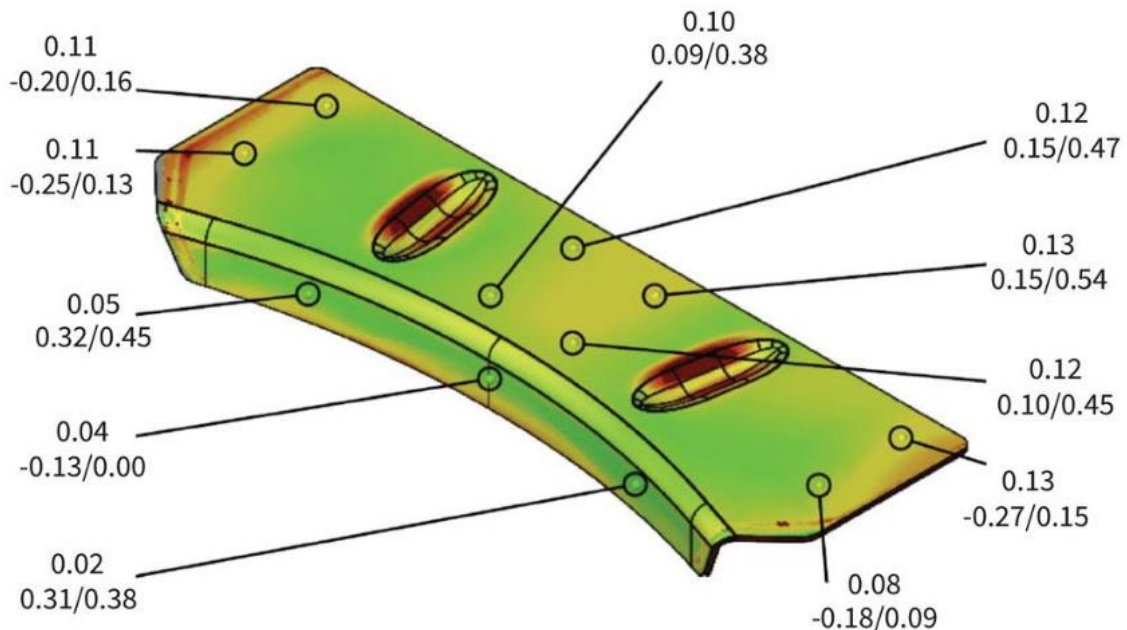


Figure 1  
A springback analysis of parts formed in Ti6Al4V,  $t = 2.0\text{ mm}$ , showed a decrease with HPWF.  
Image courtesy of the Advanced Forming Research Centre, Glasgow, Scotland.

## עיצוב טיטניום בלחץ גבוהה וטמפרטורות נמוכות – תהליך חדשני

החקר שהושלם ע"י אוניברסיטת גלאזגו AFRC בתחילת 2018 מאשר שחלקים שעוברים את תהליך HPWF תהיה להם קפיציות חוזרת אחרי העיצוב של פחות מ 0.5 מ"מ! (תרשים מעלה). ראוי לציין שגמישות התהליך מאפשרת בקרת קפיציות חוזרת ופיצוי ע"י הכנסת הפקטור לכלי העיצוב בזמן תכנון הכלי. כך מתאפשר לקבל חלקים בצורה סופית באופן ישיר. קבוע הקפיציות החוזרת מיוחסת לצורת החלק, עובי החומר ולפרמטרי התהליך. נראה כי לרמת הלחץ שמתפתח בתהליך השפעה קריטית על התוצאות.

### טמפרטורות נמוכות יותר עשויות לממש חסכון בעלויות

בתהליך HPWF אנחנו מפיקים יתרונות להקטנת עלויות. הטמפרטורה הנמוכה של התהליך מאפשרת ביצוע ברב המקרים ללא גז מגן. בנתכי טיטניום הנחשפים לטמפרטורה הגבוהה מ  $425^{\circ}\text{C}$  נוצרת שכבה מחמצנת שהתוצר שלה היא שכבה קשה ופריכה המעושרת בחמצן הנקראת alpha case. למניעת השכבה הקשה והפריכה העיצוב בחום והעיצוב הסופר פלסטי דורשים אווירה חופשית מחמצן למנוע את סיפוח החמצן או החנקן. היות ותהליך HPWF מתבצע בטמפרטורה הנמוכה מזו שבונה את ה - alpha case, אין צורך להשתמש בגז מגן או כל אמצעי מיגון אחר. כמובן שהזמן הדרוש לניקוי החלקים מצטמצם והצורך לתחזוקתיות של כלי הייצור פחות אקוטי בגלל העדר הצורך בציפוי הפריסות והכלים בטמפרטורות תהליך הנמוכות יחסית. בסופו של דבר גם צריכת האנרגיה הדרושה פחותה בהשוואה לעיצוב בחום המסורתי.

