

עלון האיגוד הישראלי לשיטות חישוביות במכניקה

מספר 40

פברואר 2019

עורך: אלעד פריאל, המחלקה להנדסת מכונות, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, באר-שבע 84100, טל. 6475884 (08), דואר אלקטרוני: eladp@sce.ac.il

חברי ועד אישח"מ: מיכאל אנגלמן, פנחס בר-יוסף, דן גבעולי, יצחק הררי, עמיאל הרשגה, יונתן טל (אחראי האתר), זהר יוסיבאש (נשיא), אלעד פריאל, סלבה קרילוב (מזכיר-גזבר)

איש-קשר עם ECCOMAS: מישל ברקובייר

ועדת ביקורת: מחמוד ג'בארין ומרדכי סנטו

אתר אישח"מ (IACMM) באינטרנט: <http://www.iacmm.org.il>

רישום לחברות באגוד ופרטים נוספים: באתר האגוד הנ"ל, או פנו למזכיר-גזבר, פרופ' סלבה קרילוב, טל. 054-7746664, דואר אלקטרוני: krylov@tauex.tau.ac.il

מ-"שולחן העורך":

עדכונים מיום העיון הקודם:

יום העיון ה-45 נערך ב-18 באוקטובר 2018 בפקולטה להנדסת מכונות בטכניון (המארגנים המקומיים היו פרופ' פנחס בר יוסף ופרופ' ספי גבלי). המרצה האורח היה Prof. John E. Dolbow, Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University, USA. שפתח את יום העיון עם הרצאה מעניינת מאד בנושא:

Recent advances in computational fracture mechanics and gradient-based damage methods

במסגרת יום העיון ניתנו עוד עשר הרצאות של חוקרים וסטודנטים מהאקדמיה ומהתעשייה.

יום העיון הסתיים בסדנה מרתקת שהעביר פרופ' דן מרדכי מהמחלקה להנדסת מכונות בטכניון, בנושא מידול תכונות מכאניות של חומרים בהתבסס על מידע הנלקח ממיקרו-המבנה של החומר.



ISC44 – פרופ' Dolbow מעביר את הרצאת הפתיחה.

הרצאות שניתנו בימי העיון ה-44 וה-45 השתתפו בתחרות ההרצאה המצטיינת לשנת 2018. במסגרת זו נבחרה ביום

מכאניקה חישובית היא דיסציפלינה בה משתמשים בשיטות חישוביות על מנת לקבל פתרון למשוואות השולטות בתופעות מכאניות שונות. במכאניקת המוצקים מודל קונסטטיטוטיבי המקשר בין שדות העיבורים וקצב העיבורים (לפעמים כוללות בטמפרטורה או במשתנים פנימיים אחרים) לשדה המאמצים הינו חלק אינטגרלי מהמשוואות השולטות. מודלים אלו יכולים להיות פנומנולוגים (תצורות פונקציונאליות שנבחרו כך שיתאימו לתוצאות ניסויים) ו/או מבוססי פרמטרים חומריים כגון גודל גרעין, כיווניות שריג, תצורה שכבתית וכו'.

בעלון הנוכחי מובא מאמר מעניין אשר מציג שילוב של פרמטר מיקרו-מבני (צפיפות נקעים מקומית) על מנת למדל זרימה פלסטית תחת קצבי עמיסה גבוהים.

לסיום, במסגרת יום העיון ה-45 בחרה אסיפת חברי אישח"מ לצרף את כותב שורות אלו לועד המנהל של אישח"מ (מחליף את דר' רמי בן-צבי ממכון וויצמן למדע שפורש לגמלאות). זה המקום להודות לדר' בן צבי על שנים רבות של עשייה בועד המנהל. אני שמח על האפשרות לתרום לקהילת המכאניקה החישובית בישראל ומודה לחברי האיגוד על הזדמנות זו.

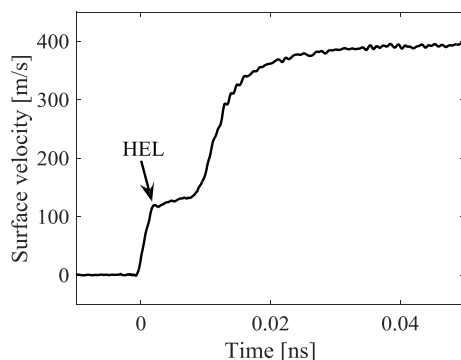
כמו תמיד, אשמח לשמוע מכל אחד ואחת מחברי האיגוד בנוגע לתכנים אשר הם היו מעוניינים לראות מופיעים בעלון. אנא פנו אלי במייל בכל שאלה או הצעה.

