

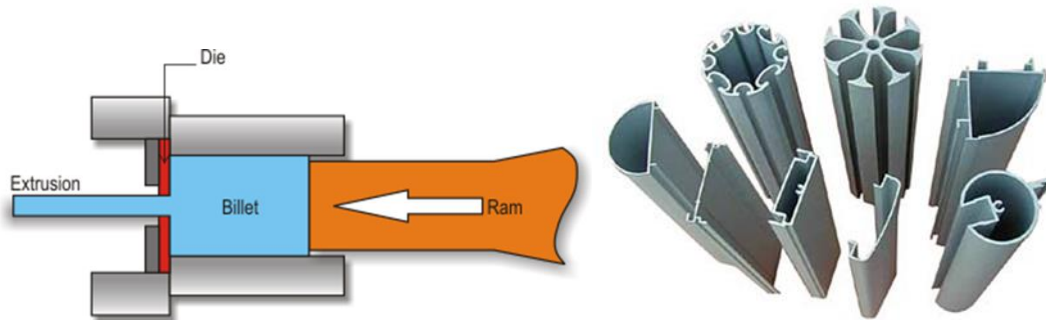
1. מטרת המעבדה

- 1.1. הכרת תהליך טרוד חם של מתכות
- 1.2. חקר השפעת פרמטרי הטרוד על תהליך הטרוד
- 1.3. חקר השפעת תהליך הטרוד על המיקרומבנה של הפרופילים המטרודים

2. רקע מדעי**2.1. תיאור כללי**

טרוד הינו תהליך אשר מטרתו היא ייצור מוצרים ארוכים בעלי שטח חתך קבוע לאורכם. על ידי הפעלת לחץ מכני או הידראולי חומר נדחף דרך טבע (die) ומתקבל פרופיל בצורה של שטח החתך הרצוי בחלק. צורות הטבע יכולות להיות מגוונות מאוד החל מעיגול, מלבן, פרופיל L/T ועד לצורות מסובכות ומורכבות מאוד, וכמו כן צורות חלולות כגון צינורות ופרופילים חלולים. יתרונות של תהליך הטרוד

- ניתן לייצר מוצרים ארוכים בעלי פרופיל קבוע
- דורש מעט כוח אדם
- ניתן לקבל מוצרים עם גיאומטריה מסובכת
- משפר תכונות מכניות ע"י דפורמציה
- מאפשר שליטה על המצב המטורגי של המוצר



איור 1: סכמה עקרונית של תהליך טרוד ומספר דוגמאות לפרופילים מטרודים מאלומיניום

לרוב, טרוד של מתכות נעשה בטמפרטורה של כ-0.6 מטמפרטורת ההיתוך (בתחום טמפרטורת הרקריסטליזציה). בטמפרטורה זו מאמץ הכניעה נמוך יחסית ולכן הכוחות הנדרשים לביצוע הטרוד יורדים משמעותית, כלומר ניתן לטרוד ביחס רדוקציה גבוה או להשתמש במכשירים קטנים יותר, דבר המביא לחיסכון. בטמפרטורה גבוהה מתרחשים תהליכים של החלמה דינאמית ורקריסטליזציה דינאמית, אשר מגדילים את המשיכות לשבר ומאפשרים טרוד פרופילים מורכבים וצלעות דקות. בנתכים הנענים לתהליכי זיקון, משמש חימום המטיל לטמפרטורות הטרוד כתהליך המסה ובכך, ע"י קרור הפרופיל ביציאתו מהטבע, נחסך שלב ההמסה והחיסום והפרופיל כבר מוכן לזיקון, במטרה להקנות לו את התכונות המכאניות הנדרשות. החיסרון של טרוד חם מתבטא בפני שטח פחות טובים מאלו שהיו מתקבלים בטרוד בקר וגם בנושא הרגישות לקצב עיבור האופייני למתכות מסויימות, העולה עם עליית הטמפרטורה. רגישות לקצב עיבור מגבילה את קצב הטרוד ובכך משפיעה על הנצילות של התהליך ורווחיות המפעל.

2.2. היסטוריה

בשנת 1797 Joseph Bramah רשם פטנט על תהליך הטרוד הראשון ליצירת צינורות עופרת. תהליך זה כלל את חימום המתכת ולאחר מכן לדחוף ידנית את המתכת אל בוכנה גלילית כך שהעופרת עוטפת את הבוכנה ויוצרת צינור. רק בשנת 1820 התהליך שופר על ידי Thomas Burr כאשר בנה את הדחיפה של טרוד על ידי כוח הידראולי הראשונה. בשנת 1894 Alexandre Dick הרחיב את השימוש לסגסוגות של נחושת. כיום שתי החברות השולטות בשוק הטרוד הן Hydro ו-Sapa Extrusions.

הדוח כתוב בלשון זכר למען הפשטות, הכוונה כמובן לשני המינים באופן זהה.

2.3.1. מתכות נפוצות

אלומיניום – הנפוץ מכלל החומרים בטרוד. אלומיניום יכול לעבור טרוד חם או קר.
פליז – לייצור מוטות נטולי קורוזיה לשימושים הנדסיים.
נחושת – לייצור חוטי חשמל, צינורות ושפופרות.
עופרת, בדיל, אבץ, טיטניום ומגנזיום גם הן משמשות לייצור חלקים שונים בטרוד.
שימושים נפוצים הם ליצירת מסילות, מסגרות, צינורות, מוטות ושילבים מקדימים בייצור חוטי חשמל.

2.3.2. שימוש בחומרי סיכה

החיכוך הינו מרכיב משמעותי בכוח הדרוש לביצוע תהליך הטרוד. יש חיכוך בין הגלם לקונטיינר, כאשר חיכוך זה נגרם כתוצאה מהלחץ ההידרוסטטי שמפעיל המטיל בתוך הקונטיינר כתוצאה מכך שהמטיל נלחץ ע"י ה Ram ומתנפח. כוח חיכוך זה הולך ויורד עם התקדמות תהליך הטרוד, עקב התקצרות המטיל עד סיום המטיל. חיכוך נוסף מתרחש בטבע, שם מתחכך החומר בתהליך ההחלקה לעבר המפתח (הבירינג) והחיכוך העיקרי מתרחש בתוך הבירינג שם מעוצב החומר לכדי מוצר סופי. שימוש בחומרי סיכה חיוני על מנת להקטין את החיכוך ובכך לשפר את זרימת החומר ולהקטין את הכוחות הנדרשים לביצוע הטרוד.
בדרך כלל סגסוגות אלומיניום ומגנזיום עוברות טרוד ללא שימוש בחומרי סיכה, היות והפרופילים המטרודים הינם מוצר חצי סופי ויש ליישם עליהם ציפוי או צבע. חומרי הסיכה נוטים לחדור לפני השטח, דבר שהיה מצריך פעולה נוספת שמטרתה להסיר שכבה בה יש שאריות של חומר סיכה. אולם קבוצה נרחבת של חומרים כגון סגסוגות נחושת, טיטניום ועוברות טרוד תוך שימוש במגוון חומרי סיכה מבוססי גרפיט, מוליבדניום דיסולפיד וזכוכית. בדרך כלל בשמני גירוז מסחריים, נעשה שימוש באמולסיית גרפיט (תרחיף של אבקה במים) אשר פרט להורדת החיכוך גם מגנה על הטבעים מחמצון ואולם לגרפיט יש נטיה להתלקח בטמפרטורות גבוהות ולכן אינו עמיד לאורך זמן. סיכה ע"י אבקת זכוכית מבוצעת כאשר בתהליך ציפוי בזכוכית, הגלם מחומם ומגולגל על מצע של שברי זכוכית או מותז באבקת זכוכית על מנת להעניק לגלם שכבת זכוכית דקה. כחומר סיכה, לזכוכית יש יכולת מיוחדת; להתרכך באופן סלקטיבי במגע עם הגלם החם ופרט להורדת מקדם החיכוך, ליצור בידוד תרמי בין הגלם לקונטיינר. בדרך זו נמנע גם איבוד חום חיוני בתהליך הטרוד. הבחירה בין שמני גירוז מבוססי גרפיט לבין מוליבדניום דיסולפיד וזכוכית מבוססת בעיקר על טמפרטורת התהליך.
בטמפרטורות נמוכות, הסיכוך נעשה בעיקר כדי למנוע חיכוך. בטמפרטורות ביניים ישנה גם הפרדה מסוימת בין הגלם לכלים בשימוש בחומרי סיכה בנוסף לתוצרי לוואי של חומרי סיכה חצי מותכים. בטמפרטורות גבוהות יש חשיבות גם לבידוד התרמי של.

