

## תדריך מעבדה

### נתכים זוכרי צורה וסופר אלסטיים – Shape Memory Alloys (SMA)

מטרות המעבדה:

- הבנת העקרונות על פיהם מתבצע תהליך זיכרון הצורה
- הקשר בין סופר אלסטיות לזיכרון צורה
- תכנון צורה מנתך זוכר צורה – NiTiNOL
- הגורמים המשפיעים על טמפרטורת המעבר וכיצד ניתן לשלוט עליה

הקדמה:

נתכים בעלי זיכרון צורה נמצאים בשימוש בתעשיות שונות, כגון רפואה, תעופה וחלל. נעשה מחקר רב לאורך השנים על נתכים אלה והנתך הנחקר ביותר הוא ה – NiTiNOL, נתך המורכב מניקל וטיטניום. יכולת הנתך לזכור את צורתו נובעת ממעבר אוסטיניט – מרטנזיט. במעבדה זו יוסבר המנגנון האחראי לזיכרון הצורה והגורמים השונים המשפיעים על תופעה זו, יוצגו הדגמות שונות הממחישות את זיכרון הצורה, יתוכנן חלק לצורה רצויה, ולבסוף תתבצע תצפית מטלוגרפית בנתך

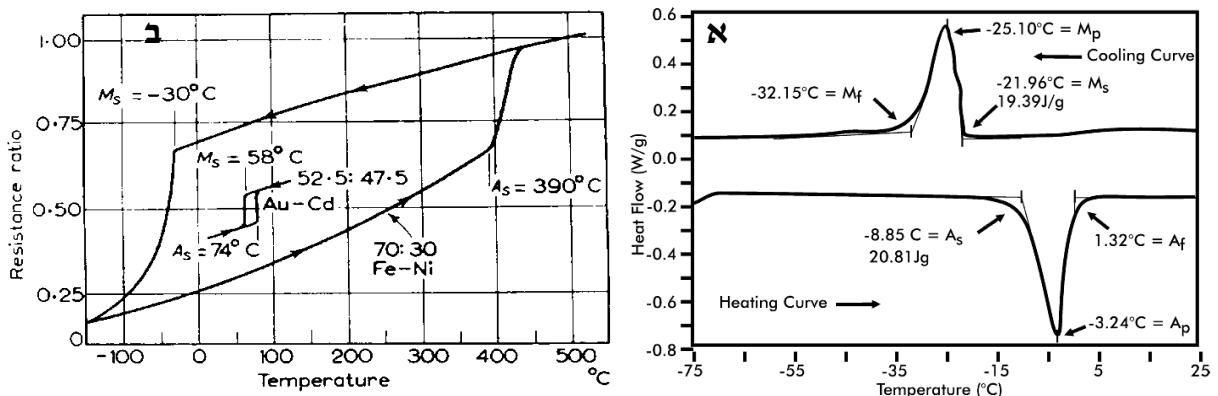
#### תופעת זכרון צורה וסופר-אלסטיות

במעברי פאזות מרטנזיטיים יש הבדל גדול בין טמפרטורת המעבר מאוסטיניט למרטנזיט בקירור וטמפי' החזרה ממרטנזיט לאוסטיניט. הבדל זה יוצר לולאת חשל (איור 1).

את הטמפי' בה מתחיל מעבר למרטנזיט בקירור מסמנים ב- $M_s$  ואת הטמפי' בה המעבר מסתיים מסמנים ב- $M_f$ . מתחת ל- $M_f$  יציב רק מרטנזיט ובקירור בין שתי הטמפי' יציבות שתי הפאזות בכמויות משתנות בהדרגה.

את הטמפי' בה מתחיל מעבר לאוסטיניט בחימום מסמנים ב- $A_s$  ואת הטמפי' בה הוא מסתיים מסמנים ב- $A_f$ . מעל יציב רק אוסטיניט ובין שתי הטמפי' יציבות שתי הפאזות בכמויות משתנות בהדרגה.