אתם מוזמנים לבקר באתר האיגוד בו תמצאו מידע על האיגוד ועל מכאניקה חישובית בארץ ובעולם <http://www.iacmm.org.il>. באתר תוכלו לצרף עצמכם (ללא תשלום) לרשימת התפוצה האלקטרונית, להירשם כחברים באיגוד או לחדש את חברותכם. טופס רישום לאיגוד ניתן למצוא ב <http://www.iacmm.org.il/member>

תהיה מישורית. האצת דיסקת הקליע מבוצעת לרוב בעזרת תותח או על ידי פיצוץ חומר נפץ. כאשר דיסקת הקליע פוגעת בדסקת המטרה, במהירות של מספר מאות מטרים לשנייה, גל לחץ מתקדם ממישור הפגיעה לתוך המטרה והקליע. גל לחץ זה הינו למעשה גל הלם אשר דוחס ומאיץ את החומר בתוך דסקת המטרה. לאורך הניסוי, אשר נמשך מספר מיקרושניות בודדות (מהירות גל המאמץ האופיינית למתכות הינה מסדר גודל של 5 ק"מ לשנייה), מודדים את מהירות מרכז השפה החופשית על המטרה בצד המרוחק ממישור הפגיעה U_x . לרוב מדידת מהירות זאת מבוצעת בעזרת אינטרפרומטריית לייזר (VISAR או PDV) ברזולוציה זמנית של ננו-שניה ומטה. היסטורית מדידת מהירות אופיינית מוצגת באיור 1. משימור תנע ניתן לחלץ את המאמץ בחומר מתוך מדידת המהירות לפי:

$$\sigma_x = \frac{1}{2} \rho_0 c_0 U_x \quad (1)$$

כאשר ρ_0 ו- c_0 הן הצפיפות ומהירות הקול האורכית בחומר לפני מעבר ההלם. מתוך מדידות המהירות ניתן לאפיין תכונות חוזק דינמי ואנחנו נתמקד במאמץ הכניעה הדינמי אשר נמדד מתוך ממהירות השפה האחורית לאחר העלייה החדה המכונה Hugoniot Elastic Limit ומסומנת בחץ באיור 1. ממהירות השפה החופשית בנקודה זאת ניתן לחשב את המאמץ על פי משוואה (1), בו ניתן לראות כמאמץ הכניעה בלחיצה בעיבור חד צירי בתנאי קצב עיבור גבוה.



איור 1 - היסטורית מהירות שפה חופשית בניסוי פגיעת דסקה. מתוך [1].

למרות השימוש הרחב בניסויים אלו ככלי מקובל למדידת חוזק דינמי של חומרים בקצבי עיבור גבוהים, עדין קיימות מספר תופעות בניסויים אלו אשר אינן מוסברות באופן מלא ובפרט לא מתוארות בחישובים נומריים:

א. דעיכת הגל האלסטי: כאשר מבצעים ניסוי פגיעת דסקה בתנאי פגיעה זהים (סוג הקליע ומהירות הפגיעה) אבל בעובי מטרה שונים, מקבלים שמאמץ הכניעה הדינמי הנמדד תלוי בעובי המטרה והוא גדול יותר במטרות דקות מאשר במטרות עבות. חשוב לציין שתופעה זאת אינה קשורה באופי יצור המטרות והיא מתקבלת גם כאשר מקפידים לייצר את המטרות מאותו חומר גלם.

ב. בניסויים במתכות עם מבנה גבישי קובי ממורכז גוף (BCC) נצפית תופעה של "שיא ועמק" או מאמץ HEL כפול כפי שמוצג באיור 2. כלומר, בפינוח פשטני מתקבל מאמץ כניעה גבוה יחסית ומיד לאחריו (בעיבור קטן מאוד) המאמץ נופל עד כדי חצי מהערך הראשון.

