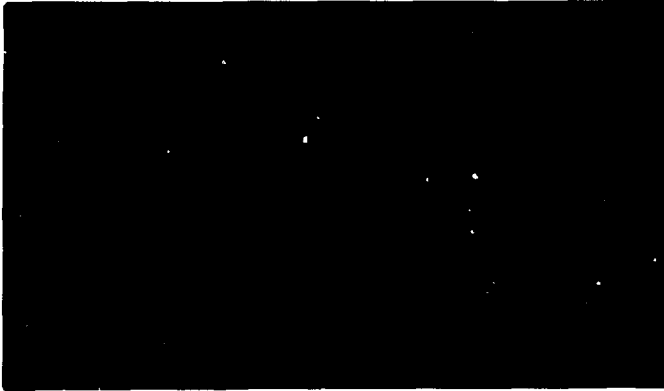


מס. סודי
IL 7301201
TRN





LEGAL NOTICE

This publication is issued by the Nuclear Research Centre - Negev, Israel Atomic Energy Commission. Neither the Nuclear Research Centre - Negev, nor its contractors, nor any person acting on their behalf or on behalf of the Israel Atomic Energy Commission

make any warranty or representation, express or implied, with respect to the accuracy, completeness, or usefulness of the information contained in this publication, or that the use of any information, apparatus, method or process disclosed in this publication will not infringe upon privately owned rights, or

assume any liability with respect to the use of, or for damages resulting from the use of any information, apparatus, method or process disclosed in this publication.

Mention of commercial products, their manufacturers, or their suppliers in this publication does not imply or connote approval or disapproval of the products by the Nuclear Research Centre - Negev or by the Israel Atomic Energy Commission.

הודעה משפטית

פרסום זה מוצא לאור על-ידי הקריה למחקר גרעיני — נגב, הוועדה לאנרגיה אטומית של ישראל. הקריה למחקר גרעיני — נגב והפועלים מטעמה או נשמה, או מסעם הוועדה לאנרגיה אטומית של ישראל או בשמה

אינם אחראים או ערבים, אחריות או ערבות כלשהי, במפורש או שלא במפורש, לדיק, לשלמות ולשימושיות של המידע הכלול בפרסום זה או לכך שהשימוש בכל מידע, מכשיר, שיטה או תהליך הניזון בפרסום זה לא ייגע בזכויות פרטיות של אחרים,

ואינם מקבלים על עצמם כל התחייבות בינו ה" שמוש או נזקי השימוש בכל מידע, מכשיר, שיטה או תהליך הניזון בפרסום זה.

הציון של מוצרים מסחריים, של יצרניהם או של ספקיהם בפרסום זה אין משמעו אישור המוצרים על-ידי הקריה למחקר גרעיני — נגב או על-ידי הוועדה לאנרגיה אטומית של ישראל,

This publication and more information about its subject matter may be obtained at the following address:

Scientific and Technical Information Department
Nuclear Research Centre - Negev
P. O. Box 9007,
84 180 Beer-Sheva, ISRAEL

ניתן להשיג את הפרסום הזה וכן מידע נוסף בנושא הפרסום על-ידי פנייה לכתובת:

יחידת המידע
הקריה למחקר גרעיני — נגב (ת"פ)
ת"ד 9007,

בג'רשע 84 180

רלקסציה של נקעים במתכות קוביות bcc והכסגונליות hcp
לאחר דפורמציה פלסטית

ע' שטרן, ש' עדן, מ' רוזן

תמוז תשל"ז - יולי 1977

(English title and abstract included)

תקציר

נמדד הניחות האולטרסוני כתלות בטמפרטורה בשתי מתכות קוביות bcc (ניוביום וטנטלום) ובשתי מתכות הכסגונליות hcp (צירקוניום וטיטניום) במטרה למצוא את טמפרטורת ההופעה של שיאי רלקסציה של נקעים. המדידות בוצעו בעזרת גלים אולטרסוניים אורכיים בתדירות קרובה ל-10 MHz, בשיטת הפולס וההד (שעד כה לא נוצלה רבות למדידות אלה), על דגמים לאחר טיפול תרמי ודפורמציה פלסטית של כ-30%. בארבע המתכות הנ"ל נמצאו שיאי רלקסציה הממוקמים בקרבת טמפרטורת החדר. תוצאות מחקר זה הושוו לנתונים בספרות על-ידי תאור חדירות המדידה כנגד הערך ההפכי של טמפרטורת הופעת השיא. נתקבל קו ישר המחבר את תוצאות הניסויים הנתונים בספרות ובעבודה הנוכחית, כשהנקודות מפורזות סביב הקו הישר. העבודה הנוכחית משמשת שלב ראשון במחקר נרחב יותר שמטרתו למדוד שיאי רלקסציה של נקעים תחת לחץ הידרוסטטי גבוה.

RELAXATION OF DISLOCATIONS IN BODY-CENTERED CUBIC AND HEXAGONAL CLOSE-PACKED METALS AFTER PLASTIC DEFORMATION

Adin STERN, Shlomo EDEN, and Moshe ROSEN

July 1977

ABSTRACT

Ultrasonic attenuation was measured as a function of temperature in two bcc metals (niobium and tantalum) and in two hcp metals (zirconium and titanium) in order to determine the dislocations relaxation peak temperatures. The measurements were carried out by the hitherto little used pulse-echo method, using longitudinal ultrasonic waves of a frequency of about 10 MHz, on specimens that underwent annealing heat-treatment and plastic deformation of about 30%. Relaxation peaks were found in the above four metals at temperatures close to room temperature. The results of this research were compared to those given in literature by plotting the frequency as a function of the peak inverse temperature. A straight line was obtained which represents the results of experiments given in literature and those given here, the points falling close to the straight line. The present work constitutes the first stage of an extensive research with the object of measuring dislocations relaxation peaks under high hydrostatic pressure.

עמודתוכן העניינים

1	מבוא	1
3	סקר ספרות	2
3	שיאי ניחות אולטרסוני בטיטניום וצירקוניום	2.1
9	שיאי ניחות אולטרסוני בטנטלום וניוביום	2.2
17	הסבר תיאורטי לשיאי הרלקסציה הנובעים מנקעים	2.3
21	מכשור	3
22	שלבי הכנת הדגמים	3.1
26	מחזיק הדגם	3.2
29	מערכת הניסוי למדידת ניחות אולטרסוני	3.3
32	ניסויים ותוצאות	4
43	סיכום	5
44	הבעת תודה	
45	נספח 1 אנליזה לאי-נקיונות במתכות הנבדקות	
49	סימוכין	

1 מבוא

חוקרים רבים הראו⁽¹⁻⁵⁾ שקיים קשר חזק בין הופעת שיאי ניחות (attenuation) אולטרסוני על-גבי עקומות של חיכוך פנימי כנגד טמפרטורה, הידועים כשיאי בורדוני (Bordoni), לבין הדפורמציה הפלסטית במספר מתכות fcc.

מתוך תוצאות המחקרים הרבים שנוצעו על נחושת, מתכת שנחקרה בצורה מעמיקה בנושא זה, ניתן לסכם את התכונות העיקריות של שיא בורדוני כך⁽⁶⁾:

(א) הוא מופיע רק בדגמים שבהם יש דפורמציה פלסטית ונעלם לאחר ריפוי (annealing) בטמפרטורה קרובה לטמפרטורה הרקריסטליזציה.

(ב) הוא מופיע בדגמים רב-גבישיים וחד-גבישיים.

(ג) הוא מלווה בשינוי במודול האלסטיות.

(ד) טמפרטורת ההופעה של השיא גדלה עם התדירות בה הוא נמדד.

(ה) גובה השיא אינו תלוי בעצמת העיוות.

(ו) גובה השיא גדל עם הגדלת כמות הדפורמציה הפלסטית בדגם הנמדד. מעל כמות מסוימת של דפורמציה פלסטית מגיעים לרוויה בגדלו של השיא.

(ז) אטומים זרים יכולים לגרום לירידה משמעותית בגובה השיא.

(ח) לעתים קרובות מתקבל שיא בחיכוך פנימי בדומה לשיא בורדוני ובעל תכונות דומות לו, אך בטמפרטורות נמוכות יותר; שיא זה ידוע כשיא של Niblett and Wilks.

כמוכן למרות שהמחקרים התרכזו תחילה במתכות fcc אין כל סיבה למניעת הופעתם של שיאי ניחות גם במתכות אחרות בעלות מבנה קריסטלוגרפי אחר.

לאחרונה אנו מוצאים מחקרים נוספים הדנים במבנה fcc⁽⁷⁾, אך גם רבים כאלה המטפלים במתכות ונתכים בעלי מבנה קריסטלוגרפי מטיפוס $fcc_{(9,8,6)}$, $bcc_{(11,10,6)}$ ואחרים.

כדומה למתכות fcc, גם במתכות bcc ו- hcp נמצאו מספר שיאי ניחות על-גבי עקומת החיכוך הפנימי כנגד הטמפרטורה. מקובל לסמן שיאים אלה באותיות α, β, γ , כאשר השיא המסומן ב- α מופיע בטמפרטורה הנמוכה ביותר (הסימון הנ"ל אינו אחיד בכל המחקרים).

מקובל לחשוב ששיאי בורדוני נובעים מתנועת הלוך ושוב של קטעי נקעים מעבר למחסומי Peierls. במודל זה שפוחח עבור מתכות fcc, החיכוך הפנימי נגרם על-ידי נוקליאציה תרמית של כיפופים כפולים (double kinks) על קטעי נקעים אשר מונחים לאורך שורות אטומים באריזה צפופה⁽¹²⁾. הרחבת המודל הנ"ל ושימוש בו למתכות bcc הביאו להבנה איכותית של שיאי α, β שנמצאו בדגמים רב-גבישים של Mo ו-Nb⁽¹²⁾.

מטרת עבודת מחקר זו הינה תאור שיאי בורדוני ומדידתם במתכות bcc (ניוביום וטנטלום) ובמתכות hcp (טיטניום וצירקוניום). ייסקרו תוצאות מחקרים אחרים בנושא זה תוך השוואת התוצאות אליהם, ותואר עבודת המחקר הנסיונית שבוצעה בקמ"ג תוך הצגת תוצאות העבודה.

עבודת מחקר זו משמשת שלב ראשון במחקר רחב יותר בנושאי שיאי רלקסציה נקעים במתכות קוביות bcc והכסגונליות תחת לחץ הידרוסטטי גבוה⁽¹³⁾.

במחקר זה נמצאה טמפרטורת הופעת שיאי הרלקסציה של נקעים במתכות Ta, Nb, Ti, Zr על-ידי מדידת ניחות אולטרסוני תחת לחץ אטמוספירי. בהמשך למחקר זה, יבוצעו ניסויים דומים תחת לחץ הידרוסטטי גבוה במטרה לאפיין את מנגנוני האינטראקציה בין גלי הקול לנקעים, הגורמים להופעת שיאי הרלקסציה.

2 סקר ספרות2.1 שיאי ניחות אולטרסוני כטיטניום וצירקוניום

בשנת 1961 *Hasiguti et al.*⁽¹⁴⁾ בצעו מדידות של חיכוך פנימי כנגד טמפרטורה במספר מתכות שעברו דפורמציה פלסטית, כיניהן גם Zr ו-Ti. במקרה של Zr מצאו המחברים ההם שיא דפורמציה ראשי ממוקם בטמפרטורה של כ-205 K, בעל אנרגיית אקטיבציה מתושבת של 0.18 eV, עבור תדירות מדידה בסביבת 1 kHz. שיא זה לא נעלם עם חימום הדגם לטמפרטורת החדר (הוא מסומן במאמר כשיא Pd). נוסף לשיא הנ"ל נמצאו עוד שני שיאים בעלי עצמה קטנה יחסית אשר נעלמו תוך חימום הדגם לטמפרטורת החדר והידועים כשיאי *Hasiguti*. בהמשך נטפל רק בשיאי ניחות היציבים בטמפרטורת החדר ובעלי תכונות רומות לשיאי בורדוני שנמצאו במתכות fcc⁽⁷⁾.

מאוחר יותר, בוצעו מדידות נוספות של חיכוך פנימי ב-Zr שיש בו דפורמציה פלסטית על-ידי *Doherty and Gibbons*⁽¹⁵⁾, *Savino and Bisogni*^(16,9), *Petit et al.*⁽⁸⁾, *Provenzano et al.*⁽¹⁷⁾, *Fernandez and Povoilo*⁽¹⁸⁾ וכן *Povoilo and Bisogni*⁽¹⁹⁾. כללית ניתן לסכם שכל המחקרים הנ"ל מאשרים קיום של שיא דפורמציה ב-Zr שבו דפורמציה פלסטית, שיא שנמצא לראשונה על-ידי *Hasiguti et al.*⁽¹⁴⁾. עת זאת אין הסכמה כללית לגבי המנגנונים האטומיים האחראיים להופעת שיאים אלה⁽¹⁸⁾.

כבר בשנת 1961 מצאו *Hasiguti et al.*⁽¹⁴⁾ ששיאי הניחות שנמצאו ב-Zr דומים לאלה שנמדדו ב-Ti, כצפוי לגבי שתי מתכות כה קרובות בתכונותיהן. מדידות נוספות על Ti שבו דפורמציה פלסטית בוצעו על-ידי *Petit et al.*⁽⁸⁾ וכן *Tung and Sommer*⁽²⁰⁾ והן מאשרות קיום של שיא דפורמציה במתכת זו. בהמשך נתאר את התכונות העיקריות של שיא הדפורמציה בשתי מתכות אלה תוך השוואת הנתונים השונים מתוך הספרות.