2.3.3. חישוב כוח הטרוד

הכוח הינו הכוח הכללי הנדרש לביצוע הטרוד והוא מורכב מהכוחות הבאים:

$$P = P_{fd} + P_{fc} + P_{dh} + P_{ds}$$

כאשר:

- P_{fd} - הוא כוח הדרוש כדי להתגבר על כוחות החיכוך הנוצרים בטבע.
 - P_{fc} - הוא הכוח הדרוש כדי להתגבר על כוחות החיכוך הנוצרים על פני שטח הקונטיינר.
 - P_{dh} - הכוח הדרוש על מנת לקבל דפורמציה הומוגנית בעובד (הזרימה בקונטיינר ואל הטבע).
 - P_{ds} - הכוח הדרוש לגזירה בעובד כתוצאה מדפורמציה לא הומוגנית (בתוך הטבע).
- ניתן לחשב באופן די מדויק את הכוח הדרוש לטרוד (ישיר), כאשר הנוסחה המפרידת בבסיסה היא:

$$P = A_o \bar{\sigma}_{ave} \left[\ln R + \frac{2}{3} \alpha + \frac{2 \ln R \mu}{\sin 2\alpha} \right] + \pi d l \bar{\sigma}_o \mu$$

$\left[\frac{Kg}{mm^2} \right]$ מאמץ זרימה ממוצע של החומר
 $\left[\frac{Kg}{mm^2} \right]$ מאמץ זרימה של החומר
 $\left[mm^2 \right]$ שטח חתך של הקונטיינר
 $R = \frac{A_o}{A_f} = \frac{D_o^2}{d^2}$ יחס הרדוקציה
 $\left[rad \right]$ זווית הכניסה לטבע
 $\left[mm \right]$ קוטר הבירינג
 $\left[mm \right]$ אורך הבירינג

כאשר:

- $\bar{\sigma}_0$ - מאמץ הכניעה $[Kg/mm^2]$.
- $\bar{\sigma}_{AV} = \bar{\sigma}_0$ - מאמץ הזרימה (Flow Stress) הממוצע לחומר העובר הקשיית מעוותים $[Kg/mm^2]$.
- $R = \frac{A_0}{A_f} = \frac{D^2}{d^2}$ - יחס הרדוקציה בין שטח החתך ההתחלתי לסופי – ערך חסר יחידות.
- μ - מקדם החיכוך.
- D, l, d - קוטר הברניג $[mm]$, אורך הברניג $[mm]$, הקוטר הפנימי של הקונטיינר $[14mm]$.
- α - זווית הכניסה $[rad]$ $\alpha = 1/2$ זווית הטבע. שים לב שגורם השלישי במשוואה 1 הממונה על חיכוך בכניסה לכן בזווית גדולות 180° כשאין חיכוך בכניסה הוא שווה לאפס.

קוטר הבוכנה של מכבש הוא $100mm$. ניתן לחשב יחס בין לחץ הידראולי ובין כוח טרוד $1bar = 80.1Kg$.
מאמץ הזרימה לצורך החישובים בטמפרטורה $450^\circ C$ הינו $9.4Kg/mm^2$ והחיכוך $\mu = 0.3$
ובטמפרטורה $250^\circ C$ $26Kg/mm^2$, החיכוך $\mu = 0.2$

2.3.4. יתרונות וחסרונות התהליך

א. יתרונות התהליך

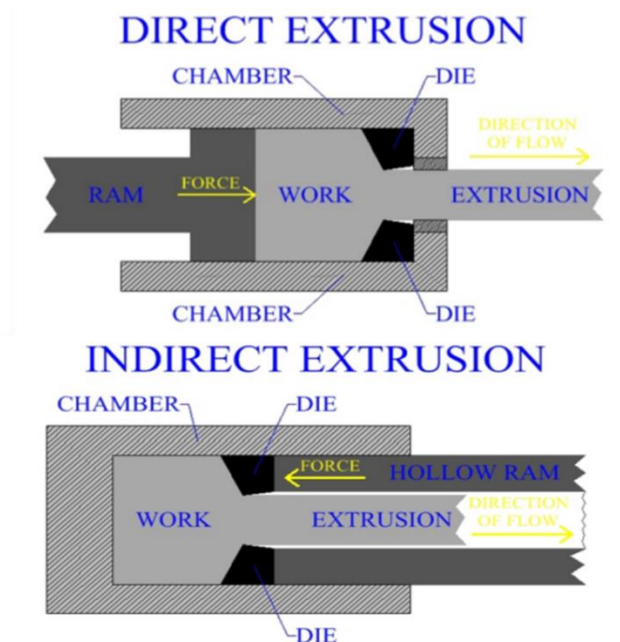
1. ניתן לייצר מוצרים ארוכים ואחידים
2. תנובת ייצור גבוהה (פחת נמוך וניתן למיחזור)
3. התהליך הדיר (מוצרים זהים)
4. דורש מעט כ"א
5. אינו מוגבל גאומטרית
6. משפר מיקרומבנה ע"י דפורמציה מסיבית (משמש גם כתהליך עיצוב ראשוני)
7. מאפשר שליטה על מצב המטלורגי של המוצר (המסה ע"י קירור ביציאה מהטבע)

ב. חסרונות התהליך

1. נדרש ציוד יקר
2. צריכת אנרגיה גבוהה בתהליך (חימום כלים וחומרים)
3. איזור התפר מחליש את הפרופיל \ צינור
4. תהליך המתיחה משפיע על תכונות מכאניות ועל ממדים סופיים (עובי)
5. כלים יקרים (טבע עולה כ- \$2000)
6. יוצר כיוונויות מועדפת בחומר

2.4. טרוד ישיר ולא ישיר

- א. **טרוד ישיר (Direct extrusion)** - הפרופיל המטרוד יוצא מהטבע בכיוון תנועת המקב הנדחף ע"י Ram. כוח הטרוד מתואר ע"י המשוואה למעלה וכולל את 4 המרכיבים שצוינו לעיל. הייתרון העיקרי של שיטה זו על פני הטרוד הלא ישיר הוא הכך שאין מגבלה לאורך הפרופיל (ניתן לטרד מטיל אחר מטיל).
- ב. **טרוד לא ישיר (Indirect extrusion)** - בשיטה זו, ה-Ram חלול ונקרא Stem והפרופיל המטרוד יצא מהטבע אחורה לתוך ה-Stem. הייתרון העיקרי של שיטה זו על פני טרוד ישיר הוא בכך שאין חיכוך בקונטיינר.



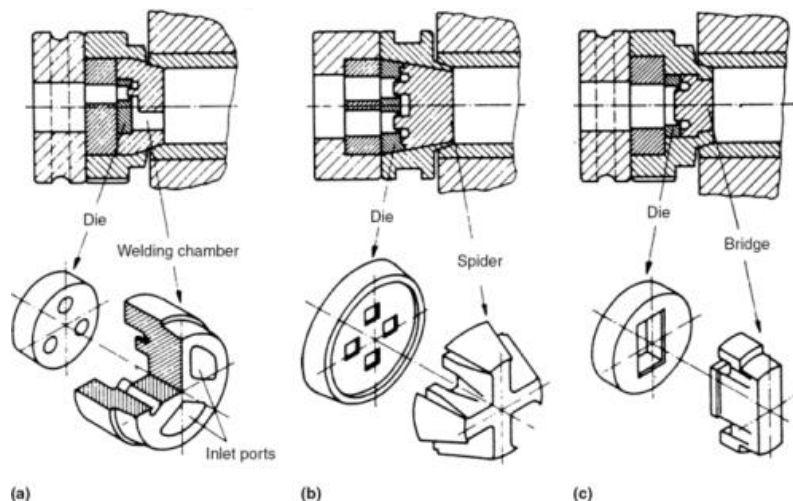
איור 2: סכמה עקרונית של תהליך טרוד ישיר ולא ישיר

2.5. טרוד צינורות

ישנן מספר דרכים לייצור צינורות או פרופילים חלולים בטרוד (Tube Extrusion): צינור עם תפר (לא ריתוך) תוך שימוש בטבע גשר מסוג Bridge die וטרוד צינור ללא תפר תוך שימוש במנדל Mandrel. שני התהליכים האלו ניתנים לביצוע הן בטרוד ישיר והן בטרוד לא ישיר.