### מגבלות של קצב הייצור בכבישה חמה

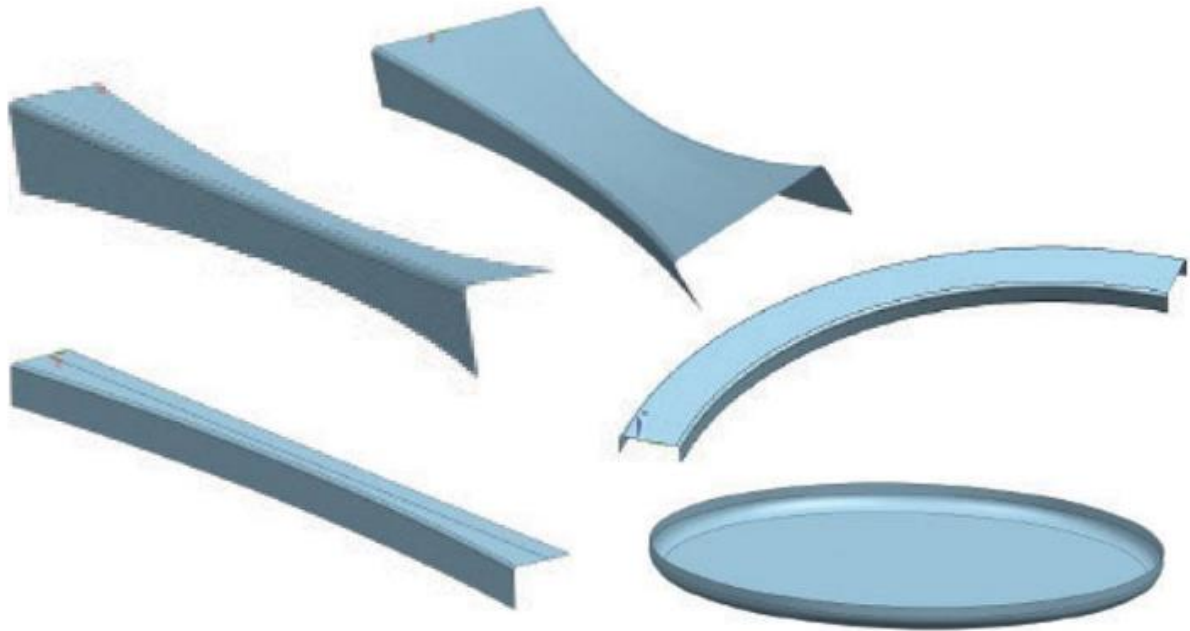
זמן התהליך הכבישה החמה נמדד בדקות רבות או לעיתים בשעות כמהלך טיפוס. המשך הארוך הנדרש להשלים כבישה חמה מגביל משמעותית את יכולת הייצור של המכש. תהליך ה HPWF מסיים את התהליך בדקות ספורות בקונטרס גמור לכבישה חמה.

כמובן שטכנולוגיית ה- fluid cell עם דיאפרגמת גומי/פוליאוריתן מאפשרת ייצור של מספר רב של חלקים בתהליך אחד תוך הקטנת זמן העיצוב לחלק לשניות ספורות. יעילות זו נותנת ל HPWF את היכולת (התיאורטית) לייצר 140,000 חלקים בשתי משמרות לאורך שנה.

### משפחות חלקים טיפוסיות

HPWF אפקטיבית בייצור חלקים בעקומה גיאומטרית מורכבת מחלקים שטוחים מה שהופך אותה למתאימה ביותר לחלקי Airframe וחלקי מנוע טיפוסיים

## עיצוב טיטניום בלחץ גבוהה וטמפרטורות נמוכות – תהליך חדשני



**Figure 2**

The HPWF process is well-suited to form shallow shapes such as C-shaped frames with both stretch and shrink flanges; angles with both flanges curved; small curved single-bend angles; twisted or irregular parts; and panels with flanges, circular, or irregular shapes.