2.1.1 השפעת הדפורמציה הפלסטית והריפוי

שיא הדפורמציה שיומך בהמשך Pd, לא קיים ב-Zr ו-Ti שעברו ריפוי אך מפיע כתוצאה מדפורמציה פלסטית. גובה השיא גדל עם הגדלת כמות הדפורמציה הפלסטית תוך נטייה לרוויה. כללית לא ניתן להגדיר את כמות הדפורמציה הפלסטית של הרוויה. היא חלוייה כנראה באופן ביצוע העיוות הפלסטי ובניקיון המתכת^(16,8). בציריכים 2,1 בתונים שיאי Pd עבור Zr ו-Ti בעלי ניקיון 3N ו-5N, בהתאמה, כתלות בכמות הדפורמציה הפלסטית⁽⁸⁾. ריפוי המתכות בטמפרטורות נמוכות יחסית (250±650°C) למשך כשעה גורם להקטנה ניכרת של השיא Pd ואף להיעלמו^(16,8).

2.1.2 החלות בתדירות

היות ושיא בורדוני נגרם על-ידי תהליך רלקסציה המכוסס על אקטיבציה תרמית (thermally-activated relaxation), כפי שבא לידי ביטוי בתלות הניסיונות של טמפרטורת הופעת השיא בתדירות המדידה, ניתן לתאר את הקשר בין התדירות f וטמפרטורת השיא θ_M בצורה:

$$2\pi f = \tau_0^{-1} \exp\left(-\frac{H}{k_B \theta_M}\right) \quad [1]$$

כאשר:

k_B קבוע בולצמן;

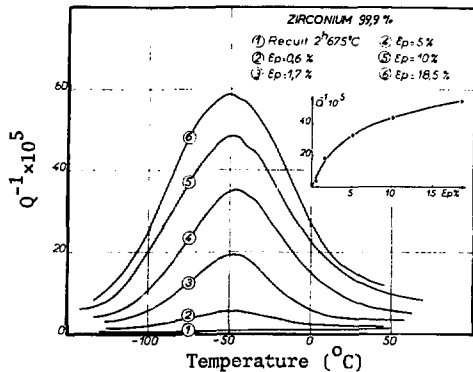
f התדירות בה נעשה הניסיון לפריצת המחסום האנרגטי H;

H גובה המחסום הפוטנציאלי - אנתלפית האקטיבציה;

τ_0 הזמן הממוצע שבו שוהים הכיפופים בעמק הפוטנציאלי.

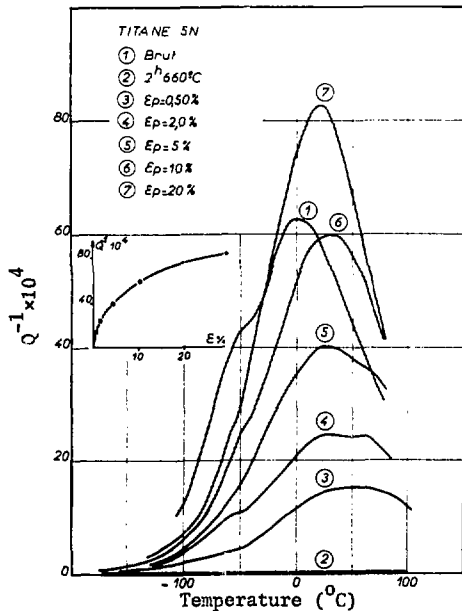
בציריך 3 מרוכזים הנתונים θ_M ו-f עבור שתי המתכות תוך כיסוי התחום שבין 1 Hz

ו- 10 MHz.



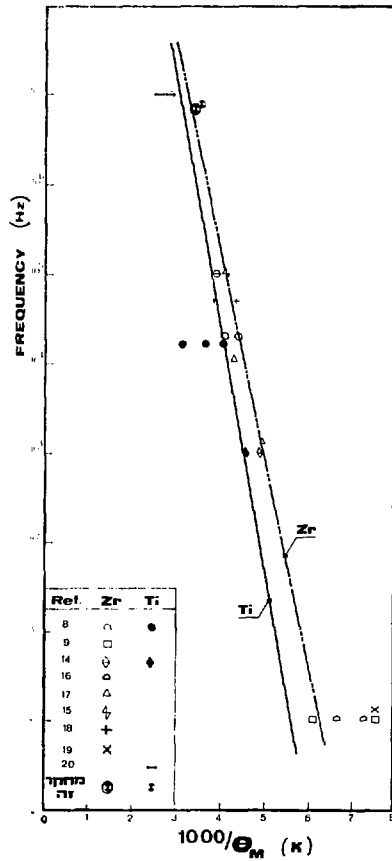
ציור 1

השפעת דפורמציה פלסטית על גובה שיא הניחות Pd בצירקוניום (בניקיון 3N) כפונקציה של הטמפרטורה (מסומך 8).



ציור 2

השפעת דפורמציה פלסטית על גובה שיא הניחות Pd בטטיניום (בניקיון 5N) כפונקציה של הטמפרטורה (מסומך 8).



ציור 3 תלות טמפרטורת השיא λ_p עבור טיטניום וצירקוניום בתרירות המדידה.

תוצאות המחקר הנוכחי הן בהתאמה עם התוצאות בספרות.

למרות שקיים פיזור נסיוני גדול יחסית, שאינו ניתן להסבר רק על-ידי שגיאות נסיוניות, התוצאות ניתנות לתאור טוב למדי על-ידי קו ישר עם אנתלפית אקטיבציה ו- τ_0 המובאים בטבלה 1.

טבלה 1 ערכי H ו- τ_0 עבור שיאי היפורמציה Pd במתכות Zr ו-Ti (מחושבים מצירור 3).

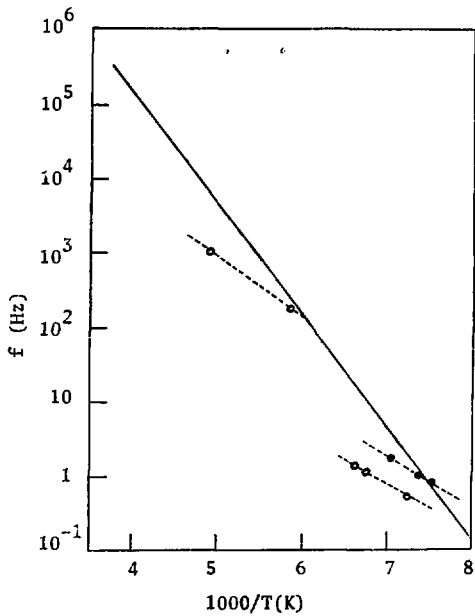
מתכת	H (eV)	τ_0 (sec)
Zr	0.45	$10^{-15.1}$
Ti	0.53	10^{-16}

2.1.3 השפעת ניקיון המתכות ועצמת העירות

עבור Zr מדידות בעצמות עירות עד 6.5×10^{-5} הראו שלא קיימת כל השפעה לעצמת העירות על מיקום השיא ועל צורתו⁽¹⁶⁾. להרחבת הידע בנושא החיכוך פנימי ב-Zr, Fernandez and Povolo⁽¹⁸⁾ חקרו את החיכוך הפנימי כתלות בעצמת העירות ופילוג העירות בדגם, כתלות בטמפרטורה וכתלות בתכולת המימן. כתוצאה ממחקר החיכוך הפנימי התלוי בעצמת העירות הורחבה ההכנה בנושא האינטראקציה של הנקעים ואטומי המימן ונמצאו פרמטרים כצפיפות נקעים, אורך הלולאות של הנקעים, מקדם הדיפוזיה וכו'⁽¹⁸⁾.

במחקרים השונים נבדקו Ti ו-Zr בניקיון שונה. עבור Zr, בדרגת דפורמציה פלסטית שונה (ב-10%) אבל בניקיון של 3N ו-4N, יש הזזה של השיא בכ-15 לכיוון הטמפרטורה הגבוהה יותר עבור המתכת הנקייה יותר. במתכת בניקיון 4N גובה השיא הוא פי 4 מזה שבמתכת בעלת הניקיון 3N. (סימוך 8). במתכת Ti התופעה דומה: ישנה הזזה של השיא לטמפרטורה גבוהה יותר עבור המתכת הנקייה יותר בה השיא גבוה יותר⁽⁸⁾.

במחקר אחר ב-Zr (סימוך 16) נמצא שטמפרטורת ההופעה של השיא נמוכה יותר והשיא גבוה ככל שהמתכת נקייה יותר. העבודה הנ"ל בוצעה ב-Zr בניקיון 4N, 5N והנתונים מתוארים בצירור 4.



ציור 4

התלות של טמפרטורת השיא
 כתדירות (מסומך 16).
 • תוצאות עבור 4N-Zr;
 • תוצאות עבור 5N-Zr;
 הקו המלא מתייחס לתוצאות
 אחרות המצויינות בספרות.

2.1.4 צורת השיא

עבור שיא של רלקסציה הכרוך בזמן רלקסציה יחיד קיימת הנוסחה (6):

$$\Delta\theta = 2.63 k_B \frac{\theta_M^2}{H} \quad [2]$$

כאשר $\Delta\theta$ הוא רוחב השיא כחצי הגובה. לפי המשוואה [2] ניתן לחשב את אנתלפיה האקטיבציה מתוך מדידת $\Delta\theta$ בלבד. במציאות, כיוון שכדרך כלל השיא הוא סופרפוזיציה של מספר זמני רלקסציה, המשוואה [2] משמשת רק לבדיקת פונקציה הפילוג של זמני הרלקסציה. במחקרים השונים נמצא שרוחב השיא כחצי גובה מצביע על סופרפוזיציה של מספר זמני רלקסציה (16,9). Savino and Bisogni (16) הראו שהרוחב המדור גדול כפליים מזה הצפוי עבור תהליך הכרוך בזמן רלקסציה יחיד.

2.2 שיאי ניחות אולטרסוני בטנטלום וניוביום

במתכות bcc לאחר דפורמציה פלסטית נמצאו מספר קבוצות של שיאי חיכוך פנימי, אשר, לפי הסימון של Chambers⁽¹⁰⁾, קרואים שיאי α , β ו- γ . שיאים אלה מורכבים לעתים ממספר שיאי משנה.

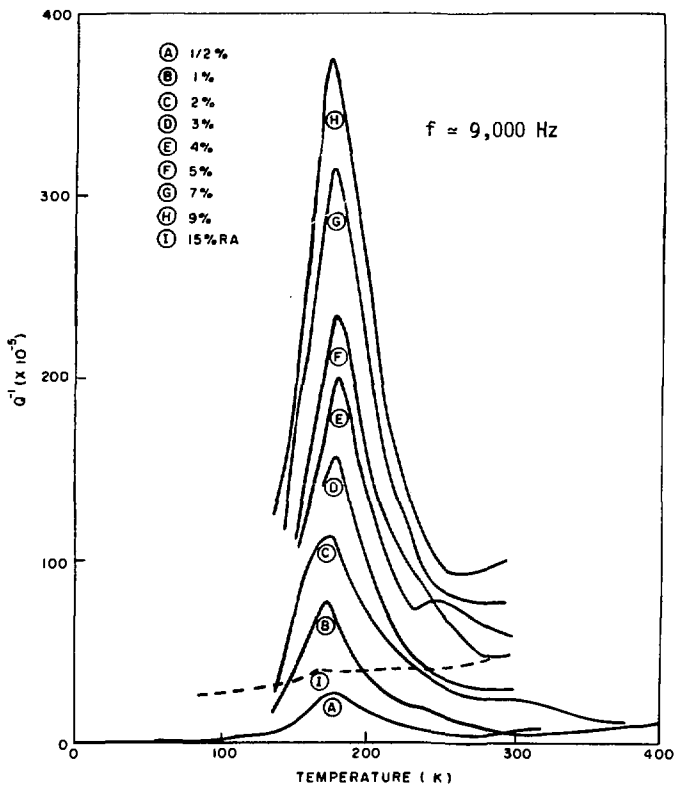
ב-1960 מצא Bruner⁽²¹⁾ שיא רלקסציה חזק בניוביום שבו דפורמציה פלסטית. הוא קשר שיא זה לנוכחות מימן במתכת כנראה בעיקר כיוון שבברזל הוא לא מצא שיא רלקסציה. Chambers⁽¹⁰⁾ סקר את המידע הנוגע ל-Nb ו-Ta שהיה ידוע עד 1966 תוך תאור תכונות שיאי הדפורמציה והשוואתם לאלה שידועים במתכות fcc. צריך לציין כבר עכשיו שהאינטרפרטציה של שיאי הרלקסציה במתכות bcc פחות בטוחה והחלטית לעומת זו הניתנת לשיאי בורדוני במתכות fcc⁽⁶⁾. במיוחד, מספר תוצאות בחקר של Mazzolai and Nuovo⁽²²⁾ גרמו לדרישה של בדיקה מחדש של תוצאות הניסויים, משמעותן ודרך הניתוח שלהן. חוקרים אלה בדקו את השפעת נוכחות מימן במתכות Ta ו-Nb על שיאי הדפורמציה. הם הגיעו למסקנה ששיא דומה לשיא של בורדוני במתכות fcc קיים בטמפרטורה 25 K עבור 20 kHz; הטמפרטורה נמוכה בהרבה מזו שהיתה מקובלת עד כה. בנוסף, נמצא⁽²²⁾ שהשיא בטמפרטורות 150±200 K דורש נוכחות מימן ודפורמציה פלסטית. לפי מחברים אלה שיא זה ואחרים באותה סביבת טמפרטורה הם שיאי מימן ודפורמציה פלסטית.

בין החוקרים האחרים שבדקו את ספקטרום החיכוך הפנימי כתלות בטמפרטורה במתכת Ta יש לציין את Mitchell⁽²³⁾ ו-Knoblouch *et al.*^{(24); (25)}. את המתכת Nb חקרו Mitchell⁽²³⁾, Amateau *et al.*⁽¹¹⁾ Stanley and Szkopiak⁽²⁶⁾ ו-Escaig⁽¹²⁾.

בהמשך נביא את תכונותיהם העיקריות של שיאי הרלקסציה בשתי המתכות Ta ו-Nb תוך השוואת התוצאות השונות הנתונות בספרות.