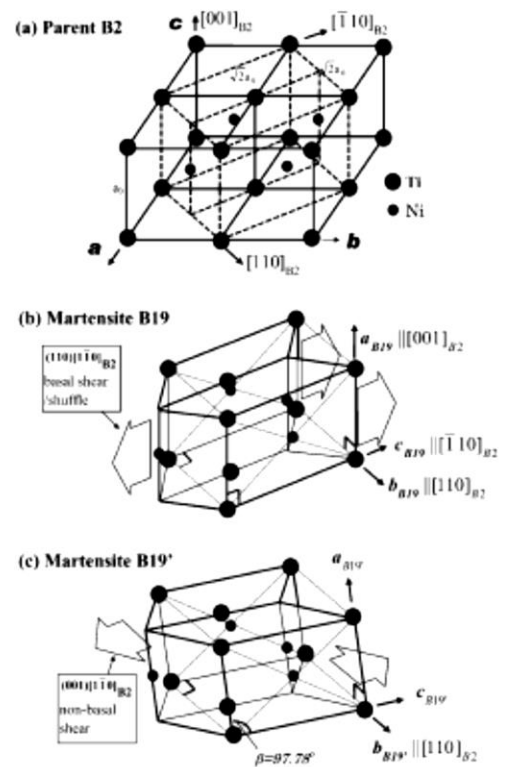
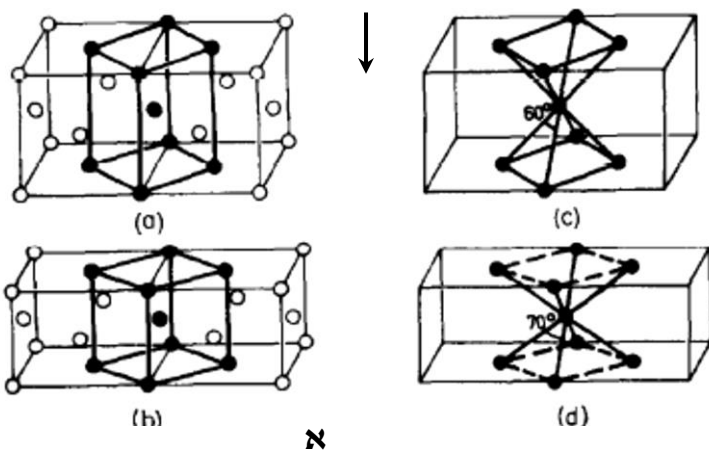
מאמץ חיצוני עשוי לגרום לאוסטיניט להפוך למרטנזיט גם בטמפי' גבוהה מ- $M_s$ . טמפי' התחלת המעבר בהשפעת מאמץ מסומנת ב- $M_d$



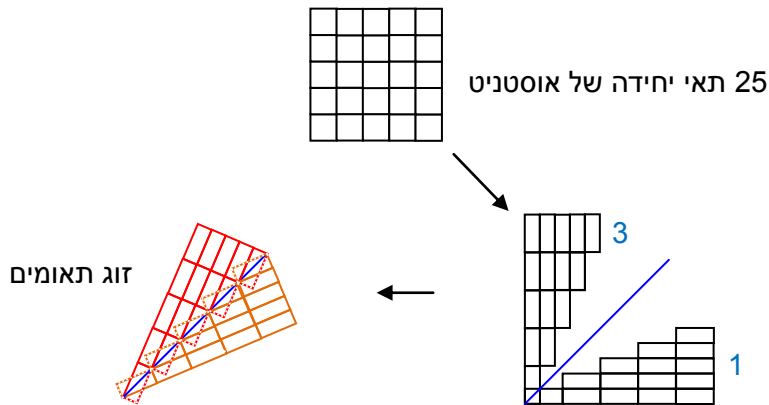
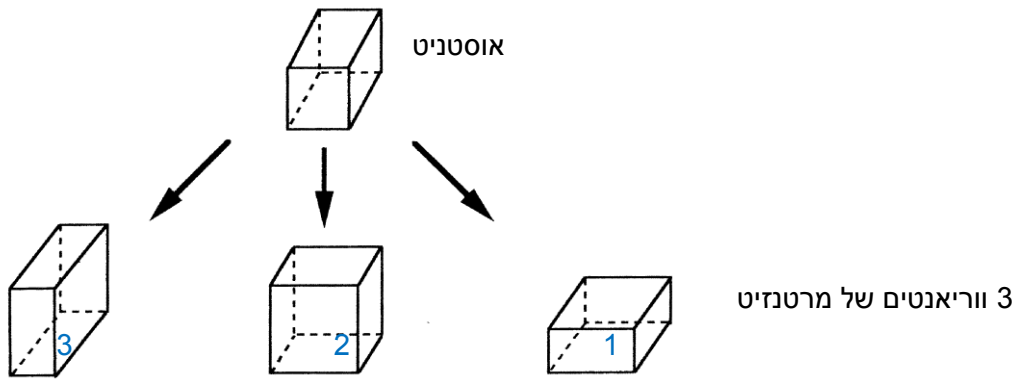
איור 1: א. דוגמה לעקומת טמפרטורת המעבר המופקת באמצעות מכשיר DSC  
ב. לולאת חשל של שבר הנפח של אוסטיניט ומרטנזיט בנתך Fe-30Ni ובנתך Au-47Cd