### כיצד HPWF עובד

ראשית כדאי שנבין איך מכבש הידרופורם ללחץ גבוהה מתפקד. חלקי פח מורכבים מעוצבים כלים עם פרופיל של נקבה או זכר ( bottom die ) כאשר דיאפרגמת גומי גמישה משמשת כלחצן או כחלק עליון של הכלי במהלך בניית והפעלת הלחץ. בצורה זו ניתן לעצב פריסות לצורות מורכבות ביותר כולל אוגנים ב under cut בעוביים שונים של הפח בכל החומרים. אחידות הלחץ הגבוהה מבטיחה חלקים איכותיים בטולרנס מתאים ישירות מהמכבש. עלות הנמוכה של הכלים, זמני המחזור הקצרים של התהליך הופכים את הטכנולוגיה לאידיאלית לייצור בנפחים נמוכים של חלקי פח למגוון של אפליקציות.

## עיצוב טיטניום בלחץ גבוהה וטמפרטורות נמוכות – תהליך חדשני

כאשר תהליך זה משולב עם חום הוא הופך להיות אפשרי גם לטיטניום 6AL-4V. תהליך ההידרופורם מאפשר לעצב מספר חלקים יחדיו באותה נגזרת ביצוע. דיאפרגמת הגומי משמשת כלחצן עליון גמיש כאשר מיושם הלחץ ההידראולי.