2.2.1 השפעת הדפורמציה הפלסטית והריפוי

ברומה למתכות fcc, במתכות bcc יש גם כן קורלציה חזקה בין כמות הדפורמציה הפלסטית והגודל של שיא הרלקסציה. עובדה זו מתוארת בציור 5, אשר מביא את השפעת הדפורמציה הפלסטית על השיא α ב-Nb.



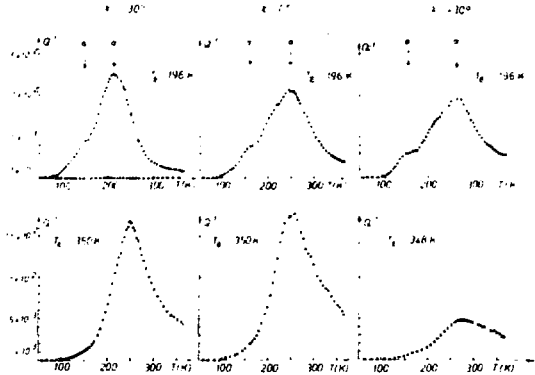
ציור 5 השפעת הדפורמציה הפלסטית על שיא α ב-Nb חד גבישי (מסומן 10).

ניתן להבחין שתחילה עולה השיא עם הגרלת כמות הרפורמציה ער ל-10%; מעבר לרפורמציה זו השיא מתחיל לקטון. Amateau *et al.*⁽¹¹⁾ מצאו שיאי דפורמציה, α , בגבישים של Nb עם אורינטציה שונה בטמפרטורה של כ-220 K. לגבישים הנ"ל עקומת מאמץ/מעוות תלויה באורינטציה. נמצא שגם השתנות גובה השיא תלויה באורינטציה משום שסוגי הנקעים, הקשורים לדפורמציה הפלסטית של הגבישים בשלבים השונים של המעוות, משתנה עם האורינטציה^(25,11).

פרט אחר שניתן לראות בצירוף 5 הוא השינוי בטמפרטורת השיא כתלות בכמות הדפורמציה. בעוד שבמתכות fcc השינוי הוא של מספר מעלות קלוין, נמצאו ב-Ta ו-Nb שינויים של כ-15 K (סימוכין 10,11). בנוסף, טמפרטורת הופעת השיא תלויה לעיתים באורינטציה של הגביש, וכך ב-Ta נמצא שאי α בטמפרטורה בתחום 220-270 K עבור תדירות של 17 kHz (סימוך 25).

חוקרים אחרים חקרו את השפעת טמפרטורת הדפורמציה על הגובה של שיאי הרלקסציה וטמפרטורת הופעתם. Knoblauch *et al.*⁽²⁵⁾ מצאו שאנתלפית האקטיבציה אינה תלויה בטמפרטורת הדפורמציה, כמות הדפורמציה, אורינטציה הגביש וניקיונו בעוד ש- f_0 ($= 1/2\pi\tau_0$) תלוי בגורמים הנ"ל. כמו כן נמצא ששיא דפורמציה ב-150 K (שהוא זהה כנראה לשיא α' של Chambers⁽¹⁰⁾) מופיע בעיקר לאחר דפורמציה פלסטית בטמפרטורה נמוכה כמתואר בצירוף 6 (שנלקה מסימוך 25).

תכונה כוללת של שיאי הדפורמציה במתכות Nb, Ta ואחרות (במשפחת bcc) הינה רגישותם לריפוי בטמפרטורות נמוכות יחסית. בעוד שעבור מתכות fcc היה דרוש ריפוי לטמפרטורת הרקריסטליזציה, במתכות bcc דרושות טמפרטורות של כ-200°C כדי לגרום להעלמות השיא או להפחתה ניכרת בעוצמתו^(26,23,10). Mitchell⁽²³⁾ מדד את הניחות בתחום 10+60 MHz ב-Nb חד-גבישי וב-Ta רב-גבישי. בגלל תופעת החלשת השיאים וההעלמותם במתכות אלה הוא לא הצליח לבצע מדידות הדירות מעל 333 K כאשר הריפוי החל כבר בטמפרטורה של כ-350 K.



ציר 6 היא ניחות בגבישים יחידים של Ta בעלי אורלינטציה שונה שבהם דפורמציה פלסטית של 6%. טמפרטורות הדפורמציה T הן 350 K, 196 K; המדידה בוצעה בתדירות של 16-25 kHz (מסימוך 25).

תופעות ריפוי מעניינות מאד נמצאו ב-Nb על-ידי Stanley and Szekopiak (26). הם מדדו את הספקטרום שהופיע בדרגת ניקיון של 99.3% לאחר ריפוי בטמפרטורה גבוהה ודפורמציה פלסטית של 5% בטמפרטורת החרר. נמצא שיא α נמוך מהמקובל, ועם זאת לא חל כל שינוי בשיא β . ריפוי בטמפרטורה 70°C (לשתיים) גרם להופעת שיא β מורכב משלושה שיאי משנה (190, 200, 220 K) מבלי להשפיע על שיא α שהיה קיים. אחרי זיקון בייפרטורת החרר נשאר רק השיא ב-200 K ושני האחרים נעלמו.

2.2.2 התלות בתדירות

לצערנו, הנתונים בספרות לגבי Ta, Nb והשיאים המופיעים במתכות אלה והקשורים הדוקות למבנה הפנימי של המתכות, מאפשרים רק חישוב לא מרויך של הפרמטרים τ_0 ו- n . בטבלה 2 מרוכזים הנתונים לפי Chambers (10) ובטבלה 3 הנתונים המחושבים מתוך הגרף בציר 7. ציור זה מאחד את הנתונים הירועים לנו היום לגבי שיא α בשתי המתכות, עבור רוב הנקודות הן לאורך קו ישר שפרמטריו נתונים בטבלה 3. תוצאות המחקרים של Knoblauch (25, 24) יוצאות רופן במיוחד בריחוקן הגדול יחסית מהקו המאפיין את 11.

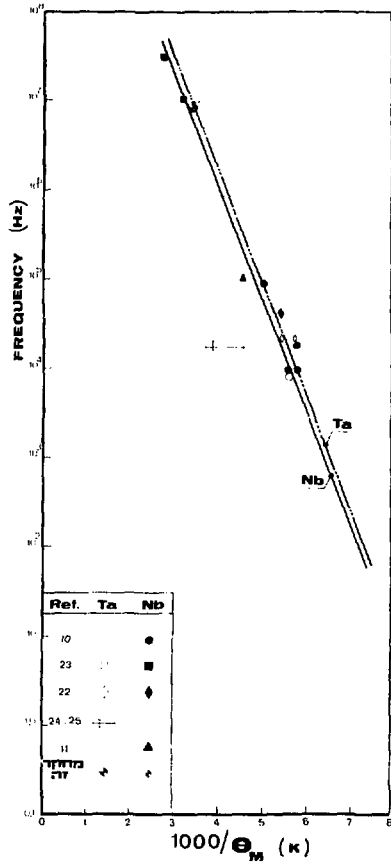
טבלה 2 פרמטרי הרלקסציה עבור שיאים הנובעים מנקעים במתכות bcc (מסומך 10).

שיא γ		שיא β_5		שיא β_2		שיא β_1		שיא α_2		שיא α_1		שיא α'		מחכת
τ_0 (sec)	H (eV)	H (eV)	τ_0 (sec)	H (eV)	τ_0 (sec)	H (eV)	τ_0 (sec)	H (eV)	τ_0 (sec)	H (eV)	τ_0 (sec)	H (eV)		
		0.66	2×10^{-13}	0.46	2×10^{-13}	0.4	2×10^{-13}	0.55	2×10^{-13}	0.27	2×10^{-12}	0.1	Nb	
2×10^{-11}	1		2×10^{-12}	0.4					2×10^{-12}	0.25			Ta	
			2×10^{-12}	0.46					5×10^{-13}	0.17			Mo	
2×10^{-14}	1.5				2×10^{-12}	0.6			6×10^{-12}	0.21			W	

טבלה 3 ערכי H ו- τ_0 עבור שיאי הדפורמציה α

במתכות Ta ו-Nb (מחושבים מצירור 7)

τ_0 (sec)	H (eV)	מחכת
$10^{-12.1}$	0.25	Ta
$10^{-11.9}$	0.25	Nb



צילור 7
 תלות טמפרטורת השיא α עבור ניוביום וטנטלום בתדירות המדידה. תוצאות המחקר הנוכחי הן קרובות זו לזו בשתי המתכות, עד כדי אי-הבחנה בגרף, ונמצאות בהתאמה עם התוצאות בספרות.

לפי התוצאות הנ"ל ניתן להניח שהשיאים שנתגלו ב-Nb ו-Ta שבהם רפורמציה פלסטית, הופיעו כתוצאה מתהליכי רלקסציה הנובעים מאקטיבציה תרמית. מסקנה זו נתמכת גם על-ידי מציאת השינוי האופייני במודולי האלסטיות. במקום הופעת השיא בחיכוך הפנימי

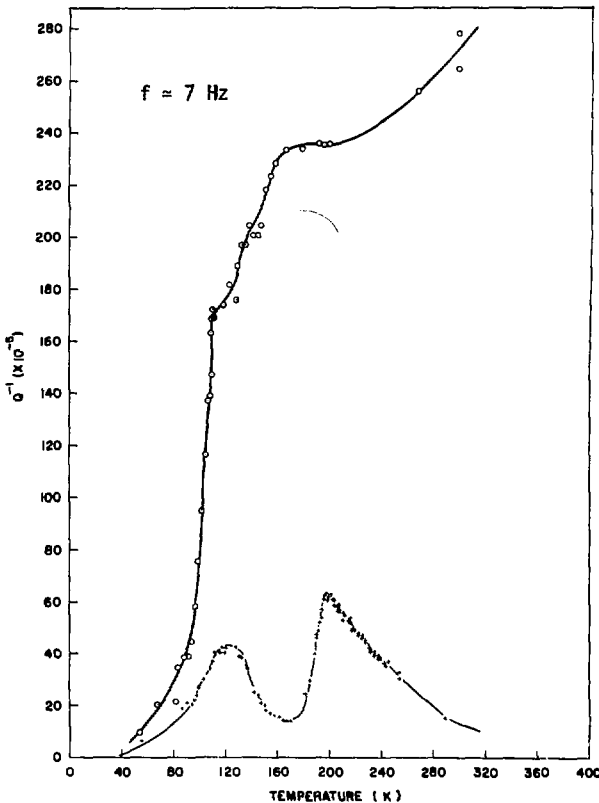
2.2.3 השפעת ניקיון המתכות ועצמת העיזות

Chambers⁽¹⁰⁾ מדד את הספקטרום של Ta נקי ביותר ומצאו שיש הבדל מהותי בינו לבין הספקטרום שנמדד על מתכות פחות נקיות (ציור 8). ניתן לראות שלמרות ההבדל בין שתי העקומות, העקומה העליונה המתארת את הטנטלום הנקי במיוחד שומרת על שרידי השיאים α, β בטמפרטורה המתאימה לתרירות המדירה. עובדה זו מצביעה על כך שמנגנון זהליך היווצרות

השיא נשמר למרות הקטנה ניכרת בכמות האי-ניקיונות.

ציור 8

ספקטרום החיכוך הפנימי עבור Ta, העקומה העליונה היא של Ta נקי במיוחד שבו דפורמציה פלסטית. העקומה התחתונה היא של Ta מתוצרת NRC, ארה"ב לאחר ריפוי ודפורמציה פלסטית (מסומך 10).



כללית ניתן לסכם שהאי-ניקיונות גורמים להקטנה של שיאי הדפורמציה הן ב-Nb (סימוך 26) והן ב-Ta (סימוך 25). ב-Ta נמצא שהשיאים מוזזים לטמפרטורות נמוכות יותר עם הגדלת רמות האי-ניקיונות⁽²⁵⁾;

כל האמור לעיל עומד בסתירה בולטת לעבודתם של Mazzolai and Nuovo⁽²²⁾ שמצאו ב-Ta ו-Nb שיא משולב של מימן ודפורמציה, שסומן H-CWP, באיזור הטמפרטורה שבו מקובל למצוא שיא α של דפורמציה (בתדירות 20.5 kHz). המתכרים מוכיחים כי שיא דפורמציה טהור (שסומן על ירס - δ) נמצא בטמפרטורות נמוכות ביותר, כ-30 K. השיא H-CWP גדל עם הגרלת כמות המימן במתכת, כאשר קיימת בה דפורמציה פלסטית מטויימת. מתוך הניסויים של Chambers⁽¹⁰⁾, אשר עסקו בהשפעת גודל העיוות של המדידה על הרלקסציה ב-Ta ו-Nb בקיים, נמצא שקיימת אותה קונפיגורציה של הפוטנציאל האנרגטי בתנועת הנקעים תוך יצירת שיאים מטיפוס Bordoni ובתנועה ארוכת טווח של הנקעים בעת דפורמציה פלסטית. מכאן ניסו למצא הקבלה בין אנרגיית אקטיבציה בשלבים השונים של הדפורמציה ואנרגיית האקטיבציה בתהליכי הרלקסציה.

2.2.4 צורת השיא

במדידות שבוצעו בתדירויות גבוהות מאד (תחום ה-MHz) נמצא שרוחב השיא בחצי הגובה קרוב לרוחב התאורטי לתהליך רלקסציה יחיד⁽²³⁾. עם זאת עבור תדירויות נמוכות יותר, כלומר טמפרטורות הופעת שיא נמוכות יותר השיאים רחבים יותר מהערך התיאורטי - כפליים עבור 100 kHz ועד בחמש פעמים עבור 10 Hz (סימוך 10).

העובדה שטמפרטורת הופעת השיא תלויה בהיסטוריה התרמומכנית של המתכת ושלעתים מקבלים שיא המורכב ממספר שיאי משנה, רומזת לנו ששיא הרלקסציה במתכות bcc, בדומה למתכות fcc, נגרם על-ידי שילוב של תהליכים רלקסציוניים.