השינוי הקריסטלוגרפי שמתחולל במעבר מרטנזיטי מודגם באיור 2 למעבר FCC  $\rightarrow$  BCT המוכר בפלדות ולמעבר B2  $\rightarrow$  B19  $\rightarrow$  B19' (טטרגוני ממורכז פאה לאורתורומבי ולמונוקליני) שמתרחש בנתך Nitinol. מעבר הפאזות ממבנה קובי לטטרגוני עשוי להתרחש שלושה תיבות טטרגוניות שונות בכיוון הציר הקצר שלהן אך שקולות בצורתן. כל שתי תיבות טטרגוניות מתייחסות זו לזו ביחס של תאימה כמו שמודגם באיור 3.

המעבר המרטנזיטי מלווה בשינוי גדול בצורה של אותו נפח חומר ששינה את מבנהו למרטנזיטי ולכן הוא יגרום להתנגדות אלסטית גדולה של המטריצה האוסטניטית. חומרים שעוברים מעברים מרטנזיטיים מצאו פתרון ייחודי לבעייה זו: הם גדלים בצורת עדשות דקות, מקבילות למישורי הרגל (habit planes) מסויימים. מישורי ההרגל נבחרים מכיוון שתאומים צפופים שנוצרים תוך כדי גידול העדשה המרטנזיטית הם מנגנון דפורמציה פנימית שגורם לכך ששינוי הצורה של המרטנזיט ביחס לאוסטניט הוא אפסי במישור ההרגל. המאקרוסקופי.

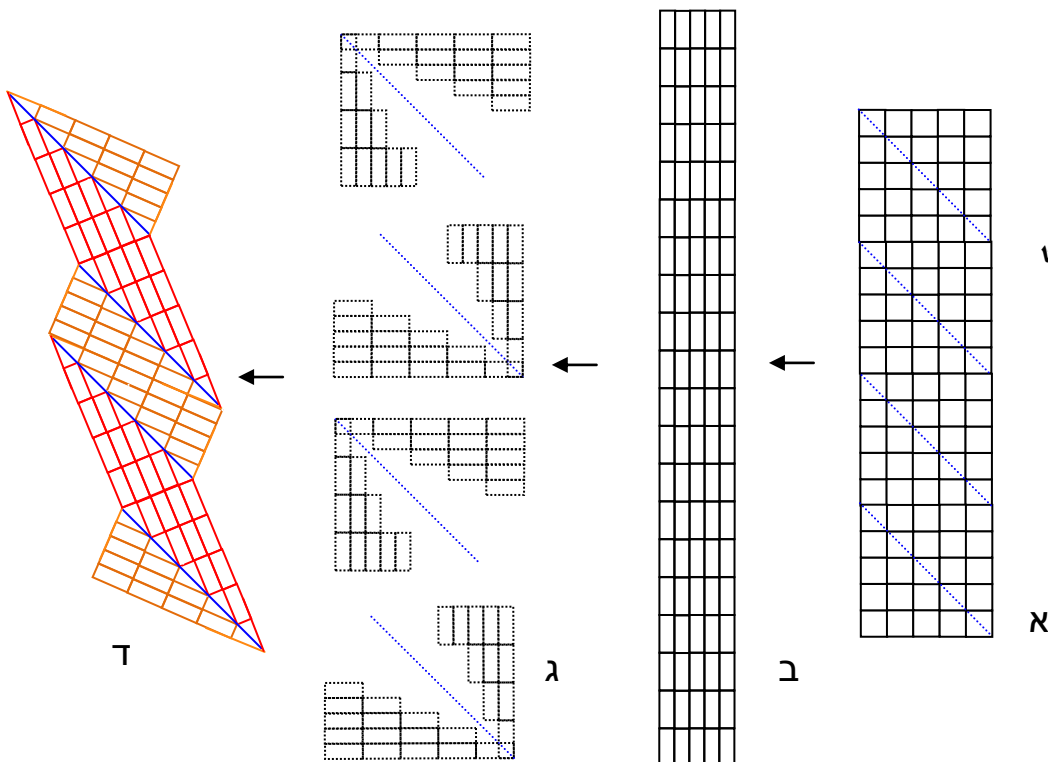


איור 2: הקריסטלוגרפיה של המעבר המרטנזיטי (א) ממבנה קובי למבנה טטרגוני האופייני לפלדות. האיורים c ו-d מבהירים שיצירת המבנה הטטרגוני היא בעיקרה שינוי של זוויות קשר, כלומר עיבור גזירה. (ב) מעבר ממבנה טטרגוני ממורכז פאה לאורתורומבי ולמונוקליני ב-Ni-Ti.