א. טרוד צינורות עם תפר (bridge die)

בשיטה זו מייצרים צינורות ע"י תהליך המפריד את החומר למספר זרמים (בחלק הקדמי של הטבע) ומאחד אותם לצינור, תוך שימוש במנדל קצר, קבוע בתוך הטבע (מוט פלדה קשיח) היוצר את החלל בצינור, בחלק האחורי של הטבע. הפרדות החומר לזרמים והתאחדותו חזרה בדיפוזיה אפשרית היות בתוך הטבע קיימים לחצים גבוהים, טמפרטורה גבוהה ואין חמצן. החיבור של הזרמים ליצירת מוצר שלם נקראת Kiss bond. השיטה מתאימה במיוחד לייצור צינורות ארוכים, שאינם נדרשים לעמוד בלחצים גבוהים (יותר קונסטרוקטיביים) ולחומרים בעלי טמפרטורות טרוד נורמליות כגון סגסוגות אלומיניום ומגנזיום. הקניית החלל הפנימי של הצינור מתאפשרת הודות לתמיכה של המנדל הנישא על ידי מספר זרועות הנקראות "גשרים" ולכן שמו Bridge die.

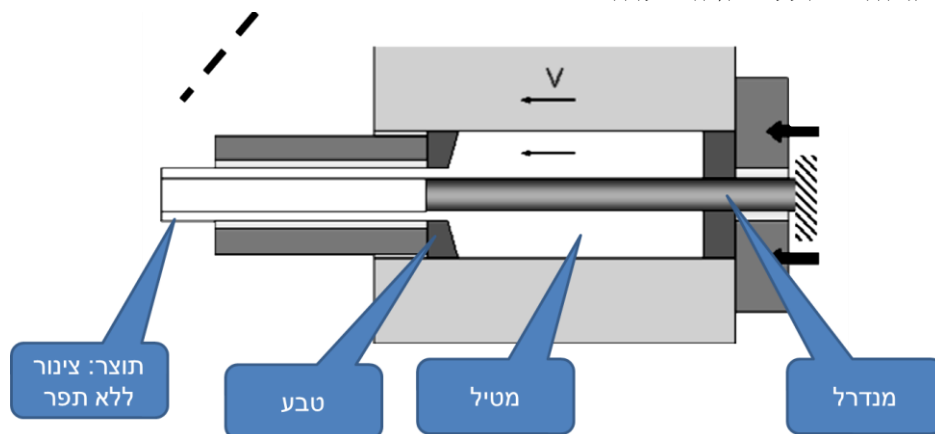


איור 3 - טבעים שונים לטרוד פרופילים חלולים בשיטת bridge die

ב. טרוד צינורות ללא תפר (Mandrel)

בשיטה זו מייצרים צינורות ופרופילים חלולים ע"י תהליך בו הגלם מוכן לטרוד עם קדח במרכזו, קדח בו ממוקם מנדל. המנדל יכול להיות צף, כלומר ארוך ומתקדם עם מהלך הטרוד, או מנדל קבוע Stationary אשר מקובע למקב ונע במהירות של המקב. במקרה של מנדל קבוע, נוצר חיכוך בין הצינור

המטורדלמנדרל עקב הפרש המהירויות בין הצינור המטורדל למהירות ה-RAM. הפרש זה הינו יחס הרדוקציה. במנדרל צף, קל יותר לשמור על עובי דופן צינור אחיד, עקב כך שהפרשים בעובי הדופן גורמים להפרשי מהירויות ולכן הפרשי לחצים בין הטבע לבין המנדרל, הגורמים למירכוזהמנדרל מחדש. שיטה זו ניתנת לביצוע בטרוד ישיר או לא ישיר והיא נפוצה במקרים בהם נדרש לטרוד צינורות לעבורה בלחצים גבוהים כולל צינורות פלדה.



איור 4 - תהליך לטרוד פרופילסחלוליםבשיטתMandrel בטרוד לא ישיר

2.6. טיפולים תרמיים מקדימים ועוקבים

2.6.1. תהליכים מקדימים

יש צורך בתהליכים מקדימים לחומר הגלם (המטיל) לפני שהוא עובר תהליך טרוד, היות וכאשר יוצקים את המטילים יש סגרגציה מיקרו ומקרו של המסגסים. כדי להקטין את סגרגציית המיקרו נדרש לבצע טיפול הומוגניזציה בטמפרטורה גבוהה ולזמנים ארוכים יחסית. כדי לשפר את סגרגציית המקרו וכדי לקצר את תהליך ההומוגניזציה, נדרשת דפורמציה. ניתן לבצע זאת ע"י טרוד ראשוני (במכשיר טרוד גדולים) או על ידי חישול ראשוני של הגלם. יציקה המטילים ביציקה מתמשכת מקטינה את סגרגציה המקרו באופן משמעותי.

לאחר היציקה, פני השטח של חומר הגלם עלולים להיות מזוהמים בתחמוצות ולכלוכים (scale) ובכדי שלא יכנסו מזוהמים למכונת הטרוד והמוצר שיתקבל יהיה מלא במזהמים, יש להסיר את ה-scale על ידי עיבוד שבבי ראשוני של המטיל. תהליך זה נקרא Peeling.

על המטיל להיות באורך המתאים למכשיר הטרוד (אורך הקונטיינר) ולכן יש צורך לחתוך את הגלם לגודל מתאים (Billet). החיתוך מבוצע בד"כ ע"י מערכת גזירה, אשר חותכת את המטיל ללא עיבוד שבבי, לפני כניסתו לקונטיינר לטרוד.

הגלמים המשמשים במעבדה עברו טרוד חם ורקריסטליזציה דינאמית. מסיבה זו יש להם גרעינים קטנים ומאמצים שארתיים (קירור מהיר יחסית). כדי לייצב את המבנה (להשלים את הרקריסטליזציה) וכדי להקטין מאמצים שארתיים יש לבצע טיפול הרפייה Annealing כאשר עבור כל הנתכים הטיפול 350 מ"צ למשך 30 דקות (שהייה בטמפרטורה) זה הטיפול המתאים.

בטרוד חם יש לחמם את המטיל לטמפרטורת הטרוד לפני טרוד. משתמשים בד"כ בתנור מבערי גז התנגדות או אינדוקציה הצמוד למכשיר הטרוד המחמם את כל המטיל. בגמר טרוד מטיל, גלם נוסףיוצא בטמפרטורה הרצויה מהתנור ומוזן ישירות לקונטיינר על מנת ליצור את רציפות התהליך (billet-to-billet).

בטרוד חם נדרש שימוש בחומרי סיכה כגון גרפיט או מוליבדניום בי סולפיט ובמקרים מסוימים סיכון באמצעות אבקת זכוכית. חומרי הסיכה מיושמים לאחר החימום, בד"כ הסיכה מתבצעת על הכלים ורק במקרה של אבקת זכוכית הם מיושמים על המטיל.

2.6.2. תהליכים עוקבים

מיד לאחר הטרוד, עם יציאת הפרופיל מהטבע, יש לקררו. בד"כ הקרור טבעי יחד עם זאת, במקרים בהם הנתך הינו בר זיקון, אזי יש לקררו בקירור מאולץ, כדי להשלים את תהליך ההמסה והחיסוס. את הפרופילים מקררים ע"י זרם אוויר קר, ע"י ערפל מים או ממש ע"י התזת מים, תלוי בעובי הפרופיל והקושי לקררו.

כתוצאה משימוש בחומרי בסיכה לצורך הקטנת החיכוך בתהליך כגון שמנים שונים, גריז, גרפיט, לעתים יש לנקות את המוצר הסופי או הכמעט סופי על ידי תמיסות שונות או מים ולפעמים ליטוש או עיבוד שבבי.