2.3 הסבר תיאורטי לשיאי הרלקסציה הנובעים מנקעים

ההסבר התיאורטי לשיאי רלקסציה במוצקים הנגרמים על-ידי דפורמציה פלסטית צריך

להיות מסוגל להסביר את העובדות הכלליות הבאות:

(א) שיאי רלקסציה קיימים במוצקים חד- או רב-גבישיים רק לאחר דפורמציה ובעלמים תוך רקריסטליזציה.

(ב) אנרגית האקטיבציה, בקירוב ראשון לפחות, לא תלויה בכמות הדפורמציה ואמפליטודת העיוות המשמשת למרידות החיכוך הפנימי.

(ג) חוזק הרלקסציה עובר דרך מכסימום תוך הגדלת כמות הדפורמציה הפלסטית

(ד) השיאים מורכבים בדרך כלל ממספר תהליכי רלקסציה יחידים.

עובדות אלה מצביעות על כך שהרלקסציה נגרמת על-ידי קווי דיסלוקציות אשר עוברים אקטיבציה תרמית למעבר מחסום אנרגטי, שהוא תכונה אינטרינסיית של הסריג הגבישי.

מחסום אינטרינסי כזה יכול לשמש הפוטנציאל של Peierls ואמנם רוב התיאוריות המטפלות בשיאי בורדוני פתחו בכיוון זה. נתאר בקצרה את התיאוריה של *Seeger et al.* (27)

Brailsford (28) המסבירה את השיאים על-ידי מכניזם של דיפוזית כיפופים (kink diffusion).

2.3.1 המודל של יצירת כיפופים כפולים

בצורה פורמלית התיאוריה של תהליכי רלקסציה דורשת שהחיכוך הפנימי המכסימלי יתרחש כאשר התדירות של שדה המאמצים המכניים החיצוניים תשווה לערך ההפוך של זמן הרלקסציה.

המטרה של מודל אטומיסטי מפורט היא למצוא דרך לבטא את זמן הרלקסציה במונחים של פרמטרים פיסיקליים קרקטריסטיים של הבעיה.

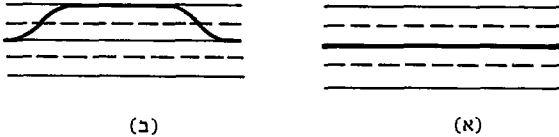
נגביל את המודל לנקעים המונחים לאורך כיווני סריג צפופים. נקע כזה מונע במישור

ההחלקה (glide plane), האנרגיה האלסטית שלו משתנה בצורה מחזורית; שינוי זה מכווץ

בעזרת הפוטנציאל המחזורי של Peierls. הפוטנציאל של Peierls קבוע לאורך

הכוונים הצפופים בתוך הסריג ומשתנה בצורה מחזורית בצורת משטח של גבעות ועמקים בסריג.

נניח שקיים נקע המונח כולו לאורך התחתית של משטח הפוטנציאל של Peierls כפי שמתואר בציור 9 (א) ונניח ש-x הוא כיוון התנועה של הנקע במישור ההחלקה שלה.



ציור 9 קו הנקע במשטח הפוטנציאל של Peierls.

(א) בעמק יחיד.

(ב) חלק מקו הנקע הועתק לעמק שכן, תוך יצירת שני כיפופי נקעים.

אם a הוא המרחק בין הכיוונים הצפופים בסריג, האנרגיה של Peierls (ליחידת אורך של נקע), V , ניתנת לתאור על-ידי

$$V = \alpha \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a} \right) \quad [3]$$

מתוך ביטוי [3] ניתן לחשב את המאמץ של Peierls, τ_p , שהוא המאמץ הדרוש להעביר את

קו הנקע (בעל וקטור Burgers - b) מעל המחסום של Peierls:

$$\tau_p = 2\pi\alpha/ab \quad [4]$$

קו נקע המונח בעמק אחד של משטח Peierls הנתון לפלוטואציות תרמיות לא יישאר באותו

מצב אלא, ירצה לעבור לעמקים אחרים. הקונפיגורציה המתקבלת יכולה להיות כנתון

בציור 9 (ב). בגלל כח המתחה של קו הנקע שני כיפופים יתקרבו זה לזה, וייעלמו ללא

מאמץ מכני חיצוני. כאשר הגביש נתון למאמץ מכני, קיים מרחק קריטי בין כיפופים

d_{cr} , כך שכל הכיפופים שהמרחק ביניהם קטן מ- d_{cr} נעלמים; אם המרחק בין הכיפופים גדול

מ- d_{cr} הכיפופים מורחקים זה מזה אל קצות קו הנע (אל נקודות העיגון של הנקע) ועל-ידי

כך קו הנקע מועבר כמעט כולו לעמק השכן של משטח Peierls.

קצב יצירת שלוחות של נקעים (dislocation bulges) עם כיפופים במרחק קריטי תלוי בטמפרטורה וזה מתאים גם למעוות האיאלסטי הנגרם על-ידי תנועת הנקע. הבסיס למודל של Seeger לשיאי כורדוני הוא לכן עירור תרמי של נקעים, המונחים במקביל לכיוונים הצפופים בגביש, מעבר למחסום של Peierls. מתוך החישובים מקבלים את התדירות בטמפרטורה אין-סופית כ-

$$f_o \sim \frac{1}{2\pi a} \left(\frac{2 \tau_p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [5]$$

כאשר ρ הוא הצפיפות של המוצק.

אנרגיית האקטיבציה מתקבלת על-ידי חישוב תוספת אנרגיה לקו הנקע כאשר הוא נמצא בנקודה שבין שני העמקים של פוטנציאל Peierls:

$$H = E_K \left[1 + 0.25 \ln \left(\frac{16 \tau_p}{\pi \tau_s} \right) \right] \quad [6]$$

כאשר τ_s הוא מאמץ הגזירה המכני הפועל על קו הנקע בכיוון ההחלקה, ו- E_K הוא אנרגיית היצירה של כיפופי הנקע, הנתונה על-ידי:

$$E_K = \frac{4a}{\pi} \left(\frac{C a b \tau_p}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [7]$$

כאשר C הוא המתח של קו הנקע.

המשוואה [6] מצביעה על תלות בין אנרגיית האקטיבציה והמאמץ המכני המופעל ולכן הטמפרטורה בה מופיע שיא הולקסציה צריכה להיות תלויה באמפליטודה של המאמץ החיצוני המופעל. הניסויים הראו שהתלות היא קטנה בהרבה מזו המתבטאת במשוואה [6], ומסיבה זו Seeger שיפר את המודל שלו. עם זאת התלות נשארה גדולה מדי בהשוואה לניסויים Pare⁽⁵⁾ ו-Alefeld⁽²⁹⁾ הראו שבעיה זו ניתנת לפיתרון על-ידי כך שמניחים כי המאמץ הפועל על הנקעים מורכב ממאמץ חיצוני הפועל יחד עם מאמץ פנימי, הנגרם, למשל, על-ידי נקעים אחרים. עבור פילוג אפשרי של מאמצים פנימיים (חלק ממאמץ Peierls) אנרגיית האקטיבציה נשארת בקירוב ראשון בלתי תלויה במאמץ החיצוני.

המודל של Seeger מניח שרק הנקעים המונחים במקביל (עד כדי $10^{\pm 20}$) לכיוונים הצפופים של הסריג יכולים לתרום לרלקסציה. נקעים הנמצאים בזווית לכיוונים הצפופים מכילים כמובן מספר כיפופים בעלי אותו סימן. כאשר הכיפופים מגיעים למרחק הקריטי תנועתם לאורך הנקעים מיידית כלומר ללא אקטיבציה תרמית, כאשר מופעל מאמץ על נקע המכיל כיפופים הם נעים לקצה אחד של קו הנקע תוך יצירת דפורמציה פלסטית מסויימת. תנועה נוספת של הנקע יכולה להתרחש רק כתוצאה מיצירה תרמית (thermal generation) של כיפופים ועל-ידי כך קבלת שיאי בורדוני.

Seeger and Schiller⁽³⁰⁾ הציעו שדיפוזיית הכיפופים לאורך קו הנקע יכולה לשחק תפקיד חשוב בהסבר התכונות המשניות של שיאי בורדוני ובעיקר הרחב שלהם. לפי המודל שלהם זמן הרלקסציה המתקבל כניסוי בורדוני מורכב מזמן הרלקסציה הדרוש ליצירת הכיפופים, τ_k , וזמן הרלקסציה לתנועת הכיפופים המורכב מ- τ_p המתאר את השפעת המאמצים הפנימיים ומ- τ_W המתאר את האינטראקציה כיפופים-כיפופים.

2.3.2 מודל דיפוזיית הכיפופים

Brailsford⁽²⁸⁾ הציע תאוריה של תנועת הנקעים המבוססת על דיפוזיית כיפופים. הוא הציע משוואה המטפלת ביצירה תרמית, תנועה והתחברות של כיפופים. על-ידי חישוב המעוות המתקבל כתוצאה מתנועת הכיפופים תחת השפעת המאמץ המופעל, מצא ביטוי המתאר חיכוך פנימי בעל זמן רלקסציה τ שפרופורציונלי ל- L^2/D . בביטוי זה L הוא אורך הקטע של נקע המשתתף בחיכוך הפנימי ו- D נתון על-ידי

$$D = D_0 \exp(-H/k_B \theta) \quad [8]$$

כאשר D הוא מקדם הדיפוזיה של הכיפופים.

מתוך משוואות אלה ניתן ללמוד שפילוג קטעי הנקעים גורם לפילוג מתאים של זמני
ללקסציה ועל-ידי כך ניתן להסביר את רוחבם הגדול של שיאי בורדוני.

Bruner⁽²¹⁾ הציע מנגנון של חיכוך פנימי המבוסס על קיום נקעים חלקיים במבנה fcc.

Gilman⁽³¹⁾ ניסה להסביר את קיום החיכוך הפנימי הנגרם על-ידי נקעים בעזרת

הדיפולים הנוצרים על הנקעים עקב דפורמציה פלסטית. Feltham⁽³²⁾ הציע לקשור

את שיאי בורדוני לתנועה קונסרבטיבית של מדרגות (jogs) עם קו הנקע או לאורכו.

3 מכשור

השתמשנו במוטות של טנטלום, ניוביום טיטניום וצירקוניום בדרגות הניקיון ומקורות
ההספק המפורטים בטבלה 4. אנליזות לאי-הנקיונות במתכות הללו מפורטות בנספח 1.

טבלה 4 דרגות הניקיון ומקורות ההספק של המתכות צירקוניום, טיטניום, טנטלום
וניוביום ששימשו למחקר (אנליזות לאי-נקיונות מובאות בנספח 1).

מקור ההספק	דרגת הניקיון	המתכת
Materials Research Corporation, Orangeburg, NY, USA	MARZ electron beam	Zr Ti
	Zone-melted material	
Venron Alfa Products, Beverly, Mass., USA	m4N7	Ta
	m4N; t3N8	Nb

3.1 שלבי הכנת הדגמים

הדגמים בהם השתמשנו לניסויים הוכנו לפי השלבים הבאים:

(א) הדגמים נחרטו למידות $\phi 5$ מ"מ ואורך בין 6 ל-8 מ"מ.

(ב) הדגמים נעטפו בפחית דקה עשויה Ta וסגורה תחת ואקום גבוה של 10^{-6} torr בצינורית קורץ.

(ג) נערך טיפול תרמי לקביעת מצב התחלתי ידוע של חומר הגלם. המתכות צירקוניום וטיטניום חוממו ל- 800°C והוחזק בטמפרטורה זו במשך 18 שעות ולאחר מכן קוררו באויר; המתכות סנטלום וניוביום חוממו ל- 1100°C והוחזקו בטמפרטורה זו במשך 120 שעות ולאחר מכן קוררו באויר.

(ד) חומר הגלם כפי שנתקבל ולאחר טיפול תרמי נבדק במיקרוסקופיה אופטית. השיטה של הכנת הדגמים לבדיקה מיקרוסקופית נתונה בטבלה 5. המיקרומבנה של המתכות מתואר בציורים 10, 11, 12, 13.

(ה) הדגמים לוטשו עד דרגת מקבילות של ± 0.005 מ"מ במלטשה ידנית.

(ו) נעשתה דפורמציה פלסטית בלחיצה בכיוון ציר האורך של הדגם בקצב של 1 מ"מ לדקה. הדפורמציה היתה בדרך כלל 30%.

(ז) בוצע ליטוש סופי למקבילות של ± 0.001 מ"מ ונמדד אורך הדגם בדיוק של $1 \mu\text{m}$.

חלק מהדגמים לא עברו דפורמציה פלסטית ולכן עבורם לא בוצעו השלבים (ה), (ו).

(ח) הרכבת גבישים פיאזואלקטריים מסוג X cut (גלי אורך) בוצעה בעזרת:

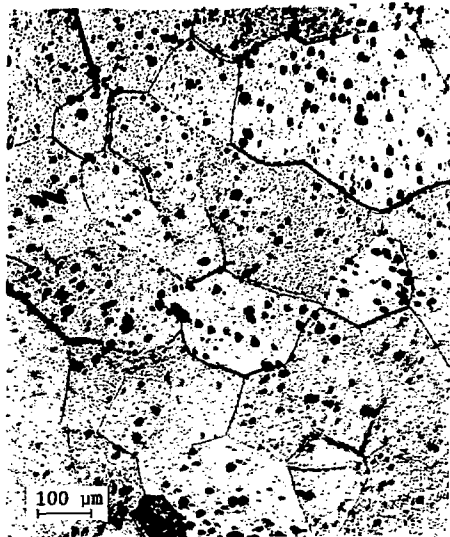
(1) דבק קשיח Eastman 910 FS.

(2) משחת סיכה מסוג Dow Corning 200.

טבלה 5 שיטות מטלוגרפיות לבדיקת צירקוניום, טיטניום, טנטלום וניוביום.

(לפי ASTM designation E407-70).