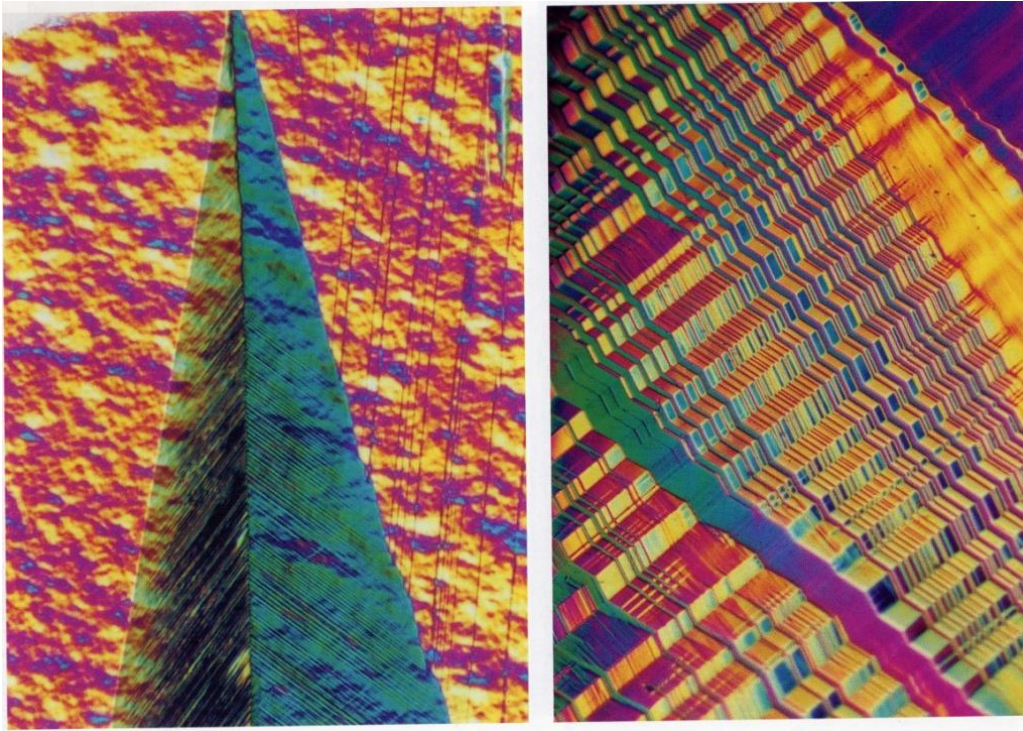
איור 3: מעבר הפאזות ממבנה קובי לטטרגונלי עשוי להתרחש בשלושה אופנים שקולים קריסטלוגרפית (א). כל שתי תיבות טטרגונליות מתיחסות זו לזו ביחס של תאימה. איור ב' מדגים יצירת תיאום מהווריאנטים 1 ו-3.

איור 4 מדגים איך התאומים יכולים לתקן את שינוי הצורה שנגרם על ידי המעבר הקריסטלוגרפי מ-FCC ל-BCT, ולגרום לכך שהצורה המאקרוסקופית של עדשה מרטנזיטית תהייה דומה מאוד לצורה של העדשה כשהייתה אוסטניטית. שים לב שהמבנה הקריסטלוגרפי של העדשה הוא מבנה מרטנזיטי (טטרגונלי) אך צורתו – כצורת חלקיק האוסטניט. איור 5 הוא דוגמה לתמונה ניסיונית.