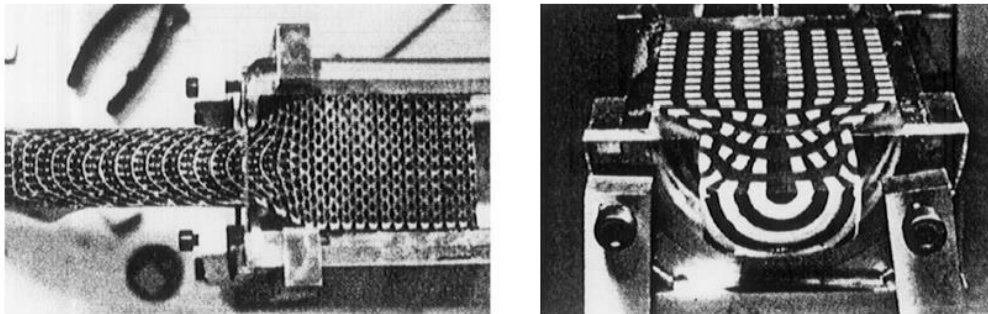
טיפול תרמי של זיקון מבוצע לנתכים הנענים לזיקון, בתנורים ארוכים בעלי בקרת טמפרטורה מיוצבת, זאת היות ובתהליך זיקון יש השפעה גדולה לערך הטמפרטורה וסטייה של מספר מעלות עלולה לגרום לתהליך זיקון לא רצוי. הפרופילים מוכנסים לתנור בקבוצות על גבי עגלות ומבצעים טיפול זיקון על פי מפרט מדויק המוגדר במטרה להשיג תכונות מכאניות ספציפיות שהוגדרו ע"י הלקוח.

2.7. השפעת תהליך הטרוד על החומר

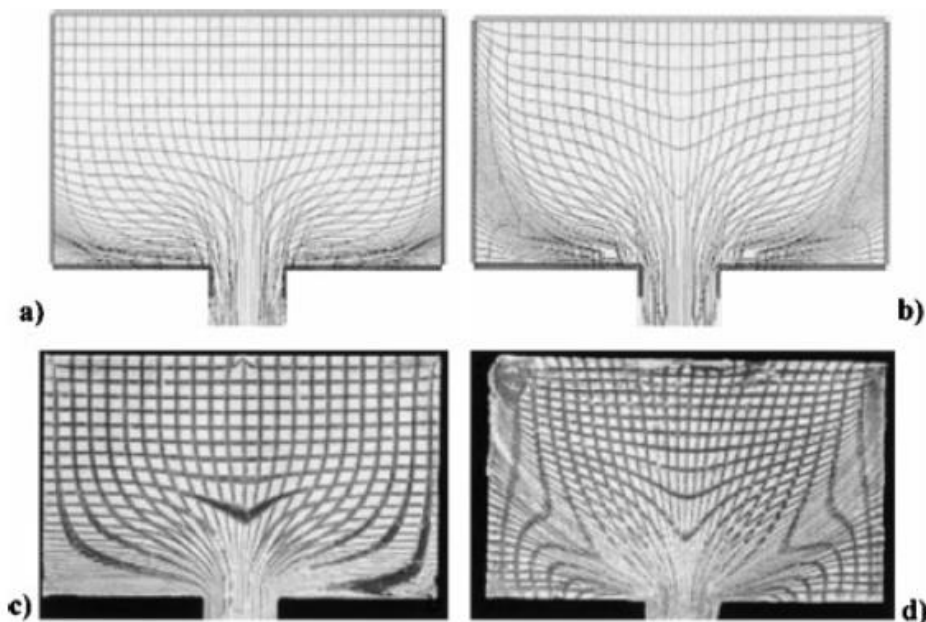
המעבר מחומר גלם (Billet) בעל שטח חתך מסויים, לצורת פרופיל, בעל שטח חתך אחר (בהתאם ליחס הרדוקציה) יוצא דפורמציה משמעותית, אך לא אחידה בחתך הפרופיל. הדפורמציה משמשת ככוח מניע לתהליכי רקריסטליזציה, חלקם מתרחשים תוך כדי התהליך (רקריסטליזציה דינאמית) (DRX) וחלקם לאחר סיום תהליך הטרוד. אנרגיה אצורה בחומר, כתוצאה מדפורמציה זו משמשת כוח מניע לתהליכי רקריסטליזציה המבוצעים בטיפול תרמיים לאחר הטרוד. השיפור במיקרומבנה כתוצאה מתהליך זה, בא לידי ביטוי בהקטנת גודל גרעינים וכתוצאה מכך לשיפור בחוזק וגם לשיפור בהומוגניות המיקרומבנה ובהשגת איזוטרופיה בתכונות המכאניות.

א. השפעת הדפורמציה

התפלגות המעוותים ניתנת לאפיון ולמדידה ע"י מודלים אמפיריים בשעווה או פלסטלינה (ראה איור 5), אך כיום מקובל לבצע מודלים נומריים של תהליך הטרוד, באמצעותם ניתן לבצע סימולציות נומריות המתארות בדיוק את התפלגות המעוותים, את מהירות הזרימה בטבע, את הכוחות הפועלים על הגלם והכלים וכל זאת, תוך צימוד בין התכונות הפיזיקאליות השונות כמו מאמץ הזרימה, חיכוך וטמפרטורה (ראה איור 6).



איור 5 – מדידת התפלגות המעוותים בטרוד, באמצעות דגם שעווה



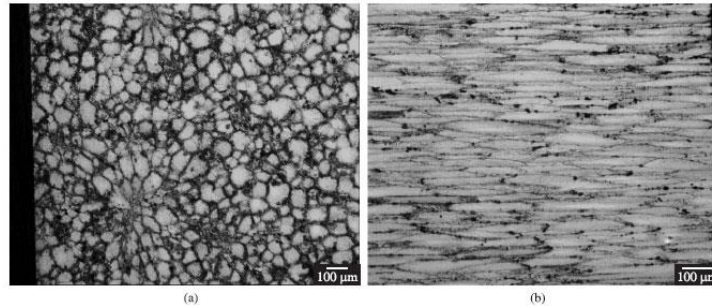
איור 6 – מודל נומרי של טרוד בטמפרטורה 300 מ"צ (a) ו- 450 מ"צ (b)

בהשוואה למדידות מניסוי טרוד בטמפרטורה 300 מ"צ (c) ו- 450 מ"צ (d)

ב. השפעה על המיקרומבנה

טרוד מתחת לטמפרטורת הגיבוש מחדש של גרעינים יוביל להקשיה על ידי עיבוד בקור. הגרעינים של החומר "יסודרו" כך שיהיו מסובבים לאותו כיוון (כיווניות מועדפת) ויתקבל חומר אנאיזוטרופי בעל תכונות מסוימות בכיוון אחד ותכונות אחרות בכיוון אחר. ניתן לבצע טיפול תרמי לריקיסטליזציה של הגרעינים ובכך לקבל איזוטרופיה בתכונות.

בטרוד חם ישנה גם ריקיסטליזציה דינמית (DRX) של הגרעינים כיוון שיש דפורמציה וטמפרטורה גבוהה מספיק (כלומר אנרגיית חום) תוך כדי התהליך עצמו.