המתכת		ש י ט ת ה ב ד י ק ה	
ש י ט ת	ה ב ד י ק ה	ה מ ט ל ו ר ג ר פ י ת	צ י ל ו מ
ליטוש	איכול		
Zr	(1) בד שמיר עד 600 מש	(1) תמיסה:	שיטת השדה הבהיר
	(2) ליטוש על בדים עד 1 μm אבקת יהלום	30 cc HF	
		15 cc HNO ₃	
		30 cc HCl	
	(2) מריחה עד 10 שניות או טבילה למשך 120 שניות		
Ti	(1) בד שמיר עד 600 מש	(1) תמיסה:	שיטת השדה הבהיר
	(2) ליטוש על בדים עד 1 μm אבקת יהלום	10 cc HF	
		5 cc HNO ₃	
		85 cc H ₂ O	
	(2) מריחה עד 20 שניות		
Ta	(1) בד שמיר עד 600 מש	(1) תמיסה:	שיטת השדה הבהיר
	(2) ליטוש על בדים עד 1 μm אבקת יהלום	גליצרין; HNO ₃ ; HCl בחלקים שווים.	
	(2) טבילה למשך 4 דקות		
Nb	(1) בד שמיר עד 600 מש	(1) תמיסה:	שיטת השדה הבהיר
	(2) ליטוש על בדיט עד 1 μm אבקת יהלום	10 cc HF	
		30 cc HNO ₃	
		30 cc HCl	
	(2) מריחת הדגם למשך 10 שניות או טבילה למשך 2 דקות		

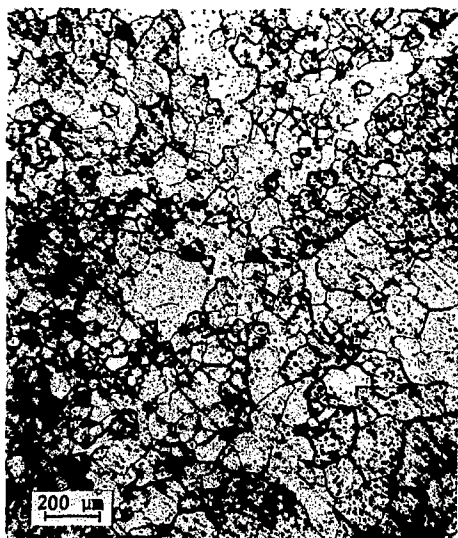


(ב)



(א)

ציור 10 מיקרומבנה של Nb: (א) כפי שנתקבל; (ב) לאחר טיפול תרמי בתנאים $.1100^{\circ}\text{C}/120\text{ hr}$.



(ב)

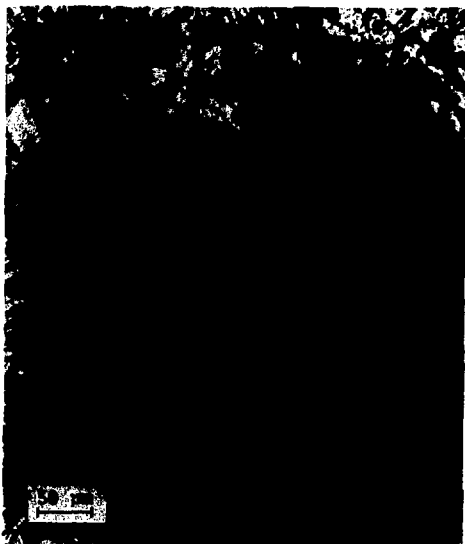


(א)

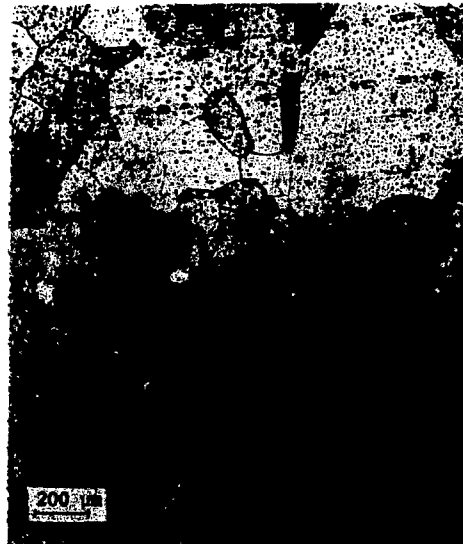
ציור 11 מיקרומבנה של Ta: (א) כפי שנתקבל; (ב) לאחר טיפול תרמי בתנאים $.1100^{\circ}\text{C}/120\text{ hr}$.



ציור 12 מיקרומבנה של Ti לאחר טיפול תרמי בתנאים $800^{\circ}\text{C}/18 \text{ hr}$.



(א)



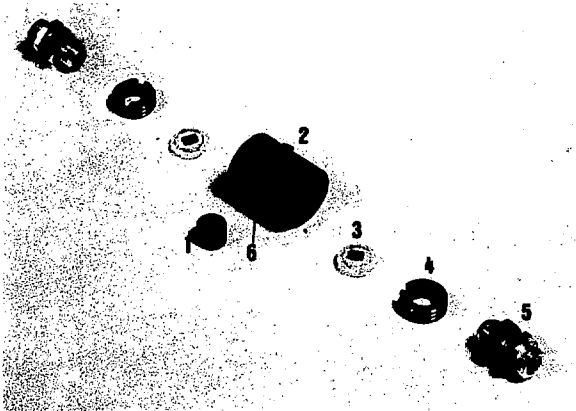
(ב)

ציור 13 מיקרומבנה של Ti : (א) לאחר טיפול תרמי בתנאים $800^{\circ}\text{C}/18 \text{ hr}$; (ב) לאחר טיפול תרמי כנ"ל ולאחר דפורמציה פלסטית של ב-30%.

3.2 מחזיק הדגם

המדירות בוצעו בעזרת שני סוגים של מחזיקי דגם: (א) מחזיק דגם "סטטי";
(ב) מחזיק דגם "קפיצי".

ההבדל המהותי בין שני סוגי המחזיקים נעוץ בשיטת ההידוק של הדגם בין המגעים החשמליים. המחזיק ה"סטטי" בנוי כך שהדגם מהודק על-ידי המגעים בעזרת בורג הלוחץ על כריות טפלוך (ציור 14).



ציור 14 מחזיק דגם "סטטי". רואים את הלייז (1); גוף מחזיק הדגם (2); כרית טפלוך (3); בורג הידוק (4); מעבר ל... (5), בורג להארקה (6).

במחזיק "סטטי" ישנה האפשרות של היווצרות לחץ משתנה באזור המגעים החשמליים כתוצאה מהתפשטות הדגם והתכווצותו בעת מחזור הטמפרטורה או/ו הלחץ. כדי לשפר את המחזיק ה"סטטי" תוכנו ובכנה מחזיק "קפיצי" (ציור 15).



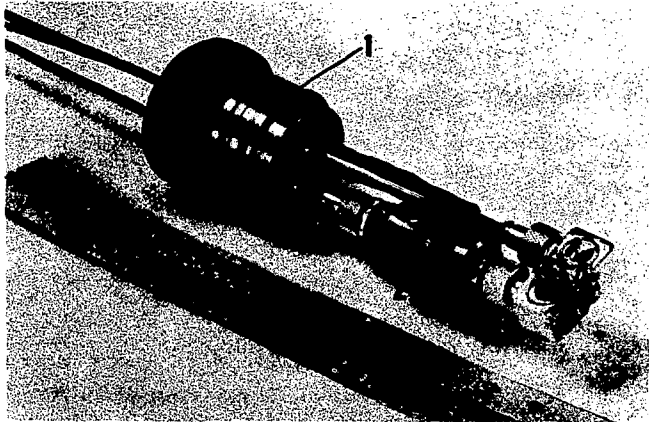
ציור 15 מחזיק דגם "קפיצי". רואים את הדגם ושני גבישים פיאזואלקטריים משני צידיו (1); גוף מחזיק הדגם (2); כרית טפלון (3); קפיץ (4); בורג הידוק (5); מגעים חשמליים (6); לוחיות הארקה (7).

במחזיק ה"קפיצי" הדגם נשען על מגע חשמלי קבוע (סטטי) ומגע חשמלי שני לחוץ על-ידי קפיץ המבטיח לחץ רציף באזור המגעים החשמליים גם כאשר הדגם משנה את מידותיו תחת מחזור טמפרטורה או/ו לחץ.

המידות המיניאטוריות של מחזיקי הדגמים נקבעו על-ידי הדרישה לעבוד עמם בתווך של נוזל בלחץ גבוה ואז אנו מוגבלים על-ידי מידות חלל התא העומד לרשותנו. הגבלה כזאת קיימת מהדרישה להמשך מחקר זה לשלב מדידות שיאי רלקסציה של הנקעים תחת לחץ הידרוסטטי גבוה.

על מנת לעבוד בתוך תא הלחץ יש להעביר לתוך התא שני מגעים חשמליים מבודדים וכן צמד תרמי. על סמך ניסיון קודם⁽³³⁾ שהיה קיים בקבוצה למחקר לחצים גבוהים כקמ"ג ותוך הכנסת שיפורים קלים נבנו מספר פקקים מתאימים לתא הלחץ. דרך הפקקים הועברו שני המגעים החשמליים וצמד תרמי ותוכננה גיאומטריה המתאימה למחזיקי הדגמים.

בציור 16 נתון פקק לתא הלחץ ובו שלושה מעברים ועליו מורכב מחזיק דגם קפיצי.



ציור 16 פקק לתא הלחץ (1), שעליו מורכב מחזיק-דגם "קפיצי" (2).

3.3 מערכת הניסוי למדידת ניחות אולטרסוני

בעת הניסויים השתמשנו בשתי מערכות מדידה:

(א) מערכת Matec Attenuation Comparator Model 9000 המשולבת עם

Matec Attenuation Recorder Model 2470 מתוצרת ארה"ב;

(ב) מערכת שתוכננה ונבנתה בקמ"ג (Ultrasonic Analyzer Model 3660) (30)

המשולבת עם גנרטור פולסים (מחברת Arenberg) מסוג PG-650C (Serial No. 82),

מתוצרת ארה"ב.

במערכת הראשונה הניחות האולטרסוני נמדד בשיטת ההד במערכת אוטומטית הנותנת

קריאה רצופה כתלות הפרמטר המשתנה, במקרה זה הטמפרטורה. ציור 17 מתאר סכימטית

את מערכת המנייה. כללית, משדר ה- xf משדר פולס מתח מתנדנד ההופך לגל קול על-ידי מתמר

פיאזואלקטרי המוצמד לדגם. גל הקול מתפשט בתוך הדגם ומוחזר מפניו הלוך

ושוב. מתמר נוסף, שאף הוא מוצמד לדגם, הופך את הדי גל הקול לפולסי מתח

חשמליים הנקלטים במערכת המנייה.

הפולסים מהגביש הקולט מוגברים במגבר Video (מוגבר רק החלק החיובי ומוצגת רק

המעטפת). בוחרים, ידנית, שני הדים (בוחר I ו-בוחר II), לאו דווקא עוקבים.

מגבר AGC שומר על עצמה קבועה של הד נבחר ראשון. המדידה נעשית תמיד בין עצמת

הד ראשון בעלת ערך קבוע ועצמת הד שני משתנה עם שינוי ובליעה בחומר. עצמת ההדים

הנבחרים מועברת למד-מתח לוגריתמי דיפרנציאלי אשר מוציא את הערך $20 \log \frac{I_1}{I_2}$ למערכת

הרישום. במקביל מגיע למערכת הרישום הערך החשמלי של הפרמטר (במקרה זה הטמפרטורה).

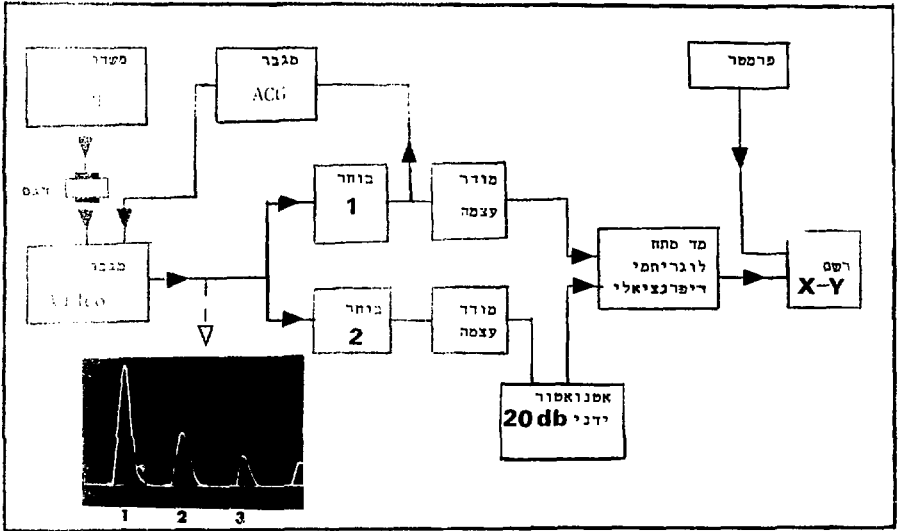
לקבלת הניחות האולטרסוני ביחידות db/cm יש לחלק את ערך הניחות הלוגריתמי כדרך

האקוסטית (פעמיים עובי הדגם). האטנואטור הידני מאפשר הכנסת offset לערך הנמדד

בשעור עד 20 db בקפיצות של 1 db. בצורה זו אפשר למדוד ברגישות גדולה יותר במד -

המתח הדיפרנציאלי. המדידה הינה יחסית ולא אבסולוטית, ומודדת רק את השינויים

בניחות בתלות בפרמטר. רזולוציית המדידה היא עד 0.05 db.



ציור 17 דיאגרמה סכימטית של המערכת למדידת נחות אולטרסוני.