העיון ה-44 הרצאתו של ד"ר יניב בריק כהרצאה מצטיינת בעוד ביום העיון ה-45 נבחרה הרצאתו של מר רומן קוסיצקי (סטודנט של פרופ' דן מרדכי מהטכניון). הרצאה זו של מר קוסיצקי נבחרה גם כהרצאה המצטיינת לשנת 2018. ברכות לד"ר בריק ולמר קוסיצקי על זכייתם במקום השני והראשון בהתאמה. תעודות הוקרה לזוכים יוענקו ביום העיון ה-46. זה המקום גם להודות למר קוסיצקי ופרופ' דן מרדכי על כתיבת המאמר הקצר המופיע בעלון זה ומתאר את המחקר הזוכה.

ISCM-46

יום העיון ה-46 יתקיים ב-4 לאפריל 2019, בביה"ס להנדסה מכאנית באוניברסיטת תל-אביב (המארגנים המקומיים הם פרופ' יצחק הררי, פרופ' סלבה קרילוב, ופרופ' זהר יוסיבאש). המרצה המוזמנת היא Prof. Barbara Wohlmuth, head of the numerical analysis institute, Technical University of Munich. פרטים נוספים ניתן למצוא באתר האיגוד ובהודעות לתפוצה.

מודל חוזק מבוסס נקעים לתיאור עמיסות הלם

רומן קוסיצקי, דן מרדכי
הפקולטה להנדסת מכונות. הטכניון.
romanko@campus.technion.ac.il

הקדמה

מעוות פלסטי מהיר מאפיין מגוון תהליכים דינמיים בעלי חשיבות בישומים אזרחיים וצבאים כאחד. לדוגמא, בהתנגשות של רכבים, בעיבוד שבבי מהיר, בחדירת קליעים למטרות וכו'. הניסיון מלמד שרוב המתכות מגיבות בצורה שונה לעמיסה דינמית מהירה ביחס לעמיסה איטית. לרוב, מתכות מפגינות חוזק גבוה יותר, ללא שינוי משמעותי בתכונות האלסטיות ולעיתים גם ללא פגיעה במשיכות. בכדי להבין, לתאר ואולי אף לשלוט בתכונות החומר בתנאי העמסה מהירים אנו נדרשים למודלים המתארים את החוזק של המתכת בקצבי העיבור הרלוונטים.

הרצון והצורך לתאר את החוזק הדינמי של מתכות כמובן אינו חדש. ב-30 השנים האחרונות פותחו מספר רב של מודלי חוזק (strength models) כאשר רוב המודלים שבסופו של דבר יושמו בתוכנות החישוב הפופולריות הם מודלים פנומנולוגים. דוגמאות למודלים כאלה הם מודל Johnson-Cook, Steinberg-Guinen, Zerilli-Armstrong וכו"ב. בכל המודלים האלה מאמץ הכניעה (או הזרימה) מתואר כתלות במשתני מצב כמו עיבור, קצב עיבור, לחץ וטמפרטורה. למרות הצלחה רבה של מודלים אלו בתיאור תצפיות ניסויים, עדיין קיימות מספר תופעות אשר מודלים אלו לא מצליחים לשחזר. בנוסף, בגלל האופי הפנומנולוגי של המודלים, הם תורמים באופן מצומצם בלבד (אם בכלל) לתיאור והבנת המנגנונים המיקרומכאניים השולטים בדפורמציה פלסטית של המתכת.

ניסוי פגיעת דיסקה (Plate impact)

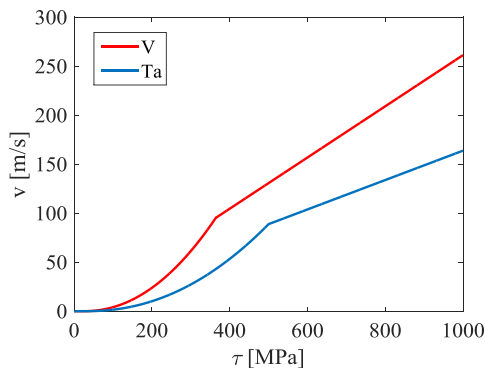
אחת משיטות הניסוי הנפוצות לחקר התכונות המכניות הדינמיות של חומרים היא ניסוי פגיעת דיסקה. בניסוי זה מאיצים דיסקת קליע לעבר דיסקת מטרה כך שהפגיעה

תהליך יצירת נקעים חדשים תחת הפעלת מאמץ הינו תהליך של שפעול תרמי ולכן נתאר אותו על ידי מודל נוקליאציה קלאסי בו קצב עליה בצפיפות הנקעים (ρ) תלוי בטמפרטורה (T) ומאמץ הגזירה (τ) לפי:

$$\dot{\rho} = A \exp\left(-\frac{E_0 - V\tau}{k_b T}\right) \quad (3)$$

אנו מניחים שמחסום האנרגיה קטן לינארית עם מאמץ הגזירה, כאשר E_0 הוא מחסום האנרגיה ללא מאמץ, V הוא נפח השפעול ליצירת נקעים ו- A הוא קבוע שקשור לקצב יצירת הנקעים וגודלם ההתחלתי.