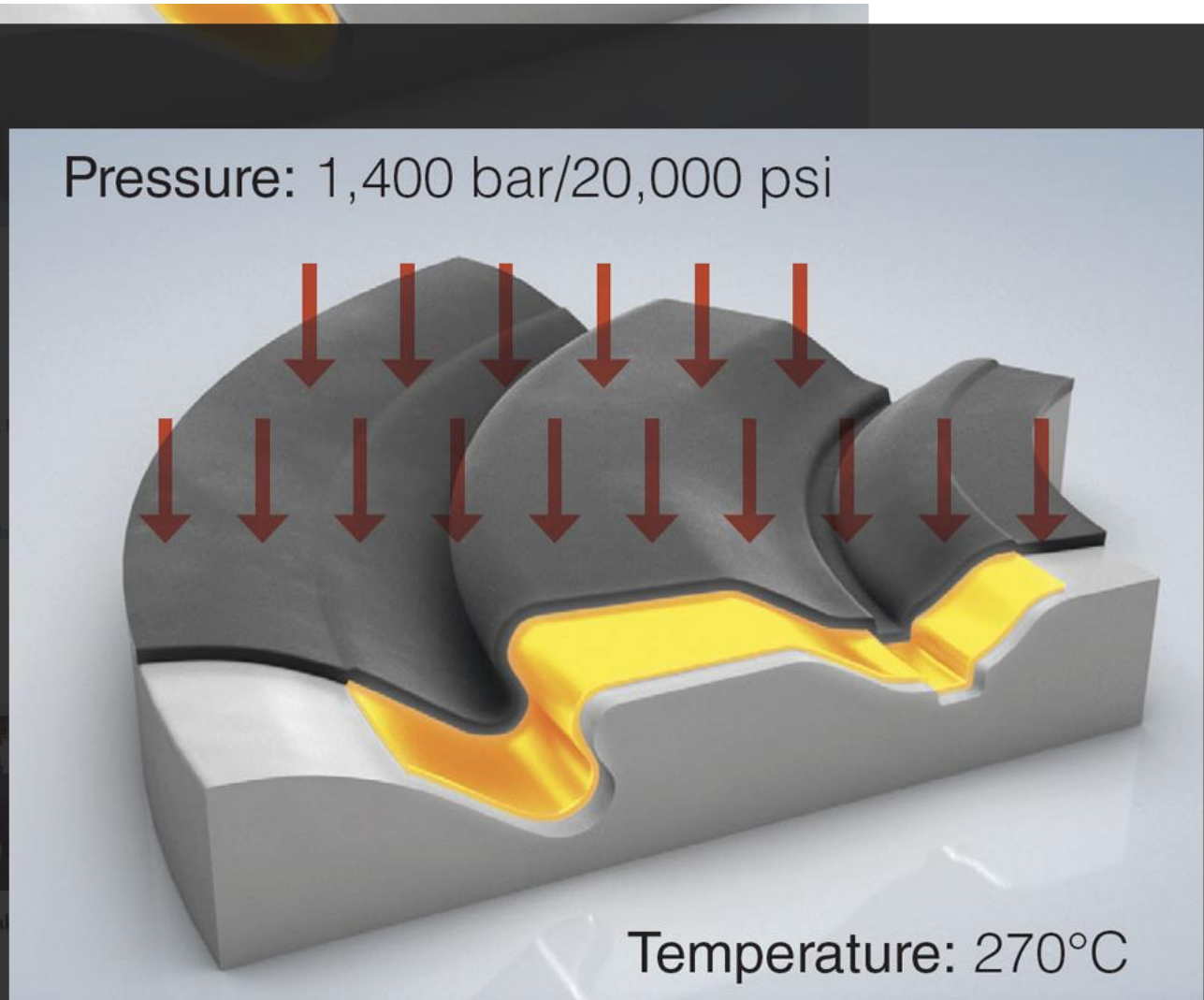


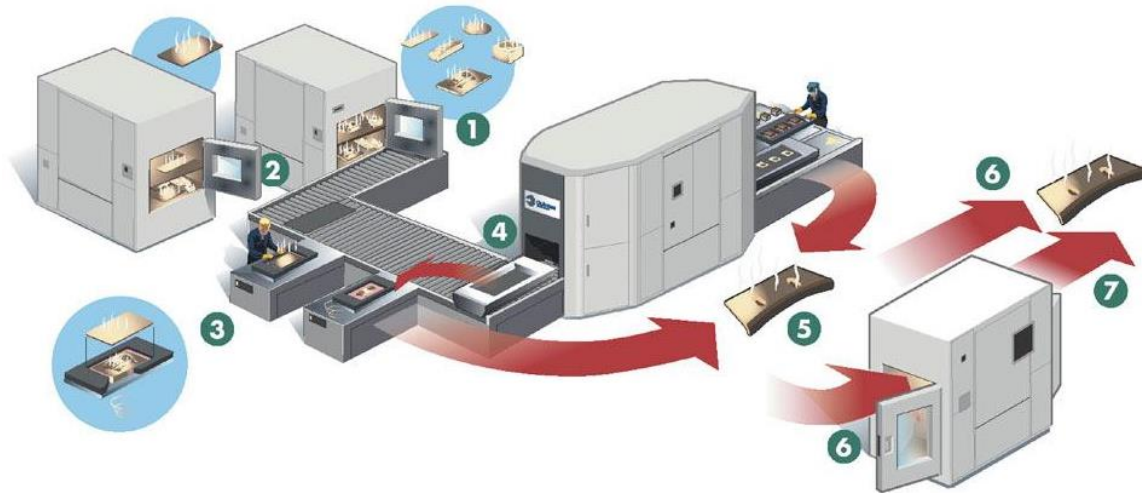
Figure 3

The sheet to be formed goes between a shape-defining tool half and a flexible rubber diaphragm, and then high hydraulic pressure is applied to the diaphragm from above.

### תהליך HPWF צעד אחר צעד

## עיצוב טיטניום בלחץ גבוהה וטמפרטורות נמוכות – תהליך חדשני

תהליך ה HPWF דומה להטבעה חמה ( רק בטמפרטורה נמוכה יותר ) מתבצע בשלבים והעיצוב נגמר כאשר טמפרטורת המתכת מוגבהת על מנת לדכא את הקפיציות החוזרת



The HPWF process is similar to hot stamping except that the temperatures are much lower and fluid pressure is used.

1. ניתן לחמם את הכלים מלהתחילה על מנת למקסם את יצוריות המערכת
2. מחממים את הפריסות גם כן
3. הפריסה פוגשת את הכלי ומיושם חימום באינדוקציה בהכוונה לטמפרטורת התהליך הנדרשת. המערכת יכולה לטפל ביותר מכלי אחד במחזור כיפוף אחד.
4. הפריסה והכלי נכנסים אוטומטית למכבש ונחשפים ללחץ גבוהה וחוזרים לעמדת פריקת חלקים. כמובן שבמהלך התהליך נרשמים כל הפרמטרים ומתועדים. בדרך כלל למכבש שני מגשי עבודה משני צידיו שמסוגלים לעבוד סימולטנית. ניתן גם להפעיל את אחד המגשים לעבודה קרה, כך שלתהליך ורסטיליות מרובה.
5. אחרי עיצוב וקירור הפריטים יהיו למעשה מוכנים לשלב הבא או להרכבה.
6. אלטרנטיבית יצאו הפריטים לט.סופי במידה ונדרש.
7. אפשר גם לבצע קליברציה בחום במידה ונדרש.