במערכת השניה, שנבנתה בעיקר למדידת זמן הנועבר של גלי הקול (מדידת מהירות גל הקול), עיקרון המדידה דומה. הד ראשון מוגבר לגובה סטנדרטי בעזרת מגבר ACG וגובה יחסי השני המוגבר במידה זאת, נמדד יחסית לגובה הסטנדרטי של ההד הראשון. מדידת הניחות הינה יחסית והרזולוציה הצפויה אינה עולה על 0.5 db.

מערכת המדידה מחוברת למנקב סרט נייר מסוג Teletype מתוצרת ארה"ב. על סרט הנייר מנוקבים: זמן מעבר גל הקול, הניחות, הטמפרטורה. בעזרת וווכנית מחשב מנתחים את האינפורמציה שעל גבי הסרט המנוקב ומקבלים לגבי כל ניסוי גרף של הניחות ליחידות אורך כתלות בטמפרטורה, ומהירות גל הקול בדגם כתלות בטמפרטורה.

בציור 18 נתון מבט כללי על מערכת המדידה.



צורך 18 מבט כללי על מערכת המדידה הכוללת:

1. מכשיר למדידת ניחות;
2. תא לחץ, כשבתוכו מורכב מחזיק הדגם יחד עם הדגם;
3. מערכת לשינוי טמפרטורה;
4. מערכת ליצירת לחץ גבוה (לא היתה בשימוש בניסויים הנוכחיים).

השינוי בטמפרטורת הדגם הושג באמצעות תא חימום וקירור של חברת Instron מודל 3111

מתוצרת אנגליה. התא מתאים לתחום טמפרטורות בין -70°C ל- $+210^{\circ}\text{C}$ וניתן להגביל

בעזרת פוטנציומטר את הטמפרטורה לערך רצוי או לשלוט על קצב שינוי הטמפרטורה על-ידי

ווסת היצוני שבבנה בקמ"ג במיוחד למטרה זו. ווסת קצב שינוי הטמפרטורה מאפשר קביעת

קצבים בין $0.03^{\circ}\text{C}/\text{min}$ לבין $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. הצמד התרמי שבשימוש הינו מסוג

ברזל-קונסטנטן מוארק.

4 ניסויים ותוצאות

הפרמטרים העיקריים של הניסויים היו:

- (א) תדירות גלי הקול: העבודה נעשתה בתדירות שבין 6 MHz ל-10 MHz, כאשר לכל דגם (גם עבור אותה מתכה) נבחרה התדירות בה התקבלו חבילות הפולסים (הדי גל הקל) הברורים ביותר והחדים ביותר.
- (ב) מחזיק הדגם והדבק: בשלבים הראשוניים של העבודה השתמשנו במחזיק דגם "סטטי" כשהגבישים מודבקים אל הדגם באמצעות דבק קשיח Eastman 910 FS. בהמשך השתמשנו במחזיק דגם "קפיצי" ובמשחת סיכה מסוג Dow Corning 200 בעלת צמיגות מוצהדת של 1000 centistokes ב-25°C. נערכו גם ניסויים בודדים ב"דבק" מסוג תערובת 1:1 נפט/שמן ומשחת סיכה, מסוג NONAQ. ניסויים בודדים בוצעו במחזיק "סטטי" ומשחת סיכה ומחזיק "קפיצי" ודבק קשיח. לא מצאנו עד עתה הבדלים משמעותיים או עדיפות ברורה לסוג מסויים של שילוב: מחזיק דגם/דבק.
- (ג) שינוי הטמפרטורה: קצב שינוי הטמפרטורה ברוב הניסויים היה $0.5 \pm 1.0^\circ\text{C}/\text{min}$. מחזור ניסוי כלל שלב של חימום ושלב של קירור. בתחילת המחזור בוצע חימום מהיר מטמפרטורת החדר לנקודת התחלת הניסוי ($+90^\circ\text{C}$) ואז:
- (1) קרור מ- $+90^\circ\text{C}$ עד -65°C , בחלקו קרור טבעי ובחלקו על-ידי הזרמת CO_2 באמצעות נחיר מתאים של תא Instron.
- (2) חימום מ- -65°C עד $+90^\circ\text{C}$, בחלקו חימום טבעי ובחלקו חימום בעזרת גופי חימום תא Instron.
- בעבודה בנוהל הזה הורכב הדגם במחזיק, וזה חובר לפקק תא הלחץ. הפקק הוכנס לתא, שמולא בנוזל הדחיסה (ללא לחץ), וחובר למערכת הלחץ.
- מאוחר יותר נעשו הניסויים על מחזיק הדגם בלכד בתוך תא החימום/קרור. כן הועלתה הטמפרטורה העליונה של תחום העבודה ל- $+120^\circ\text{C}$. בדגמים בהם נמצאו תוצאות מוגדרות (המתאימות לציפיות) נעשו ניסויים חוזרים בתחום טמפרטורה מוגדר יותר.

בהמשך מוצגות תוצאות נבחרות מתוך הניסויים שבוצעו בתנאים שתוארו לעיל.

בציורים 19 (א) ו- (ב) נתון הניחות האולטרסוני [db/cm] כתלות בטמפרטורה עבור שני דגמי צירקוניום. ציור 19 (א) מתאר את העקומה עבור צירקוניום לאחר טיפול תרמי ובציור 19 (ב) נתונה העקומה של דגם לאחר טיפול תרמי ודפורמציה פלסטית של כ-30%.

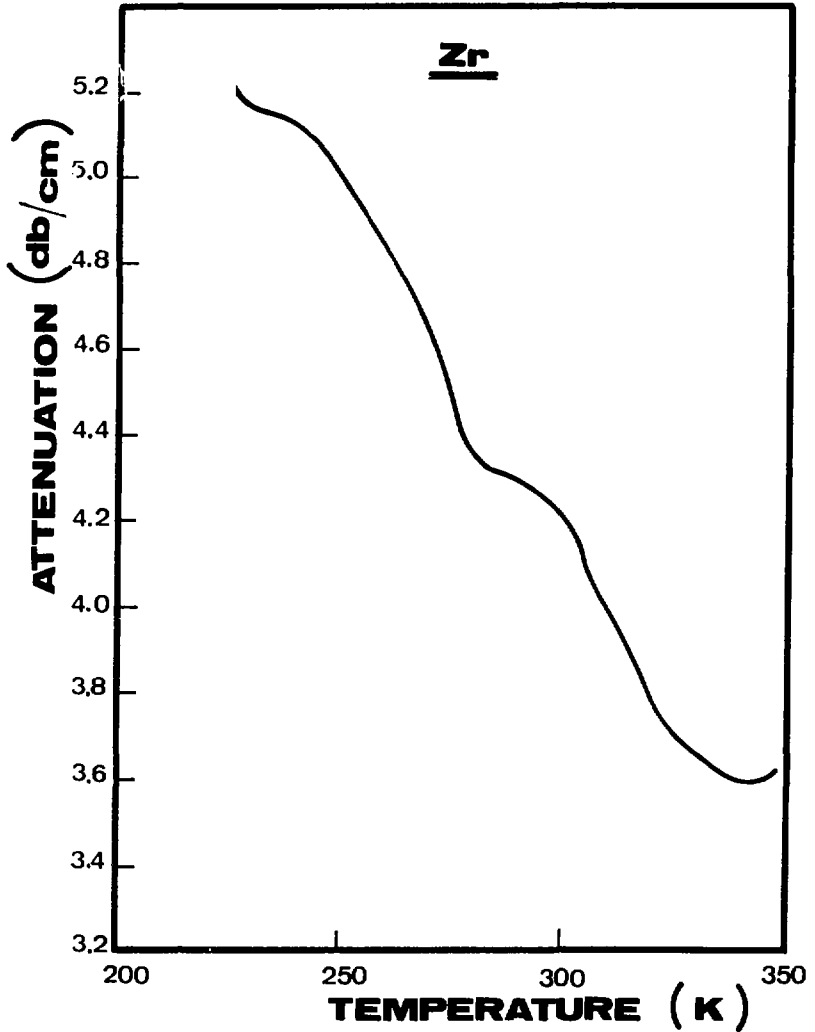
המדידות שנעשו על דגם ללא דפורמציה מצביעות על קיום שרידים של שיא בורדוני בקרבת טמפרטורת החדר - השיא נראה בצורה ברורה במדידות שנעשו על הדגם המעוות. מיקום השיא הוא בטמפרטורה של כ-295 K ורוחבו כ-20 K. המדידה נעשתה בתדירות של 7.0 MHz בתוך מחזיק "קפיצי" ומשחת סיכה מסוג Dow Corning 200.

מיקום השיא מתאים היטב לגרף הכללי הנתון בציור 3. בגרף זה מתוארת טמפרטורת הופעת השיא ב-Zr כתלות בתדירות המדידה. הוא מהווה אוסף נקודות שנלקחו מתוצאות המחקרים השונים כפי שנתון בסימוכין הנתונים בגרף. בקואורדינטות הנתונות אנו מקבלים קו ישר ונקודת המדידה שנמצאה במחקר זה מתאימה היטב לקו המחבר את תוצאות העבודות של החוקרים השונים.

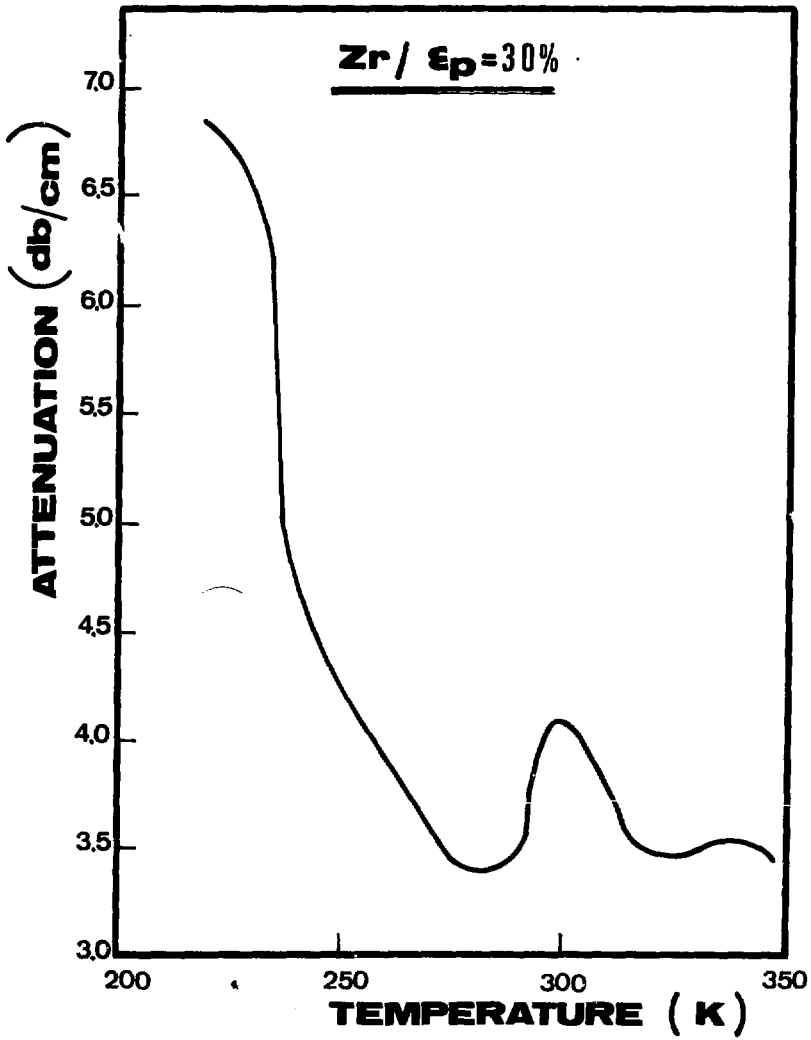
בציור 20 מתואר הניחות האולטרסוני כתלות בטמפרטורת המדידה עבור דגם טיטניום שעבר טיפול תרמי ודפורמציה פלסטית של כ-30%. אנו מוצאים את שיא בורדוני ממקום בטמפרטורה של כ-288 K. רוחב השיא בחצי הגובה הינו K 30.

גם תוצאה זו מתוארת בציור 3 יחד עם תוצאות המדידות של חוקרים אחרים. הסימוכין, שמתוכם נלקחו תוצאות המחקרים, נתונים בציור 3 עצמו. אוסף הנקודות אינו מתאר קו ישר ברור די הצורך ויש פיזור רב בין תוצאות העבודות השונות.

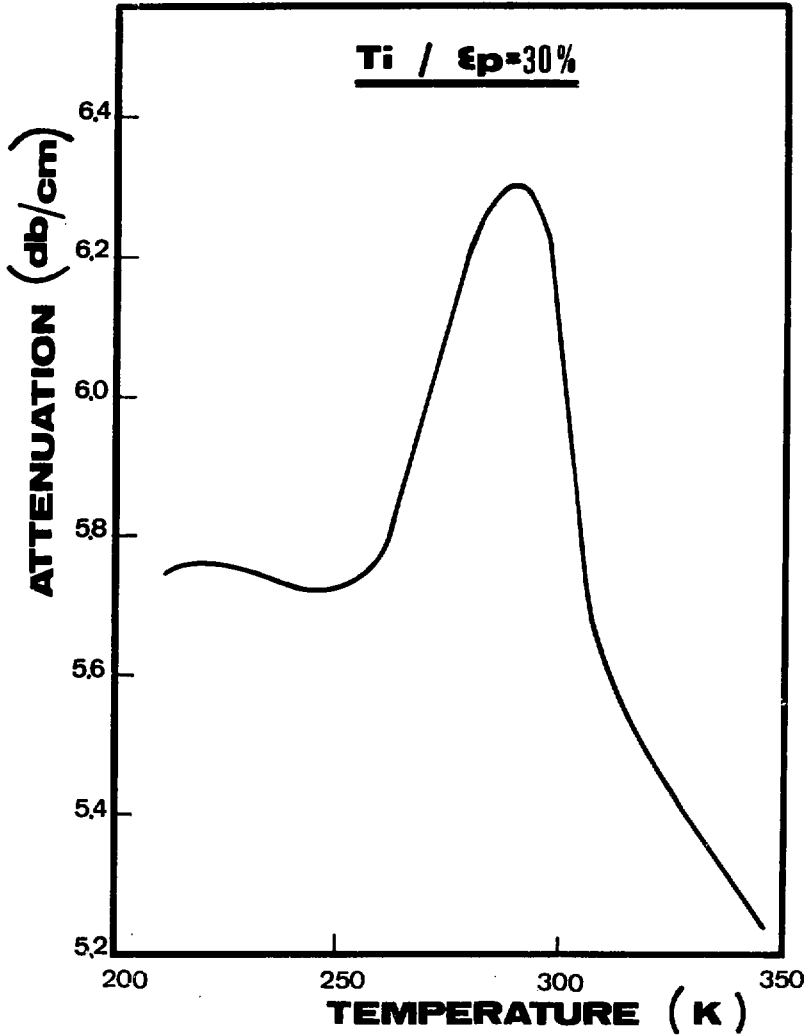
הפיזור נובע משיטות המדידה השונות ומההיסטוריה של חומר הגלם (במקרה זה טיטניום). בהתחשב בפיזור התוצאות האחרות תוצאת המדידה במחקר הנוכחי מתאימה לקו הכללי שניתן להעביר בין הנקודות השונות.