איור 7 – מיקרומבנה של חומר לאחר טרוד (b) ולאחר טיפול תרמי (a)

3. חומרים, טבעים ופרמטרים לניסויי המעבדה

3.1. חומרים לניסוי

א. מגנזיום ZM21 מטורד בחם

ב. מגנזיום AZ61 מטורד בחם

ג. אלומיניום 6063 מטורד בחם

3.2. פרמטרים שיבחנו (בכל מעבדה – פרמטר אחד)

א. יחס רדוקציה (עובי דופן הצינור או קוטר המוט המטורדים)

ב. אורך בירינג

ג. זווית הכניסה לטבע

ד. מאמץ הזרימה F.S. (טמפרטורת המטיל)

ה. קצב טרוד (ראה נספח א')

מספר טבע	קוטר מ"מ	זווית כניסה	אורך בירינג	רדיוס	מטרת הניסוי
1	3	45	1.5	0.2	הדגמת השפעת יחס הרדוקציה (בהשוואה לטבעים 2,3)
2	4.5	45	1.5	0.2	הדגמת השפעת יחס רדוקציה וזווית הכניסה
3	6	45	1.5	0.2	הדגמת השפעת קוטר הטרוד וטרוד צינורות
4	4.5	60	1.5	-	הדגמת השפעת זווית הכניסה (בהשוואה לטבעים 2,9)
5	4.5	R=5 רדיוס מלא	1.5	-	הדגמת השפעת זווית הכניסה/רדיוס כניסה
6	4.5	45	3	0.2	הדגמת השפעת אורך הבירינג (בהשוואה לטבעים 2,7)
7	4.5	45	6	0.2	הדגמת השפעת אורך הבירינג
8	3	ישרה Flat	1.5	0.2	הדגמת השפעת יחס הרדוקציה (בהשוואה לטבעים 9,10)
9	4.5	ישרה Flat	1.5	0.2	הדגמת השפעת זווית הכניסה
10	6	ישרה Flat	1.5	0.2	הדגמת השפעת זווית הכניסה
11	6X2	0.5	2	0.2	משמש גם להשפעת הטמפרטורה לטרוד פח (סרט) בעובי 2 מ"מ ורוחב 6 מ"מ
מספר מנדל	קוטר מ"מ	זוויתבסיס	אורךמנדל	רדיוס	מטרתהניסוי
2	2	45	20	שטוח	טרוד צינור ללא תפר בעובי דופן 2 מ"מ
3	3	45	20	שטוח	טרוד צינור ללא תפר בעובי דופן 1.5 מ"מ
4	4	45	20	שטוח	טרוד צינור ללא תפר בעובי דופן 1 מ"מ

טבלה 1: מפרט טכני של הטבעים

הערות:

- בכלהטבעים יש זווית שחרור 15 מעלות
- מנדלים בקוטר: 2,3,4 מ"מ - יעבדו רק עם טבע 3 (טבע בקוטר 6 מ"מ).
- כל הכלים עברו חיסום והרפיה לקושי 45R.C. וניטרציה, כמקובל.

בכל ניסוי ייבחן פרמטר אחד שיוגדר ע"י מדריך המעבדה.

כדי לבודד פרמטרים, כל ייתר המשתנים יישארו קבועים.

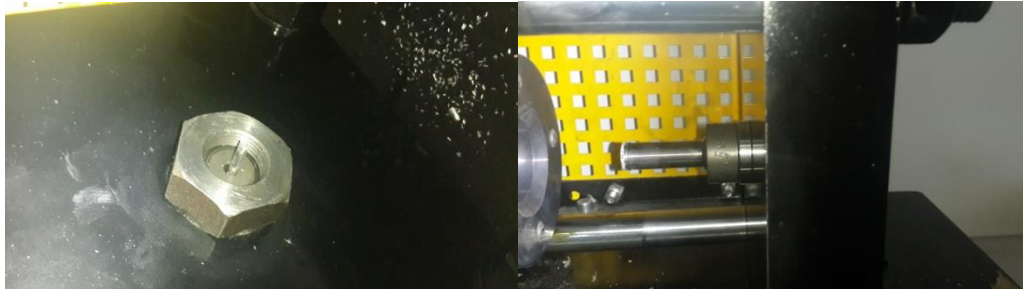
4. סדר הפעולות בביצוע תהליך טרוד במכש הטרוד המעבדתי (Micro-press)

4.1. הכנת המכש

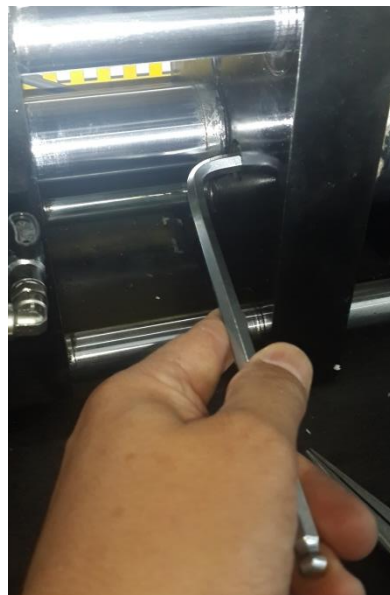
- א. יש להרכיב את ה-Stem המתאים לפי תכנית הניסוי ולהכין סט טבעים לפי הפרמטר של הניסוי. יש להרכיב את הטבעת המבריקה על ה-Stem לפני הכנסה למכש (איור 9).
- ב. יש להרכיב את המנדרל המתאים לפי תכנית הניסוי (במידה ומתכננים לטרוד צינור).
- ג. יש להשאיר את הפקק האוניברסאלי המורכב בקונטיינר.



איור 8: מנדרל (מימין) ו-Stem (משמאל)
הערה: יש להיעזר בטכנאי המעבדה לביצוע פעולות אלו. רצוי לבצע זאת כשהמכש קר, אך ניתן להחליף Stem גם כשהמכש חם (תוך שימוש בכפפות).



איור 9: Stem מורכב במכש (מימין) האוס באמצעותו משחררים את ה-Stem.



איור 10: שימוש במפתח אלן לפרוק הקונטיינר (להחלפת מנדרל בלבד)

ד. לאחר הרכבת הכלים יש לפתוח את ברז האוויר (האוויר משמש לקירור הקונטיינר)



איור 11: ברז האוויר (במצב סגור)

הערה: שימו לב לצינור הכחול עם ידית ההתזה. ידית זו נועדה לקירור חלקים ולניקוי המכשיר וסביבתו במהלך ובסיום העבודה.

ה. יש להפעיל את המנדף (מערכת יניקת האוויר) כדי לפנות גזים וריחות מהמעבדה. יש לוודא שהמנדף עובד ע"י קרוב דף נייר לפתח היניקה.



איור 12: מפסק הפעלת המנדף אוויר

ו. חיבור המכשיר לחשמל. העבר את המפסק למצב On.



איור 13: מפסק החשמל הראשי

ז. חיבור המחשב למכשיר: וודא כי כבל הנתונים (USB) מחובר וכי המחשב דלוק.

4.2. הכנת חומרי הגלם לטרוד

ישנם 4 סוגי גלמים לטרוד:

א. אלומיניום מלא (לטרוד מוט)

ב. אלומיניום חלול (לטרוד צינור)

ג. מגנזיום מלא (לטרוד מוט)

ד. מגנזיום חלול (לטרוד צינור)

זהה את הגלם, תן לו מספר מזהה חד ערכי. הכן וסדר את הגלמים בהתאם לתכנית הניסוי. הכן פתקים כדי לסמן את הטרודים לאחר יציאתם מהמכש.



איור 14: גלם טרוד לפני ואחרי טרוד

ה. בצע בדיקות קשיות ומטלוגרפיה לדגם מייצג (וודא שכל הדגמים מאותה סדרה).

ו. לניסויי טרוד בטמפרטורת החדר יש לקחת גלמים לאחר Annealing.

4.3. קביעת הפרמטרים לטרוד

קבע את הפרמטרים לניסוי על גבי מסך הבקר (איור 15, 16) בהתאם לתכנית הניסוי.

שים לב: הערכים מצד ימין של המסך (אדום) הם הערכים המתוכננים (Set Point)

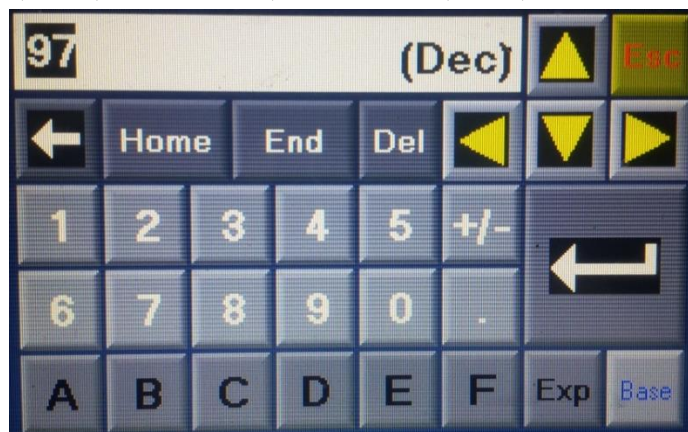
הערכים מצד שמאל של המסך (ירוק) הם הערכים בפועל והם ישתנו במהלך הניסוי.