## עיצוב טיטניום בלחץ גבוהה וטמפרטורות נמוכות – תהליך חדשני

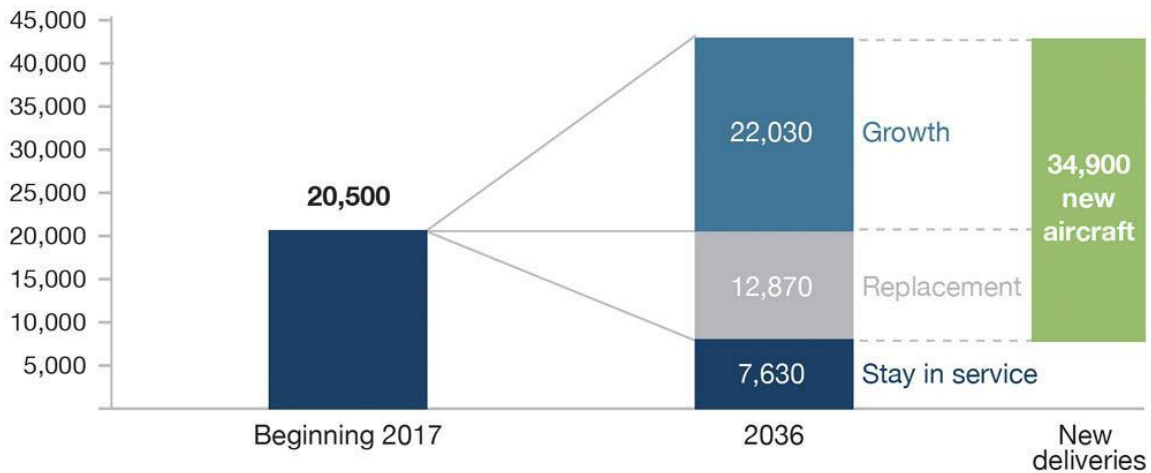
בשולי המאמר :

### הצמיחה הגלובלית מצמיחה מסלול התרחבות של שימוש בטיטניום

יצרני המטוסים המובילים צופים להזמנות בהיקף של 30,000 מטוסי נוסעים ומטען במהלך 20 השנים הבאות. תחזית זו אינה רק תוצאה של נפח הטיסות, אלא גם הצורך לרענן את הציים הישנים במטוסים יעילים יותר ( צריכת דלק/ קיימות ).

#### Global Market Forecast, 2015-2034

Fleet in service evolution, number of aircraft



על מנת לפגוש את יעדי תצרוכת הדלק החדשים נדרש לייצר מנועים יותר יעילים ומבנים תעופתיים מתקדמים מבחינה אווירודינמית. הורדת משקל היא גורם מפתח בהצלחת והתקדמות התהליך, מה שהצית את החיפוש אחר חומרים קלים יותר מאשר אלו שהשתמשו בהם בעבר. כרגע חומרים מרוכבים חדשים תופסים את מקומם של חלקי אלומיניום במבנה. המעבר הזה לחו"מ משפיע משמעותית על תפקידו של הטיטניום כבעל יחס משקל חוזק גבוהה והתנגדות מצויינת לקורוזיה כמו גם תאימות גלוונית שהופכת אותו אטרקטיבי כאלטרנטיבה לאלומיניום. לאחרונה נרשם גידול ניכר של שימוש בטיטניום בסקטור האיירוספייס. בשנת 2015 הייתה עליה בצריכה של 45-60% יחסית לשנים עברו. ה 787 של בואינג שטס לראשונה ב 2011 הכיל כמות טיטניום של פי 5.3 מה 767 שתוכנן 27 שנים קודם. על איירבוס 350 שנכנס לשרות ב 2015



## עיצוב טיטניום בלחץ גבוהה וטמפרטורות נמוכות – תהליך חדשני

יש פי 4.5 טיטניום מאשר על ה 330 שטס לראשונה ב 1992. השוני הנרשם הוא עליה מ 15 טון מטר ל 100 טון מטר למטוס שיתוכנן בימים אלו.

קריאה מהנה ...