צילור 19 (א) הניחות האולטרסוני כתלות בטמפרטורה עבור צירקוניום לאחר טיפול תרמי בתנאים $18/800^{\circ}\text{C}$ שעות, תחת ואקום.



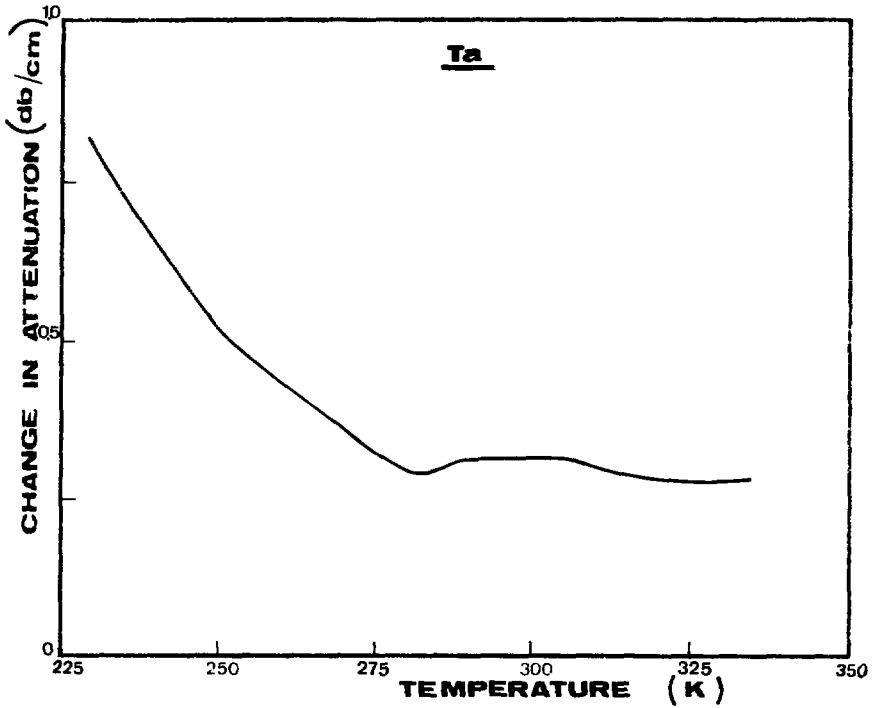
ציור 19 (ב) הניחות האולטראסוני כחלות בטמפרטורה עבור צירקוניום לאחר טיפול תרמי בתנאים 18/800°C שעות, תחת ואקום, ודפורמציה פלסטית של 30%.



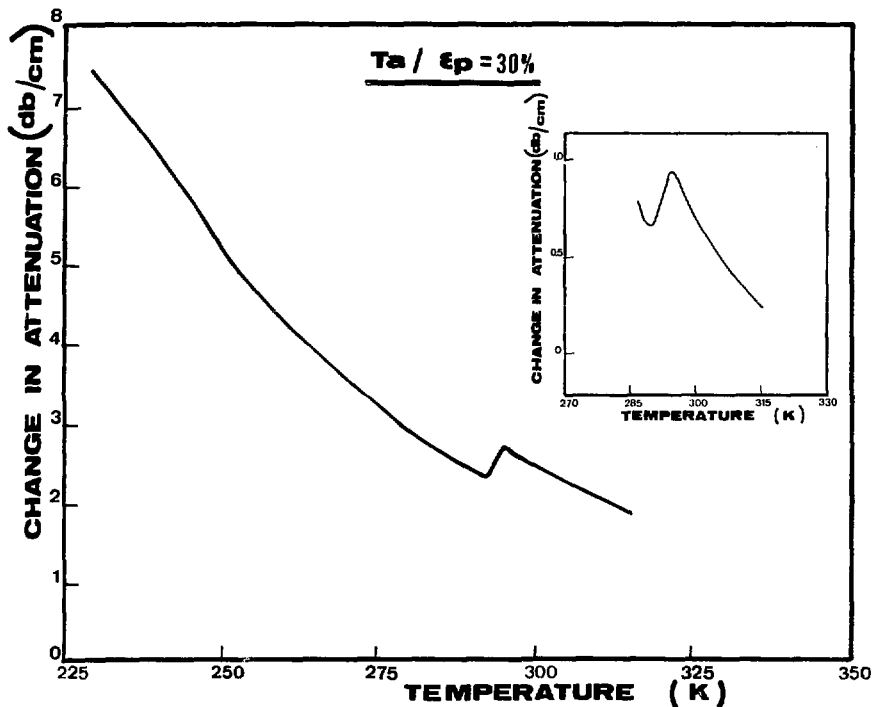
צילור 20 הניחות האולטרסוני כתלות בטמפרטורה עבור טיטניום לאחר טיפול חרמי בתנאים $18/800^{\circ}\text{C}$ שעות, תחת ואקום, ודפורמציה פלסטית של 30%.

צירים 21 (א) ו- (ב) מתארים את הניחות האולטרסוני כתלות בטמפרטורה עבור שני דגמי טנטלום. בציר 21 (א) מתואר הגרף עבור דגם Ta שהוכן מחומר הגלם כפי שהתקבל ממפעל Ventron בארה"ב. המיקרומבנה של הדגם מתואר בציר 11 (א). עקומת הניחות ל-Ta היא חלקה עם נטייה לירידה קטנה עם הגדלת הטמפרטורה. בציר 21 (ב) נתונה העקומה עבור דגם Ta שעבר טיפול תרמי ודפורמציה פלסטית של כ-30%. מבחינים בשיא ניחות קטן בטמפרטורה של כ-295 K ורוחב של כ-7 K. במדידה על דגם Ta אחר, כעל היסטוריה זהה, ותוך שימוש במערכת המדידה Ultrasonic Analyzer Model 3660 מקבלים תוצאות דומות מבחינת מיקום אך שונות ברוחב השיא (ציר 22). בציר 22 מתוארת עקומה של ניחות שנמדד במערכת זו לעומת הטמפרטורה ומבחינים בשיא ניחות בטמפרטורה של כ-290 K ורוחב של כ-30 K. בציר 7 מתארים טמפרטורת שיא הדפורמציה ותדירות המדידה, עבור ניוביום וטנטלום, כפי שנלקחו ממקורות שונים בספרות. בציר זה מופיעים שני קווים ישרים המתארים את תוצאות המדידה עבור המתכות ניוביום וטנטלום. תוצאות המחקר הנוכחי בטנטלום מתאימה היטב לקו המתאר את התוצאות של המחקרים השונים במתכת זו.

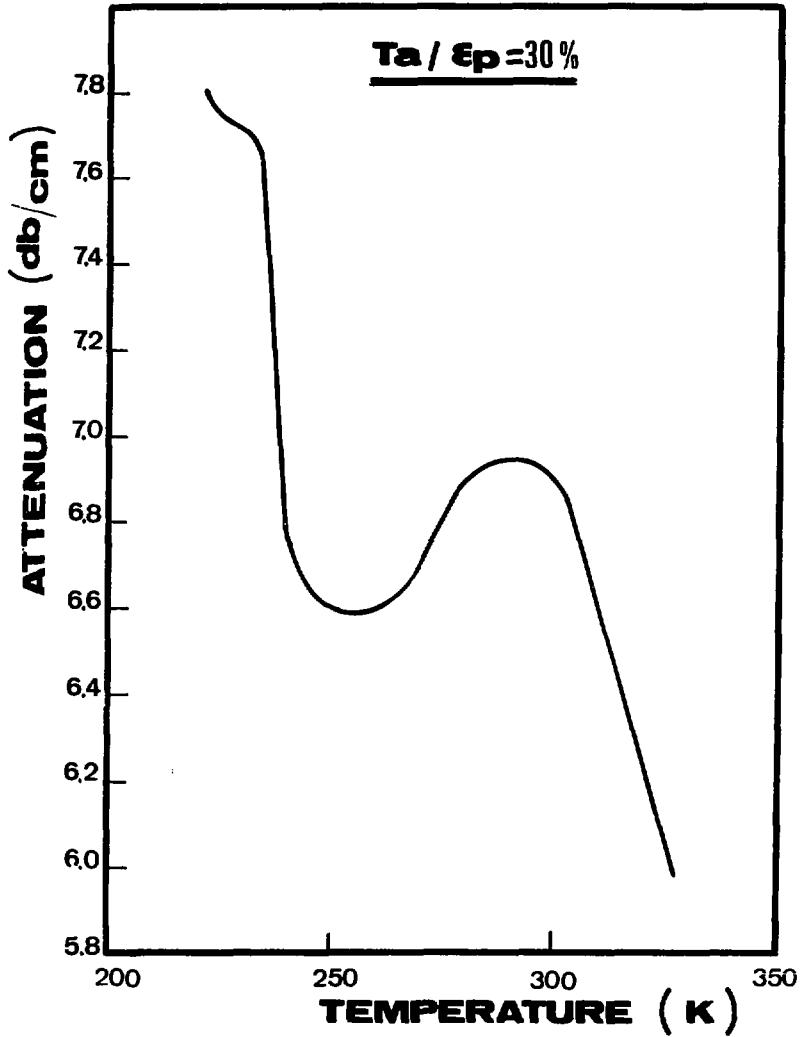
בצירים 23 (א) ו- (ב) נתונות תוצאות המדידות עבור ניוביום. ציר 23 (א) מתאר את העקומה האופיינית לדגם Nb שיוצר מתוך חומר הגלם כפי שסופק על-ידי היצרן Ventron בארה"ב. המיקרומבנה של הדגם נתון בציר 10 (א). רואים עקומת ניחות חלקה ל-Nb עם נטייה קלה של עלייה עם עליית הטמפרטורה. בציר 23 (ב) נתונה עקומה עבור דגם Nb שעבר טיפול תרמי ודפורמציה פלסטית של כ-30%. על גבי העקומה היורדת במקצת עם עליית הטמפרטורה מבחינים בשיא בורדוני המופיע בטמפרטורה של כ-295 K ורוחב של כ-8 K. התאמת נתון זה לספרות היא פחות טובה מזו המתקבלת בטנטלום. בהתחשב בפזר התוצאות הקיים עתה בסימוכין השונים התוצאה הנוכחית מתאימה בצורה סבירה לקו הניוביום בציר 7.



ציור 21 (א) שינוי בניחות האולטרסוני כתלות בטמפרטורה עבור רגם טנטלום כפי שסופק על-ידי היצרן.

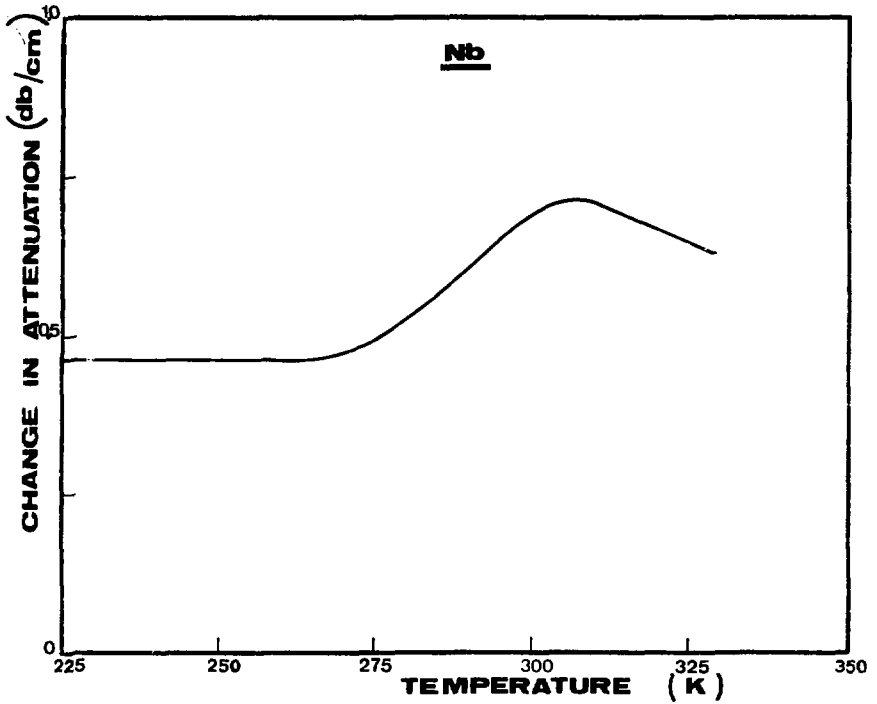


צירור 21(ב) שינוי בניחות האולטרסוני כתלות בטמפרטורה עבור דגם טנטלום שעבר טיפול תרמי בתנאים $120/1100^{\circ}\text{C}$ שעות ודפורמציה פלסטית של 30%. מבחינים כשיא α . בצירור הפנימי מוצג איזור השיא בצורה מוגדלת.