אוגר הנתונים יאגור את הנתונים לניסוי בודד בזיכרון של הבקר.

הערה: טמפרטורת מטילים (Billet temperature) יש להציב 540 עקב תקלה.

ACTUAL		SET-POINT	
RAM PRESSURE	2 bar	MAX PRESSURE	175 bar
RAM POSITION	91 mm	RAM MAX POSITION	97 mm
RAM SPEED	0 mm/sec	RAM MIN POSITION	1 mm
CONTAINER TEMP	396 °C	CONTAINER SETPOINT	400 °C
BILLET TEMP	400 °C	BILLET SETPOINT	400 °C

איור 15: מסך הבקרה של תהליך הטרוד (מסך הבקר המתוכנת PLC)



איור 16: מסך הכנסת הנתונים לבקר המתוכנת PLC

כדי לשנות ערך יש ללחוץ על הלחצן הצהוב המתאים (SP), לשנות את הערך בשדה הזנת הערך החדש ולהקיש Enter  מחיקת ערך מבוצעת ע"י Esc.

א. לחץ מקסימאלי (Max pressure) – 175bar **לא לשנות**.

ב. מהלך מקסימאלי של האיל (Ram max position) – 97 מ"מ ניתן לשנות כדי לבצע Interrupted test בו רוצים שלא כל המטיל יטורד, ניתן לקבוע Ram max position 85 במקום 97. **לא לשכוח להחזיר אחרי הניסוי ל-97 מ"מ.**

ג. מהלך מינימאלי של האיל (Ram min position) – 1 מ"מ **לא לשנות**.

ד. טמפרטורת הקונטיינר (Container setpoint) – לפי הניסוי (מקסימום 500 מ"צ)

ה. טמפרטורת התנור גלמים (Billet setpoint) – לפי הניסוי (מקסימום 450 מ"צ)

בגלל סטייה בבקרת הטמפרטורה של הגלמים. יש להזין בבקר ערך כזה שייתן את הטמפרטורה הרצויה בגלם. מה שחשוב זו טמפרטורת הגלם הרצויה.

ו. מהירות הכבישה נשלטת ע"י הספיקה של השמן וזה נקבע ידנית ע"י שסתום "ווסת הספיקה" (ראה איור 9). עקום כיוול מהירות הטרוד כתלות בווסת הספיקה, בסוף הדוח.

ז. יש לוודא כי הלחץ המקסימאלי לא עבר את 175 ומהלך ה Ram מינימום 1 ומקסימום 97. **לעולם לא לקבוע ערך Ram min position – "0" זה עלול לגרום נזק.**

4.4 הכנת המכשש לטרוד

א. לחץ 3 שניות על כפתור Reset במטרה לאפס את הזיכרון

- יידלק אור כתום קבוע ולאחר מספר שניות ייכבה.
- במידה ואין תקשורת, או הודעת שגיאה: כבה את המכשש (מכשש לא מחשב) והדלק חזרה לאיפוס הבקר. יש לוודא שהנתונים שהוזנו למסך נשמרו.
- ב. וודא שהטבעים הנכונים, הגלמים (מהחומר הנכון) והמנדרל מותקנים.
- ג. וודא שהחשמל דלוק (מסך ומנורות דולקים).
- ד. וודא כי כפתור החרום האדום משוחרר (1/2 סיבוב ימינה).
- ה. וודא שהאוויר זורם (שומעים). שימו לב שיש טיימר לאוויר. יש לדרוך את הטיימר.
- ו. וודא שהנתונים של הניסוי מוזנים במסך הפרמטרים (Set point)
- ז. הנע את המכשש קדימה, כך שהטבע (Stem) יהיה בתוך הקונטיינר כדי שיתחמם אבל לא עד הסוף. עדיף ללכת עד הסוף ולחזור מספק מילימטרים כדי שלא ייתפש.
- **שימו לב. אם מכסה המכשש (הצהוב) פתוח, המכשש לא ינוע משיקולי בטיחות.**
- ח. הדלק את מפסק החימום של הקונטיינר (Container heat).
- ט. הדלק את מפסק החימום של תנור הגלמים (Billet heat).
- שים לב כי האור במפסק ההפעלה דולק כאשר גוף החימום בפעולה. כאשר התנור או הקונטיינר יגיעו לטמפרטורה הרצויה, ייכבה גוף החימום ע"י הבקר ולכן המנורה תכבה. עם התקררות, יידלק שוב גוף החימום כדי לשמור על טמפרטורה יציבה סביב הערך שנקבע לניסוי. **במידה וטמפרטורת הגלם לא מגיעה לערך הרצוי, העלה את הטמפרטורה בבקר עד שיתקבל הערך הרצוי.**
- שים לב כי במידה והמכשש לא מופעל במשך דקה רצופה המנוע עוצר.
- י. במידה ולפי התכנית ניסוי יש לגרז את הטבעים/קונטיינר, רצוי לעשות זאת כשהם קרים. לאחר טרוד, יש לשקול לחדש את הגירוז. בכל מקרה, יש להשתמש בכמות קטנה מאוד של גריז/ ספריי Mo₂S.

יא. לאחר שתנור הגלמים הגיע לטמפרטורה הרצויה, הכנס הגלמים לתנור הגלמים והמתן 15 דקות עד שיגיעו לטמפרטורת הטרוד. רצוי להכניס 3 דגמים (לפי תכנית הטרוד) ואז ממתנינים לראשון ואת האחרים עושים מייד אחריו ללא הפסקה.

4.5. ביצוע הטרוד

א. הפעל את מנוע המשאבה Motor on והעבר כפתור הפעלה לידני Man.

ב. וודא שהטמפרטורה בקונטיינר ובתנור גלמים הגיע לנדרש.

ג. לאחר הגעת תנור הגלמים לטמפרטורה יש להכניס את הגלמים לתנור.

המתן 15 דקות כשהגלמים בתנור לחימום הגלמים בטמפרטורה הרצויה.

ד. במידה וה-Stem חדש (קר) יש לוודא כי שהה לפחות 15 דקות בתוך הקונטיינר החם.

ה. הזז את ה-Ram אחורה BW עד הסוף (עד עצירה).

ו. לוודא ש-Ram position (במסך השמאלי) על-1.

ז. וודא שווסת המהירות על 17 (סגירה עד הסוף ופתיחה עד ה-7 הראשון)

ח. לבש כפפות חום והכן כלים לעבודה בחם.

ט. פתח את המגן הצהוב של המכש והעבר לטרוד אוטומטי Auto.

י. הכנס מטיל לתוך הקונטיינר באמצעות כלים וסגור את המגן הצהוב.

יא. בצע Reset

יב. בצע טרוד אוטומטי Start auto.

יג. המכש יסיים את הטרוד עד הסוף ויחזור אחורה אוטומטית לנקודת ההתחלה.

- במידה והמכש לא חזר לבד. יש לעבור לידני ולהחזיר אותו אחורה ידנית.

יד. במידה ויש עוד טרודים, המשך בביצוע טרודים. להחלפת STEM הזז את המכש

קדימה עד הסוף (כדי ללחוץ על ה-STEM) ופתח את האום באמצעות המפתח הגדול. הזז

את ה-STEM אחורה עד הסוף ובאמצעות כפת חום, הוצא את ה-STEM. כעת הכנס

STEM חדש (שים לב שמולבשת עליו טבעת מרווח). הדק את האום באמצעות המפתח.

- לא לשכוח בין טרוד לטרוד להוריד את הנתונים למחשב ולאפס את הבקר.

טו. במידה וזה הטרוד האחרון לסבב זה, העבר לידני והזז את המכש אחורה, כדי

לקרר את ה-Stem ולמנוע הדבקות.

4.6. לאחר הטרוד

א. חילוץ הטרוד יבוצע ע"י חיתוך בקטר הגדול.

ב. במקרה של Interrupted test ניתן לדפוק על קצה הטרוד ולשלוח את שארית המטיל

ג. העברת הנתונים למחשב

1) אסור ללחוץ Reset בשלב זה היות והנתונים בבקר המכש ימחקו.