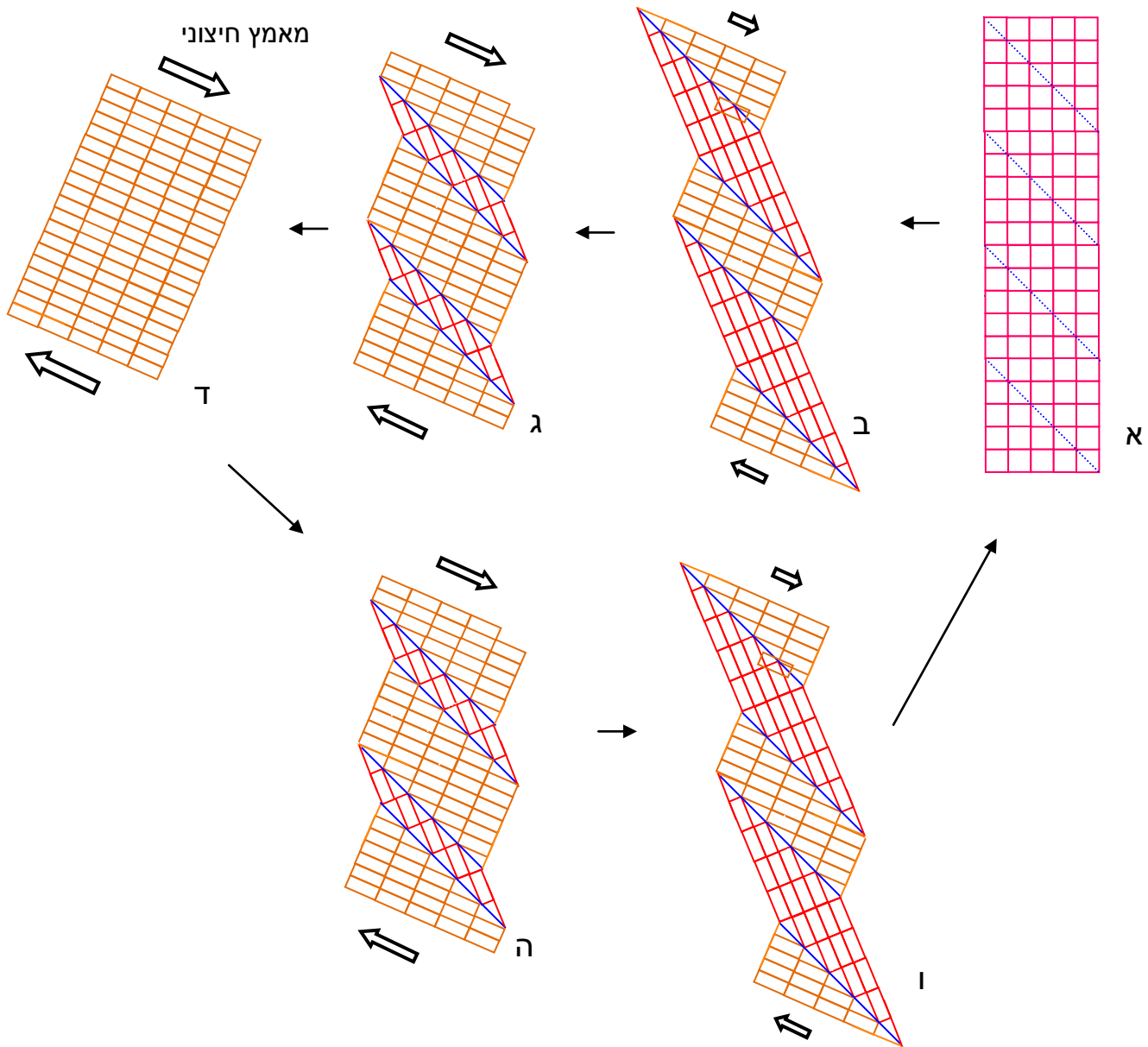
איור 4: תאור סכמטי דו מימדי של יצירת עדשה (מחט) של מרטנזיט.

- (א) חומר המוצא האוסטניטי
- (ב) מרטנזיט מווריאנט אחד מלווה בשינוי צורה גדול
- (ג) פירוק סכמטי של המרטנזיט ליחידות
- (ד) הרכבת המרטנזיט מווריאנטים בעלי יחס תאימה.



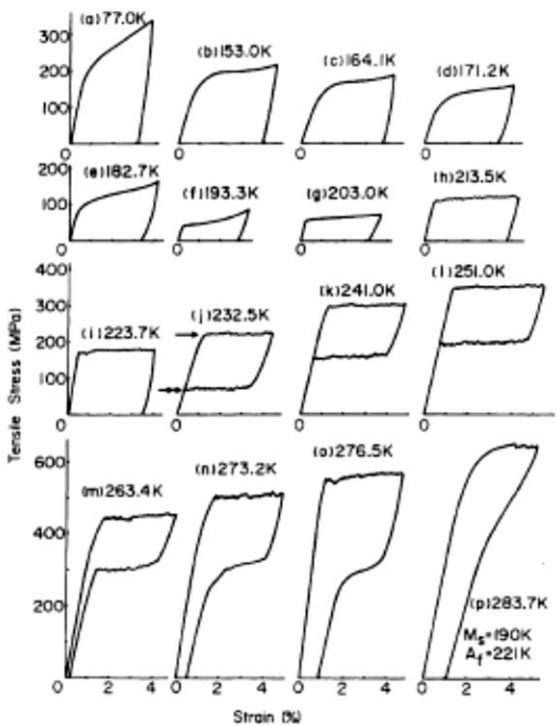
איור 5: שני מערכי תאומים בנתך CuAlNi. תמונה במיקרוסקופ אופטי.