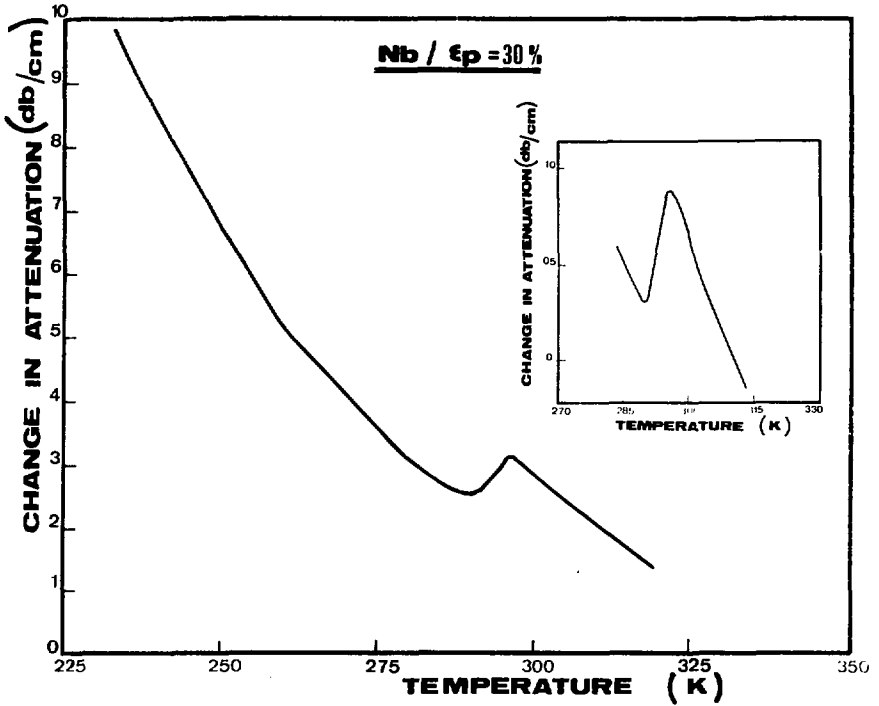


הניחות האולטראסוני כתלות בטמפרטורה עבור דגם Ta לאחר טיפול תרמי בתנאים 120/1100°C שעות ודפורמציה פלסטית של 30%. מבחינים בשיא α.

ציר 22



ציור 23 (א) שינוי בניחות האולטרסוני כאלות בטמפרטורה עבור דגם ניוביום כפי שסופק על-ידי היצרן.



שינוי בניחות האולטרסוני כחלות בטמפרטורה עבור דגם ניוביום לאחר טיפול תרמי בתנאים $120/1100^{\circ}\text{C}$ שעות ודפורמציה פלסטית של 30%. מבחינים בשיא α . בציר הפנימי מוצג איזור השיא בצורה מוגדלת.

ציור 23(ב)

5 סיכום

המחקר הנוכחי נועד לסכם את הידע בנושא שיאי דפורמציה במתכות bcc (טנטלום, ניוביום) ובמתכות hcp (צירקוניום, טיטניום) על-ידי סקר ספרות מקיף ועל-ידי השלמת נתונים תוך ביצוע ניסויים.

הנתונים מתוך הספרות מסוכמים בצירורים 7,3 המתארים את טמפרטורת הופעת שיא הדפורמציה לעומת תדירות המדידה. בשתי המתכות bcc ובשתי המתכות hcp לאחר טיפול תרמי ודפורמציה פלסטית של 30% נמצא שיא ניחות אולטרסוני המתאים לגרפים הכללים בצירורים 7,3.

יש לציין שמעט מחקרים בנושא שיאי דפורמציה במתכות בוצעו בתחום התדירות של MHz. תוצאות מחקר זה משלימות את הנתונים בספרות על-ידי מציאת שיאי רפורמציה במדידות עם גל קול אורכיים בתדירות הנמצאת בתחום 5+10 MHz. תוצאות העבודה הנוכחית, בה נמצא שיא רלקסציה של נקעים תחת לחץ אטמוספירי, ישמשו בסיס למחקר רחב יותר המיועד למדוד את שיאי הרלקסציה של נקעים תחת לחץ הידרוסטטי גבוה.

מסקר הספרות הוברר שמנגנוני האינטראקציה בין גלי הקול לנקעים, הגורמים להופעת שיאי הרלקסציה, אינם ברורים די הצורך.

מדידת התופעה תחת לחץ הידרוסטטי גבוה יכולה לעזור להבנת האינטראקציה בין גלי הקול לנקעים, תוך מציאת גדלים תרמודינמיים הקשורים להתנהגות הפלסטית של מתכות, בנפח האקטיבציה.

הבעת תודה

תודתנו נתונה ל-מ' דפט על העירור הרב ועל הענין שגילה בעבודה זו.

חובה נעימה לנו להודות ל-י' גפן ו-ה' קלימקר, אשר עזרו לנו בשלבים שונים של העבודה ועל התעניינותם הרבה במחקר.

תודתנו נתונה ל-מ' מרקוביץ והצוות שלו שעזרו לנו כנושאים הקשורים לרפורמציה פלסטית ל-ד' שמדיהו אשר ביצע את המטלוגרפיות, ול-ד' קליר על העזרה הטכנית הרבה שהושיט לנו.

נספח 1 אנליזה לאי-נקיונות במתכות הנבדקות

מצורפות תעודות הביקורת של היצרן לגבי צירקוניום וטיטניום (צירורים א1, א2, בהתאמה).

נתונה טבלה לתכולת האי-נקיונות של ניביום וטנטלום בתאם לבדיקות שבוצעו בקמ"ג (טבלה א1).

materials analysis certificate

Order No. 201/5450/14901-MI

MRC No. 95660 Date 7/1/74

Material Zirconium Alloy Composition

Form Rod & Wire Grade MARZ Lot No. 40/2222

Dimension

Fabrication Electron beam zone melted material fabricated to size.

Heat Treatment

Special Cleaning & Packaging:

Special Handling Precautions:

Analysis: [X] Mass Spectrographic [X] Vacuum Fusion [] Emission Spectrographic [X] Conductometric (Carbon)

Table with 3 columns of elements and their values: C 30.0, H 16.0, N < 1.0, C < 5.0, Al 10.0, Bi 0.2, Cl 15.0, Cu 1.0, Cr 2.0, Ca 1.0, Fe 30.0, Hf 200.0, Pb 0.4, K 0.4, Ni 1.0, S < 3.0, Si < 3.0, Ti 4.0, Sn 1.0, U 0.5, F < 6.0, Mg < 1.0, As < 0.3, Se < 1.0, Sr < 1.0, Y < 1.0, Au < 6.0, Nb < 3.0, Mo < 1.0, Ru < 10.0, Rh < 1.0, Pd < 10.0, Ag < 2.0, Cd < 4.0, In < 4.0, Sb < 0.3, Te < 0.4, I < 0.4, Ta < 10.0, Re < 1.0, Os < 0.6, Ir < 0.4

Materials analysis certificate

Order No. 281/5458/4490, M1
 MRC No. 95660 Date 7/1/74

Material Titanium Alloy Composition _____

Form Rod & Wire Grade MARZ Lot No. 22/2289

Dimension _____

Fabrication MARZ, Electron beam melted material, cold fabricated
to size.

Heat Treatment As fabricated

Special Cleaning & Packaging: _____

Special Handling Precautions: _____

Analysis: Mass Spectrographic Vacuum Fusion Emission Spectrographic Conductometric
 (Gases) (Carbon)

O	360	V	4.7
C	15	Cr	3
N	1.6	Mn	5.3
H	3	Fe	22
Li	.025	Ni	20
F	.03	Cu	18
Mg	ND	Zn	ND
Al	9.6	Zr	27
Si	4.4	Sr	4
P	.34		
S	10		
Cl	2.6		
K	1.3		
Ca	.84		

Referencesסימוכין

1. P. G. Bordoni, "Theory of elastic dissipation in monocrystals according to quantum mechanics: a new relaxation effect", *Ricerca Sci.* 19, 851-62 (1949) [in Italian]; "Elastic and anelastic behavior of some metals at very low temperatures", *J. Acoust. Soc. Am.* 26, 495-502 (1954).
2. D. H. Niblett and J. Wilks, "The internal friction of cold-worked copper at low temperatures", *Phil. Mag.* 1, 415-8 (1956) [also presented at *Conference de Physique des Basses Températures (Paris, 1955)*, CNRS and UNESCO, Paris, 1956, p 484].
3. H. L. Caswell, "Investigation of low-temperature internal friction", *J. Appl. Phys.* 29, 1210-4 (1958).
4. D. O. Thompson and D. K. Holmes, "Dislocation contribution to the temperature dependence of the internal friction and Young's modulus of copper", *J. Appl. Phys.* 30, 525-41 (1959).
5. V. K. Paré, "Study of the Bordoni internal friction peaks in copper", *J. Appl. Phys.* 32, 332-40 (1961).
6. R. De Batist, *Internal Friction of Structural Defects in Crystalline Solids*, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1972.
7. C. F. Burdett and T. J. Queen, "The role of dislocations in damping", *Metallurg. Revs.* 15, 47-65, 65-78 (1970).
8. J. Petit, M. Quintard, R. Soulet, and J. de Fouquet, "Étude des pics de frottement intérieur observés après écrouissage sur le titane et le zirconium, dans le domaine des basses températures", *J. Physique* 32, Colloque C2, C2-215-20 (1971).
9. E. J. Savino and E. A. Bisogni, "Low-temperature relaxation processes in cold-worked zirconium", *J. Nucl. Mat.* 50, 298-308 (1974).
10. R. H. Chambers, "Dislocation relaxations in body-centered cubic transition metals", in *Physical Acoustics - Principles and Methods*, Vol. III, part A, Edited by W. P. Mason, Academic Press, New York, 1966, pp 123-95.

T	Z	T	D	T	T	T
T	4.6557-006	T	0.0000+000	T		1.53930
T		T	7.5949-006	T		1.52237
T		T	1.5190-005	T		1.52131
T		T	2.2785-005	T		1.48187
T		T	3.0380-005	T		1.45844
T		T	3.7975-005	T		1.39581
T		T	4.5570-005	T		1.34299
T		T	5.3165-005	T		1.24690
T		T	6.0759-005	T		1.14343
T		T	6.8354-005	T		0.98856
T		T	7.5949-005	T		0.86033
T		T	8.3544-005	T		0.77441
T		T	9.1139-005	T		0.70491
T		T	9.8734-005	T		0.65168
T		T	1.0633-004	T		0.60603
T		T	1.1392-004	T		0.56874
T		T	1.2152-004	T		0.53615
T		T	1.2911-004	T		0.50813
T		T	1.3671-004	T		0.48372
T		T	1.4430-004	T		0.46165

T	Z	T	D	T	T	T
T	4.7316-006	T	0.0000+000	T		1.52260
T		T	7.5949-006	T		1.50949
T		T	1.5190-005	T		1.50515
T		T	2.2785-005	T		1.46913
T		T	3.0380-005	T		1.44253
T		T	3.7975-005	T		1.38320
T		T	4.5570-005	T		1.32771
T		T	5.3165-005	T		1.23503
T		T	6.0759-005	T		1.13098
T		T	6.8354-005	T		0.98364
T		T	7.5949-005	T		0.85802
T		T	8.3544-005	T		0.77336
T		T	9.1139-005	T		0.70441
T		T	9.8734-005	T		0.65124
T		T	1.0633-004	T		0.60574
T		T	1.1392-004	T		0.56854
T		T	1.2152-004	T		0.53592
T		T	1.2911-004	T		0.50806
T		T	1.3671-004	T		0.48351
T		T	1.4430-004	T		0.46166
T		T	1.5190-004	T		0.44260
T		T	1.5949-004	T		0.42486

נספח 8 תלות הלחץ בין שכבות המגע בעליית הספק מוט הדלק

באם גליל חלול בקוטר פנים $2e$ וקוטר חוץ $2g$ מחומם, כך שפילוג הטמפרטורה הוא רדיאלי בלבד, דהיינו $T = T(r)$, אזי את התזוזה $w(r)$ והמאמץ האלסטי הרדיאלי $\sigma_r(r)$ כרדיוס r כלשהו ניתן לרשום (25):

$$w(r) = \frac{1}{r} \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \int_e^r \alpha T r dr + B_1 r + \frac{B_2}{r} \quad [64A]$$

$$\sigma_r(r) = \frac{E}{1 + \mu} \left[-\frac{1 + \mu}{1 - \mu} \frac{1}{r^2} \int_e^r \alpha T r dr + \frac{B_1}{1 - 2\mu} - \frac{B_2}{r^2} \right] \quad [65A]$$

באם המאמצים והתזוזות נובעים מעליית הטמפרטורה בלבד, הלחצים ב- $r = g$ ו- $r = e$ שווים לאפס, דהיינו:

$$\sigma_r \Big|_{r=e} = p_e = 0 \quad [66A]$$

$$\sigma_r \Big|_{r=g} = p_g = 0$$

על-ידי הצבה [65A] ב-[66A] מתקבל:

$$B_2 = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \frac{e^2}{g^2 - e^2} \int_e^g \alpha T r dr \quad [67A]$$

$$B_1 = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \frac{1}{g^2 - e^2} \int_e^g \alpha T r dr$$

מוט הדלק בכור הוא מלא ועל כן $e = 0$, דהיינו:

$$B_1 = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \frac{1}{g^2} \int_0^g \alpha T r dr$$

בחישוב חד-מימדי (בהנחה שאורך מוט הדלק גדול ביחס לרדיוסו) למוט דלק בקוטר $2g$ היוצר חום בערך q' ליחידת נפח יהיה:

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = -\frac{q'}{k} \quad [68A]$$

בדרכות מודל - פריסומים