כעת משיש בידנו תיאור של מהירות הנקעים כתלות במאמץ וכן תלות צפיפות הנקעים במאמץ יש לנו תיאור מלא של קצב העיבור הפלסטי כתלות במאמץ ונשלבם במודל אלסטו-ויסקופלסטי.



איור 3 - מהירות תנועת נקע כתלות במאמץ בטמפ' 300K. מתוך [3].

תאור זרימה פלסטית בעזרת משוואות קצב

מכיוון שהתהליך אותו אנו מבקשים לתאר הינו תהליך דינמי, נתאר את הזרימה הפלסטית בעזרת משוואות קצב. נזכור גם שהמשוואה הבסיסית לתאור הדפורמציה הפלסטית מתנועת נקעים (משוואה (2)), הינה למעשה משוואת קצב. ראשית, נטפל באופן נפרד ברכיב הנפחי (הידרוסטטי) וברכיב הדו-איטורי של טנזור המאמצים

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij} \quad (4)$$

הרכיב ההידרוסטטי מחושב על סמך משוואת מצב הקושרת בין העיבור הנפחי (או צפיפות החומר) והאנרגיה (או הטמפרטורה) ללחץ.

$$\frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij} = -P = f(\epsilon_{kk}, T) \quad (5)$$

לדוגמה בעזרת משוואת מצב לפי Mie-Grüneisen:

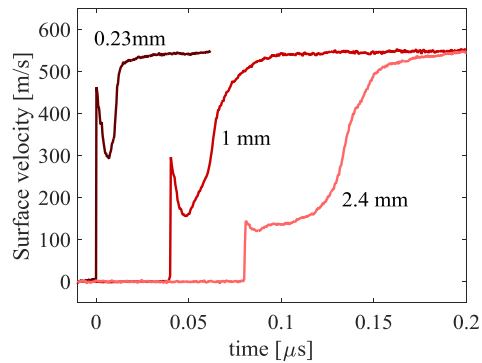
$$\frac{P\rho_0 c_0^2 \left(1 - \frac{\Gamma}{2}\epsilon_v\right)}{(1 - s\epsilon_v)^2} + \Gamma\rho_0 c_v (T - T_0) \quad (5)$$

כאשר s ו- Γ הם קבועי החומר המתארים את משוואת המצב ו- c_v הוא קיבול החום הסגולי.

טנזור המאמץ הדו-איטורי (S_{ij}) תלוי בטנזור העיבור האלסטי הדו-איטורי (d_{ij}^e) ומודול הגזירה (G)

$$S_{ij} = 2Gd_{ij}^e \quad (6)$$

אולם העיבור האלסטי אינו ידוע היות ומתוך משוואות הקינמטיקה ידוע רק העיבור הכולל ובהתאם רק העיבור הדו-איטורי הכולל (d_{ij}). ולכן נכתוב את רכיבי טנזור המאמץ הדו-איטורי באופן הבא:



איור 2 - מהירות שפה חופשית מפגיעה בוונדיום (V) ב-3 מטרות בעובים שונים. ניתן לראות בברור את ה"שיא ועמק" ודעיכת הגל המקדים. מתוך [1].

ג. לרוב עיבור פלסטי של מתכת גורם להקשיית מעוותים (Work Hardening) ומעלה את מאמץ הכניעה של המתכת בהעמסה סטטית. אולם בהעמסה דינמית בניסויי פגיעת דסקה נמצא שדווקא מתכת מורפית (annealed) מפגינה חוזק גבוה יותר ביחס למתכת זהה שעברה עיבור פלסטי מקדים ולא הורפתה.