אם מפעילים מאמץ על חומר במבנה אוסטניטי **בטמפ' גבוהה** מ- $A_s$  הוא עשוי לעבור למרטנזיט. חלקיקי המרטנזיט מפוצלים על ידי גבולות תיאומים לווארנטיים שונים, חלקם מכונן במקביל לרכיב הגזירה של המאמץ החיצוני וחלקם אינו מקביל לרכיב הגזירה. ככל שהמאמץ גדל - כדאי לווריאנטים שאינם מקבילים למאמץ החיצוני להסתובב ולהיות מקבילים לו (איור 6). סיבוב זה עשוי להיות מלווה בדפורמציה מאקרוסקופית מסדר גודל של 10% (הסיבוב מתרחש למעשה על ידי גידול של הווריאנטים המכוונים במקביל למאמץ החיצוני). אם המאמץ החיצוני מוסר – החומר חוזר למבנה הקריסטלוגרפי היציב שלו בטמפ' הניסוי – הוא המבנה **האוסטניטי** בו אין תיאומים ואין דפורמציה יחסית למצב שלפני הפעלת המאמץ, כלומר העיבור היה אלסטי! כזכור, גודלו של עיבור אלסטי רגיל הוא כ-0.1%, לכן הדפורמציה שמתרחשת בחומר שעובר למרטנזיט תחת מאמץ נקראת דפורמציה סופר אלסטית (איור 7).



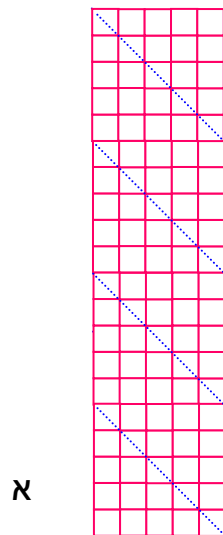
איור 6: תאור סכמטי של תופעת הסופר-אלסטיות בטמפרטורה גבוהה מ- $A_f$ . אוסטיניט הופך

למרטנזיט בגלל מאמץ חיצוני (א-ב). הוורניטים של המרטנזיט "מסתובבים" עקב הגדלת המאמץ (ג-ד). כשהמאמץ החיצוני קטן הווריאנטים מסתובבים חזרה (ה-ו) ואם הסרת המאמץ החומר חוזר למבנה אוסטיניטי (א)



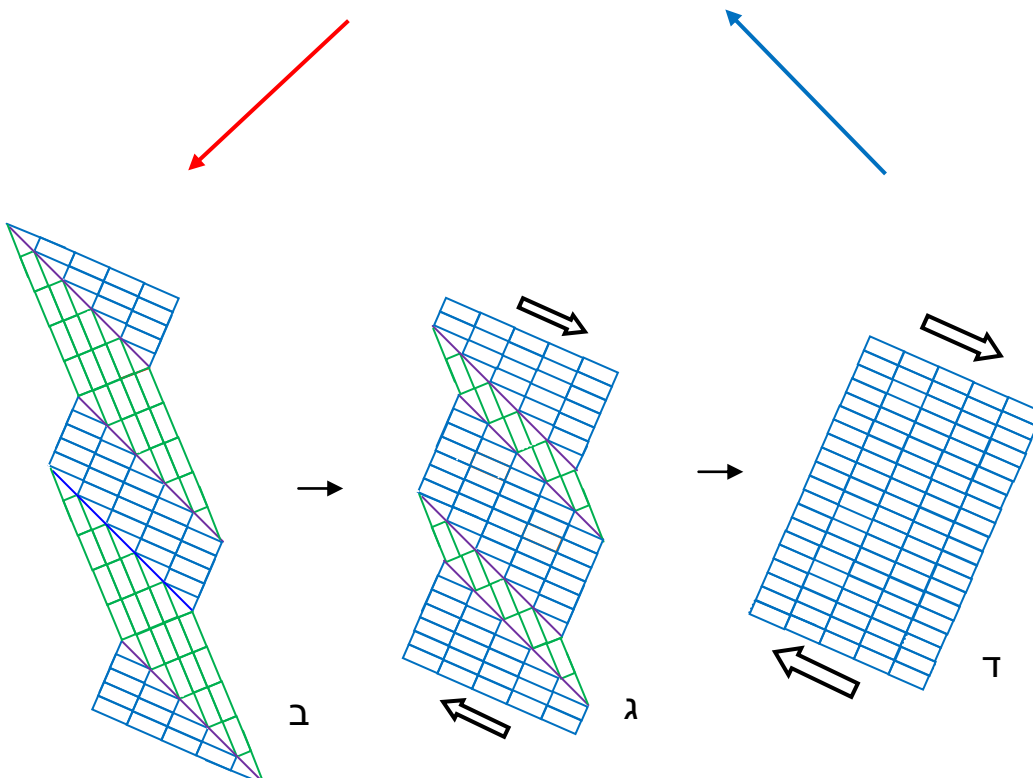
איור 7: עקומות מתיחה של נתך Ni-50.6Ti בכמה טמפרטורות. המאמץ הקריטי ליצירת מרטנזיט מסומן בחץ אופקי אחד והמאמץ הקריטי למעבר ההפוך מסומן בשני חצים בטמפ' 1232K. סמן את השלבים א-ו באיור 6 באיור 7.