2) אסור לטרד שוב, היות וטרוד נוסף "ידרוס" את הנתונים של הטרוד הקודם.

3) במחשב, יש לפתוח את תכנת איסוף הנתונים Data logging1 וללחוץ על האייקון

Run Project או F5.

4) יש ללחוץ על Force call לחידוש הקשר בין הבקר למחשב.



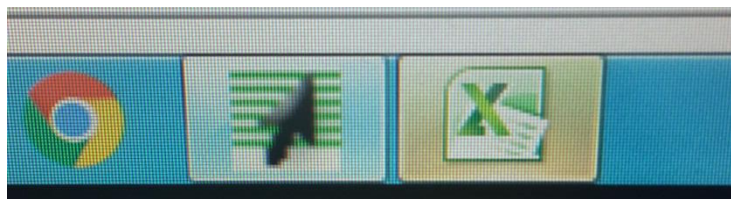
איור 17: קיצור דרך להפעלת תוכנת ייבוא הנתונים

5) יש לבחור את הקובץ של הניסוי האחרון (לפי התאריך והשעה) ולייבא אותו מהבקר הממוחשב (במכש הטרוד) למחשב.

יש לשים לב לסטטוס של הייבוא שיהיה Call succeeded. במידה והסטטוס Call failed אז יש לייבא שוב את הנתונים. יש לבדוק את כבל התקשורת, ייתכן והייתה בעיית תקשורת בין הבקר ומחשב. במידה ועדיין אין תקשורת עם המחשב, יש לכבות את המכש לגמרי (כיבוי חשמל) ולהדליק מחדש. זה מאפס את הבקר שאוגר את הנתונים.

6) בשלב זה (אחרי ייבוא הקובץ) ניתן לסגור את החלונות. פעולה זו אינה מוחקת את הקובץ.

7) כעת פותחים את האקסל Data Xls ולוחצים על האיקון Open project.



איור 18: קיצור דרך לתוכנת הצפייה בקובץ הניסוי

8) בוחרים את Data login 1 ופותחים את הקובץ של הניסוי האחרון.

9) פותחים את דוח האקסל ומקבלים את הנתונים.

10) בשלב זה אפשר להוריד את הנתונים מהמחשב למדיה. ניתן גם לצבור את כל הקבצים של הניסוי ולהוריד הכל בסוף הניסויים. מומלץ לאחר כל ניסוי לשנות את שם הקובץ לשם שיתאר את הניסוי: איזה חומר, איזה טבע, ופרמטרים: טמפרטורה, קצב וכו' אחרת לא תזכרו.

4.7. כיבוי המערכת

א. יש לכבות את גופי החימום של הקונטיינר ושל התנור לחימום גלמים.

ב. יש להניע את המכש לאחר (פתוח) עד הסוף (כדי שיתקרר).

ג. לוודא שווסת המהירות על 17 (לסגור עד הסוף ולפתוח עד ה-7 הראשון)

ד. לכבות את המערכת באמצעות לחצן החרום האדום.

ה. לכבות מתג חשמל ראשי (איור 13).

ו. אין לכבות את האוויר עד להתקררות מוחלטת של המכש (יש לדרוך את 2

הטיימרים של האוויר עד הסוף כדי שיעבדו לזמן מקסימאלי אחרי הניסוי).

4.8. טיפולים תרמיים

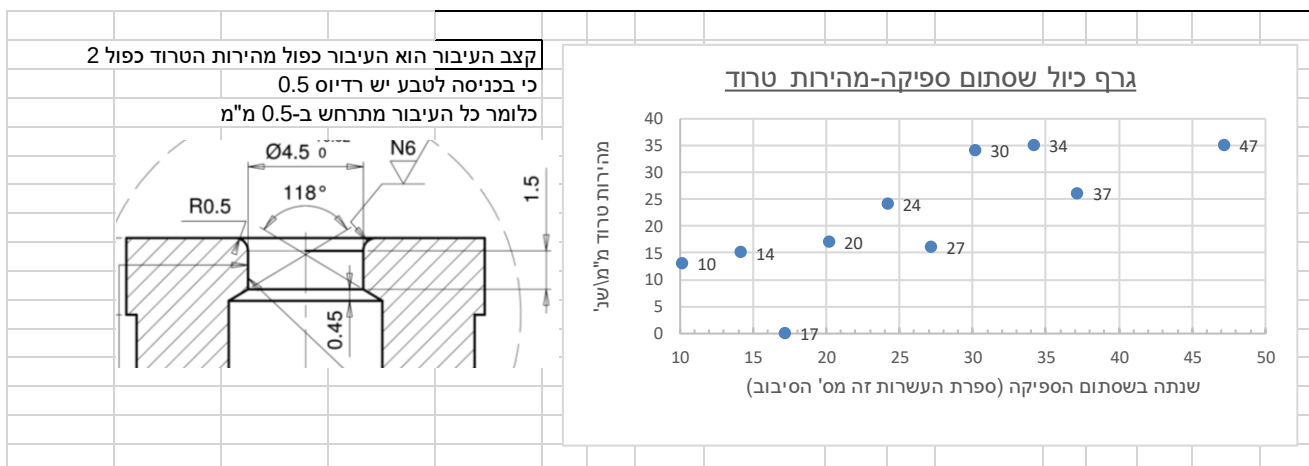
אחת המטרות של המעבדה הינה לבחון את השפעת הדפורמציה על המיקרו מבנה של החומר לאחר הטרוד. המעוותים המוחדרים לחומר כתוצאה מהדפורמציה המסיבית, הינה כוח מניע לרקריסטליזציה.

לאחר הטרוד, יש לבצע טיפול תרמי של הרפיה Annealing אשר יגרום לרקריסטליזציה מלאה בחומר. לאחר מכן, ניתן יהיה לראות את ההבדלים במיקרו מבנה בין חומר הגלם, למוט/צינור המטרוד לאחר טרוד ולבסוף לאחר טרוד וטיפול תרמי. המיקרו מבנה ישפיע כמובן גם על התכונות המכאניות של החומר (קשיות). הרפיה לאלומיניום מבוצעת ב- 350 מ"צ ובמגנזיום ב- 375 מ"צ. את החלקים לטיפול תרמי יש להחזיק בתנור בטמפרטורת הטיפול כ-30 דקות ולקרר מחוץ לתנור באוויר.

נספח א' – ניסויים לבדיקת השפעת קצב העיבור

חישוב קצב העיבור

- (1) מהירות הטרוד הינה מכפלה של מהירות המכש (נמדדת במ"מ/שנ' הנמדדת ע"י המערכת ומופיעה בגרפים) כפול יחס הרדוקציה (המגדיר את מהירות יציאת הטרוד).
- (2) העיבור (הנקי – לא באחוזים).
- (3) הזמן הינו הזמן שבו מתבצע העיבור עצמו. בטבע שטוח זה רדיוס הטבע, בטבע משופע, יש לחשב את המרחק אותו עובר החומר ממצב מטיל ועד למצב מוט מטרוד. זה הזמן.
- (4) כדי לחשב את קצב העיבור יש לכפול את המהירות בעיבור ולחלק בזמן כדי לקבל E 1/sec



- (5) בגרף הכיול רואים את מהירות הטרוד (מהירות תנועת ה-RAM המתקבלת עבור ערכי שסתום ספיקה שונים. ערכים אלו נמדדו בטבע 4.5 בטמפרטורה 400 מ"צ ועלולים להיות קצת שונים בטבעים וטמפרטורות אחרים.

- (6) לשסתום 4 סיבובים. כדי לכוון, יש לסגור את השסתום עד הסוף (כמו שסוגרים ברז) ולפתוח לשנתה הרצויה. המספרים מתחילים מ-7 (כאשר הברז סגור והמכש לא זז) ולכן כדי לא להתבלבל יש לתת מספר מ-17 (השבע בסיבוב הראשון) ועד 16 זה הסיבוב הראשון. ה-7 השני ייקרא 27 וכו'. שימו לב כי ב-7 הספיקה 0 – זה מצב בו הווסת מהירות סגור.
- (7) כדי להבחין בהשפעת קצב העיבור עדיף לעבוד עם טבעים בעלי יחס רדוציה גבוה (טבעים בקוטר 3 מ"מ) ובטמפרטורות גבוהות, שם השפעת קצב העיבור גבוהה. ניתן להשוות בין טרוד בטמפרטורה גבוהה לטמפרטורה נמוכה יותר (450 מ"צ כנגד 250 מ"צ) כדי להדגים את התופעה.