מודלים חומריים מקובלים אינם מאפשרים לשחזר את התצפיות הניסיוניות, ותופעות אלו, אשר סותרות את האינטואיציה לגבי התנהגות החומר על סמך הידוע לנו בהעמסה סטטית, מצריכות פיתוח מודל פיסיקלי אשר יהיה מסוגל לתאר ולהסביר את הניסויים. בעבודה זאת אנו מבקשים להציג מודל חוזק מבוסס נקעים לתיאור הדפורמציה הפלסטית בקצבי עיבור גבוהים.

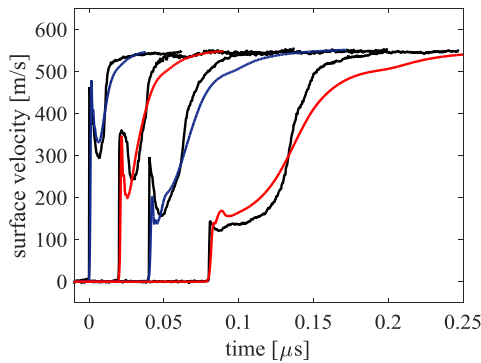
השפעת תכונות נקעים על קצב העיבור הפלסטי

המנגנון המיקרומכאני המשמעותי ביותר שאחראי על דפורמציה פלסטית במתכות הוא תנועת נקעים. נקעים הם פגמים קווים בתוך המבנה הגבישי (השריג). ניתן להניע את הנקעים על ידי הפעלת מאמץ גזירה על מישור בגביש וכך לייצר מעוות גזירה פלסטי. חוק Orowan קושר את מהירות תנועת הנקעים (v), צפיפות הנקעים (ρ) ווקטור בורגרס של הנקעים (b) לקצב העיבור הפלסטי:

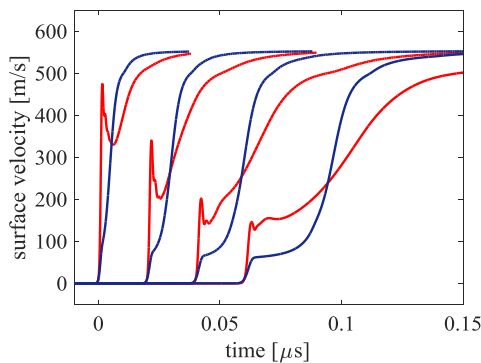
$$\dot{\gamma} = \rho b v \quad (2)$$

מהירות תנועת הנקעים הינה פונקציה של מאמץ הגזירה הפועל על הנקע (τ). מתוך חישובי דינמיקה מולקולרית אפשר למדוד את תלות מהירות הנקע במאמץ הפועל עליו. דוגמא למדידה שכזאת עבור שתי מתכות עם מבנה BCC מוצגות באיור 3.

לרוב, ביישום חוק Orowan מניחים צפיפות נקעים קבועה ולכן נותר רק לטפל בקשר בין מהירות הנקע למאמץ. אולם, בתנאי העמסה בקצב גבוה, ההנחה שצפיפות הנקעים נותרת קבועה כבר אינה קבילה. בהינתן קצב עיבור גבוה מספיק וצפיפות נקעים נמוכה, לא יכול להתפתח קצב עיבור פלסטי מספיק כדי לשחרר את מאמצי הגזירה. אם מאמצי הגזירה גבוהים דיים כדי לאפשר יצירת נקעים חדשים, צפיפות הנקעים גדלה ובהתאם גדל קצב צבירת העיבור הפלסטי שגורם לירידה במאמץ הגזירה. תופעה זאת מודגמת בצורה מובהקת בחישובי דינמיקה מולקולרית בהם צפיפות הנקעים ההתחלתית אפסית והמאמצים מספיק גבוהים כדי ליצור לולאות נקעים [2].



איור 5 - עקומות מדודות (שחור) ומחושבות עבור ניסויי ונדיום. בכחול עקומי הכיול ובאדום התיקוף



איור 6 - השוואה בחישוב בין חומר מורפה עם צפיפות נקעים התחלתית של 10^7 cm^{-2} (אדום) לחומר שלא עבר הרפיה ועם צפיפות התחלתית של 10^{10} cm^{-2} (כחול).