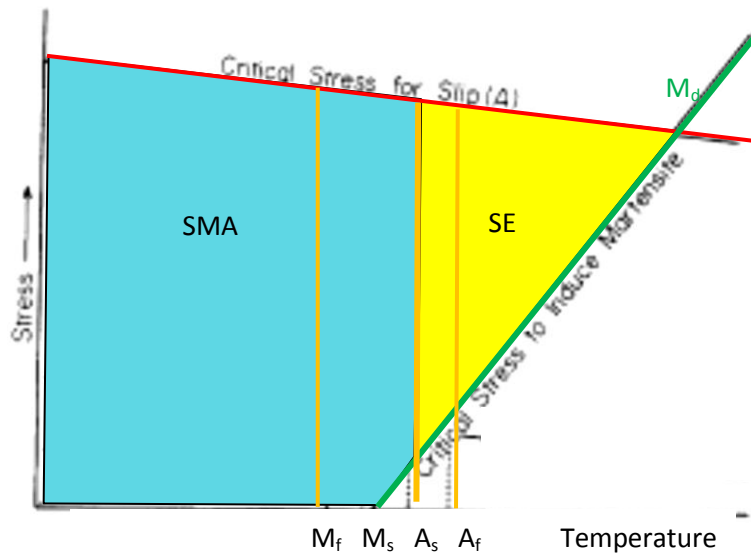
עתה נקטר את האוסטניט מתחת לטמפ'  $M_s$ . האוסטניט הופך למרטנזיט (איור 8). כשמפעילים עליו מאמץ חיצוני מתרחשת דפורמציה ניכרת על ידי תנועה של גבולות התאומים שמובילה לשינוי בהרכב הווריאנטים באופן כזה שרובם יפנה במקביל למאמץ החיצוני. אולם עכשו כשהמאמץ מוסר – החומר נשאר מרטנזיטי, כלומר מפוצל תאומים. היחס בין הווריאנטים לא משתנה והחומר נותר בצורה שהוקנתה לו על ידי המאמץ החיצוני. אם עכשו יחומם החומר לתחום היציבות של האוסטניט – הוא יחזור למבנה הקריסטלוגרפי של האוסטניט. כאן מסתבר שכל אחד מהווריאנטים של המרטנזיט זוכר את הכיוונית של סריג האוסטניט המקורי ולכן כל הווריאנטים חוזרים לאותו מבנה, אותה כיוונית קריסטלוגרפית ואותה צורה כללית של גרעיני האוסטניט. לכן קוראים לתופעה "אפקט זיכרון" (Shape Memory Effect- SME). איור 9 מסכם את תחומי הטמפרטורה והמאמץ בהן אפשרית התנהגות סופר אלסטית ובהן אפשרי זיכרון צורה.



איור 8: מופע זיכרון צורה. מקורים אוסטניט (א) והוא הופך למרטנזיט (ב). הפעלת מאמץ חיצוני גדול גורמת לדפורמציה פלסטית על ידי תנועת תאומים (או סיבוב וארינטים, ג-ד).

כשמחממים את החומר לתחום האוסטניט – הוא חוזר למבנה ולצורה של האוסטניט.