(8) יש לשים לב לא לשכוח בסוף הניסויים לסגור את השסתום עד הסוף ולפתוח חזרה עד

לשנתה 7 הראשונה (17).

5. הנחיות למדריך המעבדה

1. קבוצות המעבדה

מס'	נושא	מוט/צינור	טבעים	מנדרל	מטיל	טמפרטורה	דגשים
1	יחס רדוקציה	מוט	1,2,3	-	מלא	400 מ"צ	מדידת כוח
2	יחס רדוקציה	מוט	8,9,10	-	מלא	400 מ"צ	מדידת כוח
3	זווית הטבע	מוט	2,4,9	-	מלא	400	מדידת כוח
4	אורך בירינג	מוט	2,6,7	-	מלא	400	מדידת כוח ופני שטח
5	מאמץ הזרימה	מוט	10	-	מלא	באלומיניום : חדר, 450, 250 במגנזיום : 400, 300, 200	מדידת כוח הטרוד להשתמש בדגמים שעשו Annealing לפני הטרוד
7	קצב הטרוד AZ61	מוט	1,8	-	מלא	450 מ"צ	3 קצבי טרוד בווסת : 47, 27, 17 מדידת כוח טרוד והתוצרים.
8	Interrupted test	מוט	2,4,9	-	מלא	400 מ"צ לכוון Ram max 85 position	למצוא את זווית הטרוד האופטימלית לפי DMZ וכוח הטרוד
9	טרוד שטוח	סרט (פח)	11	-	מלא	AZ61	400 מ"צ 3 קצבי טרוד בווסת : 47, 27, 17 או 400, 300, 200 מ"צ (17)
10	יחס רדוקציה	צינור	3	2,3,4	חלול	400	עובי דופן 1, 1.5, 2 מ"מ
11	מאמץ הזרימה	צינור	3	2	חלול	באלומיניום טמפ' חדר, 450, 250	במגנזיום 400, 300, 200 מדידת כוח הטרוד

- ניתן לבחור לבצע את המעבדה באלומיניום או מגנזיום לפי האפשרויות בטבלה והמצאי במעבדה.
- בכל מעבדה יבוצעו 3 ניסויים לכל פרמטר והתוצאות יוצגו עם סטטית תקן (אפשרי 1+2 לחיסכון).
- יש לבצע בדיקות קשיות לגלמים לפני הטרוד, כדי לברר את מצבם המטלורגי (בהשוואה לספרות).
- ניתן לבחור כל קבוצה למעט 10,11 היות ויש קושי להחליף מנדרל תוך כדי מעבדה כשהקונטיינר חם.

2. טיפול תרמי

דגמים שהולכים לניסויים של טמפרטורת טרוד, יעברו $Annealing 30min@350^{\circ}C$. לאחר הטרוד, יש לחלק את הטרוד למספר חלקים. 2 ילכו למטלוגרפיה (חתך וצד באותו דגם) של המצב לאחר טרוד. 2 חלקים נוספים יעברו טיפול תרמי ולאחר מכן מטלוגרפיה במצב $Annealing$ (רקריסטליזציה).

3. מטלוגרפיה

יש לבצע מטלוגרפיה של גלמי הטרוד, כדי לברר מה גודל הגרעינים והכיווניות המועדפת בטרם הטרוד (ניתן להקל ולהשתמש בתוצאות עבר של שניר). לאחר מכן, יש לבצע מטלוגרפיה לחומר לאחר טרוד ולאחר טרוד + טיפול תרמי של $Annealing$. יש לבצע בדיקות מיקרו-קשיות על הדגמים ולהבחין בהשתנות הקושי בעקבות התהליכים שהחומר עבר.

4. תכולת דוח המעבדה

- א. תקציר / מבוא
- ב. רקע מדעי
- ג. מטרות המעבדה
- ד. אפיון חומר הגלם (מטילי הטרוד): מיקרומבנה, קשיות, תכונות מכאניות מהספרות (בטמפרטורת הטרוד). ניתן להשתמש באפיונים שעשה שניר כדי לחסוך זמן.

- ה. תיאור מפורט של מהלך הניסוי (פרמטרים שבוצעו בפועל : טמפרטורה, לחץ וכו').
- ו. תוצאות הטרוד : גרף טרוד, המתאר את הפרמטר הנבדק (למשל השפעת יחס הרדוקציה על הכוח- אז צריך להשוות בין 3 טרודים ביחסי רדוקציה שונים) וניתוח כוח הטרוד מהגרף. יש להשוות בין הכוח המחושב למדוד ולהסביר במידה ויש הבדלים (חיכוך למשל) או טמפרטורה. חשוב להקפיד על ביצוע סטטיסטיקה ולהציג סטיית תקן.
- ז. אפיונים : מיקרומבנה לאחר טרוד ולאחר טרוד + טיפול תרמי (יש לשים דגש על גודל גרעין ממוצע והכיווניות המועדפת), קשיות לאחר טרוד ולאחר טרוד + טיפול תרמי.
- ח. דיון : השוואה בין תוצאות הטרוד לחישובים, ניתוח כשלים.
- ט. יש להציג את תמונות המיקרומבנה האופייניות לפרמטרים השונים (חתך אורכי ורוחבי).
- י. יש לנסח מסקנות (לפחות 3) מהמעבדה. חשוב מאוד. דוח ללא מסקנות נכשל.
- יא. יש לנסח המלצות לשיפור המעבדה או למחקר המשך.

- א. המכבש טומן בחובו מספר סכנות : חום, לחץ גבוה, חלקים מכאניים נעים, חשמל.
- ב. בעיקרון, המכבש נבנה בראיית בטיחות מובנית Ever safe עם הגנות מירביות.
- ג. המגינים הצהובים מונעים גישה לחלקים חמים.
- ד. המגן הצהוב הגדול מונע גישה לחלקים הנעים. הוא מוגן במיקרוסוויץ והמכבש לא יעבוד אם מגן זה ייפתח במהלך תהליך.
- ה. אין לגעת במיקרוסוויץ בשום תנאי ואין לעקוף אותו.
- ו. כאשר המכבש ותנור הגלמים חמים, יש להשגיח על המעבדה ולמנוע גישת זרים.
- ז. בעת טעינת גלם או החלפת כלים כאשר המכבש חם, יש להשתמש בצידוד מגן (כפפות חום וצבתות מתכת להעברת הגלמים).
- ח. יש ליישם את חומרי הסיכה בטמפרטורות נמוכות כי הם דליקים.
- ט. מגנזיום אינו דליק מתחת ל-550 מ"צ ולכן אין סכנת שריפה.
- י. במידה וגלם מגנזיום נדלק בכל זאת, יש להשתמש באבקה לכיבוי מתכות, ע"י הנחת שקית אבקה על הגלם (הכיבוי כתוצאה מהעדר חמצן).
- יא. בכל מקרה של תקלה יש ללחוץ מיידית על כפתור החרום האדום. במקרה זה כל המערכות מפסיקות עבודתם כולל גופי החימום.
- יב. בכל מקרה של תקלה, יש לדווח לטכנאי המעבדה ולא לנסות לאלתר לבד.
- יג. במקרה של דליפת שמן, אש, ריח שרוף או רעשים מהמכבש, יש ללחוץ על כפתור החרום האדום ולקרוא לטכנאי המעבדה.
- יד. ניכוי טבעים מבוצע בסודה קאוסטית (בסיס חזק) בטמפרטורה של 80 מ"צ. בעת הטיפול בסודה יש ללבוש משקפי מגן, כפפות וחלוק. יש לבצע את הניקוי אך ורק בתוך המינדף למניעת פליטת גזים וריחות לחלל המעבדה.

מספר הקבוצה: _____ תאריך: _____

שם הסטודנט				
חתימה				