E. B. Zaretsky and G. I. Kanel, J. Appl. Phys. 115, 243502 (2014). [1]
 R. Kositski, D. Steinberger, S. Sandfeld, and D. Mordehai, Comput. Mater. Sci. 149, 125 (2018). [2]
 N. R. Barton, J. V. Bernier, R. Becker, A. Arsenlis, R. Cavallo, J. Marian, M. Rhee, H. S. Park, B. A. Remington, and R. T. Olson, in J. Appl. Phys. (2011). [3]

$$S_{ij} = 2Gd_{ij}^e = 2G(d_{ij} - \gamma_{ij}) \quad (7)$$

כאשר γ_{ij} הוא טנזור העיבור הפלסטי (שהינו רק בעל רכיב דיאטורי בהגדרה). כעת אם נגזור את המשוואה הנ"ל נוכל לקבל את משוואת קצב שינוי המאמץ

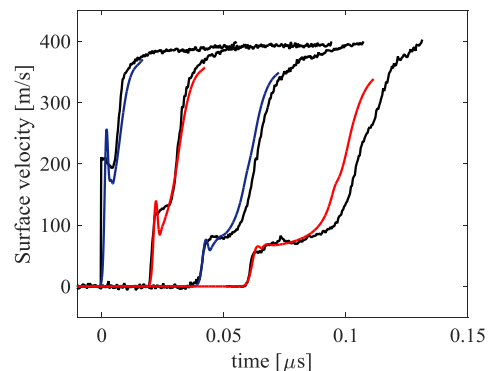
$$\dot{S}_{ij} = 2G(\dot{d}_{ij} - \dot{\gamma}_{ij}) \quad (8)$$

נזכור שאת קצב שינוי העיבור הפלסטי ניתן לתאר בעזרת משוואת Orowan (משוואה (2)), שקשורה למהירות הנקעים, הנקבעת לפי המאמץ, ולצפיפות הנקעים, שקצב השינוי שלה נקבע לפי המאמץ גם כן (משוואה (3)). המודל האלסטו-ויסקופלסטי מבוסס נקעים הזזן לתוך פותרן הפרשים סופיים חד ממדי, המאפשר חישוב דינמי ותאור התקדמות גלי המאמצים המתקיים בניסוי התנגשות הדיסקות.

תוצאות

במודל המתואר למעלה יש שלושה פרמטרי כיוול, E_0, V, A . כיוול פרמטרי מודל הנוקלאציה בוצע ע"י אופטימיזציה בכדי להתאים להיסטורית המהירות המדודה בשני עובי מטרה עבור Ta ועבור V שעברו הרפיה מתוך הניסויים ב-[1]. איור 4 מציג תוצאות ניסויים וחישובים בטנטלום ואיור 5 בוונדיום כאשר הקווים הכחולים הם חישובים לכיול הפרמטרים והאדומים הם חישובי התיקוף.

ניתן לראות שהחישוב מצליח לשחזר בצורה טובה את המאפיינים המרכזיים אשר חסרים בפתרונות עם מודלי חוזק "קלאסיים". במיוחד, המודל מתאר את "השיא והעמק" וכן את דעיכת הגל המקדים. על סמך המודל והחישובים נוכל כעת לתת הסבר לתופעות ובפרט "לשיא". החומר מועמס בקצב גבוה אשר גורם לעיבור כולל גבוה. היות ואין מספיק נקעים כדי לייצר עיבור פלסטי מתקבלים מאמצים גבוהים. מאמצים גבוהים אלו מגדילים מהר מאוד את צפיפות הנקעים, אשר בתורם תורמים לעיבור הפלסטי ולהנחתה של המאמץ. כאשר יש מספיק נקעים, לדוגמה בחומר שעבר עיבוד פלסטי מקדים, העיבור הפלסטי המתפתח מספיק לשחרר מיד את המאמץ ובהתאם לא מתקבלים "השיא והעמק" כפי שמוצג איור 6. תאור זה גם מסביר את העובדה שבקצב עיבור גבוה מתכת BCC שעברה הרפיה תהיה חזקה יותר וזה בניגוד למצב בהעמסה קוויזיסטטית. כאשר יש מספיק נקעים התחלתיים מתפתח עיבור פלסטי מספק לשחרור המאמץ בעוד בהעמסה קוויזיסטטית לנקעים "יש מספיק זמן" לנוע בכל מקרה וצפיפות נקעים גבוהה בתחילת ההעמסה מייצרת התנגדות לתנועה של הנקעים וכך לחוזק גבוה יותר.



איור 4 - עקומות מדודות (שחור) ומחושבות עבור ניסויי טאנטלום. בכחול עקומי הכיול ובאדום התיקוף