איור 9: תחומי הטמפרטורה והמאמץ בהן אפשרית התנהגות סופר אלסטית ובהן אפשרי זיכרון צורה

מהלך הניסוי:

חלק ראשון- הדגמה:

- בחלקה הראשון של המעבדה תתבצע הדגמה של נתכי NiTiNOL בהרכבים שונים שימחישו את תופעות הסופראלסטיות וזיכרון הצורה. הדגמה של מנוע "טחנת רוח" הפועל באמצעות אפקט זיכרון הצורה.

חלק שני – תכנון צורה:

- בחלק זה של המעבדה יתבצע תכנון של צורה מסוימת על ידי לקיחת תיל NiTiNOL וקיבועו בתבנית.
- יש לקחת תיל NiTiNOL וללפף אותו בצורה הרצויה בעזרת תבנית המשמשת לעיגון התיל על ידי ברגים.
- לאחר העיגון יש לחזק את הברגים, על מנת למנוע את תזוזת התיל.
- יש להכניס את התבנית עם התיל לתנור שחומם מראש לטמפרטורה של 500 מעלות צלזיוס, למשך 20 דקות.

- לאחר 20 דקות יש להוציא את התבנית ולקררה במהירות בעזרת מים.
- לאחר מכן יש לשחרר את הברגים ולהוציא את התיל.
- לבסוף יש לבצע דפורמציה של התיל, להכניסו למים חמים (טמפרטורה של כ- 70 מעלות צלזיוס) ולהבחין בשינוי הצורה המתקבל.

#### חלק שלישי – חישוב האנרגיה האגורה במעבר המרטנזיטי:

- בחלק זה של הניסוי תיבדק השפעת ממדי התיל על יכולתו לשאת בעומס.
- ילקחו שלושה קפיצים בעלי עובי שונה ולהעמיס עליהם באופן הדרגתי משקולות.
- יש לחמם את הקפיץ על ידי העברת זרם.
- לכל קפיץ יבדק העומס המקסימאלי אותו הוא יכול לשאת.
- יופק גרף של עומס מקסימאלי כתלות בעובי הקפיץ.
- חישוב האנרגיה המכנית שהופקה ממעבר הפאזות יתבצע על ידי הנוסחה הבאה:

$$\Delta g \cdot V = mgh$$

כאשר:  $V$  – נפח,  $m$  – המסה אותה הקפיץ מרים,  $h$  – מרחק העלייה של המסה.

#### חלק רביעי – צפייה מיקרוסקופית:

- דגם NiTiNOL שהוכן מראש ייבדק במיקרוסקופ אור
- בתמונה המיקרוסקופית יזוהו המבנים המרטנזי והאוסטני של NiTiNOL

#### שאלות הכנה למעבדה:

1. הסבר בקצרה על כל אחד מהגורמים המשפיעים על טמפרטורת המעבר?
2. מה מציינות הנקודות הבאות  $M_s$ ,  $M_f$ ,  $A_s$ ,  $A_f$ ?
3. מתי הנתך יפגין תכונת סופראלסטיות ומתי זיכרון צורה?
4. הסבר את מעבר הפאזות בעת שינוי הצורה?
5. הצע יישומים אפשריים ל- SMA בעלי טמפרטורות מעבר:

a.  $10 [^{\circ}\text{C}]$

b.  $37 [^{\circ}\text{C}]$

c.  $100 [^{\circ}\text{C}]$

#### הנחיות לדו"ח מסכם:

- הסבר את הקשר בין נתך סופראלסטי לנתך בעל זיכרון צורה.



- הסבר את התלות בין ממדי הקפיץ ליכולתו לשאת בעומס, מהם הגורמים המשפיעים על יכולת זו?
- הסבר איך אפקט הזיכרון גורם לסיבוב הגלגלים במנוע "טחנת רוח". הסבר את עקרון העבודה בעזרת שרטוט או תאר אותו בקיצור נמרץ ע"י מספר משפטים.
- חלק אישי: מצא יישום באחד מהתחומים הבאים: רפואה (קרדיולוגיה, אורתופדיה, אורתודנטיה), רכב, תעופה וחלל (ייתן על ידי המדריך) אשר בו נעשה שימוש ב – SMA.

### ביבליוגרפיה:

- Lagoudas, Dimitris C. Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications. New York: Springer, 2008
- Ōtsuka, Kazuhiro, and Clarence Marvin Wayman. Shape Memory Materials. Cambridge: Cambridge UP, 1998
- Yoneyama, Takayuki, and Shuichi Miyazaki. Shape memory alloys for biomedical applications. Cambridge, England: Woodhead Pub. , 2009