

רקע תיאורטי

נספח א' עבור ניסוי מתיחה:

נספח א' : בדיקות מכניות של חומרים

1. מטרת הנספח:

מטרת הנספח היא להכיר את העקרונות והמשמעות של בדיקת מתיחה. בדיקה זו היא המקובלת ביותר בהנדסת חומרים, בהנדסת מכונות ובבקרת איכות תעשייתית.

רקע תיאורטי

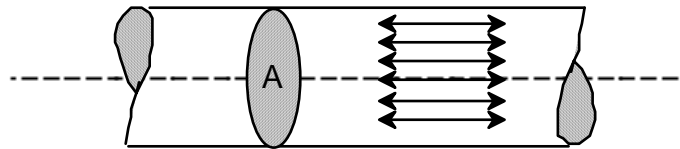
2. בדיקות קוואזוסטטיות

בבדיקות קוואזוסטטיות מפעילים על דגם עומס המשתנה באיטיות עם הזמן. זמן ההשהיה של העומס קצר יחסית, כלומר בין מספר דקות למספר שעות, לכן ההתנהגות המכנית של חומר כלשהו בבדיקה כזו נקבעת בעיקר מהגודל והגיאומטריה של הכוחות המופעלים ומושפעת יחסית מעט ממהירות ההעמסה או ממשך זמן הפעלת העומס. ההפך הוא בבדיקות דינמיות אשר אינן נכללות בדיון שלנו. לפי עקרונות אלו נרשמות בדיקות מתיחה, לחיצה, כפיפה, פיתול ובדיקות גזירה אמיתיות.

בדיקת מתיחה

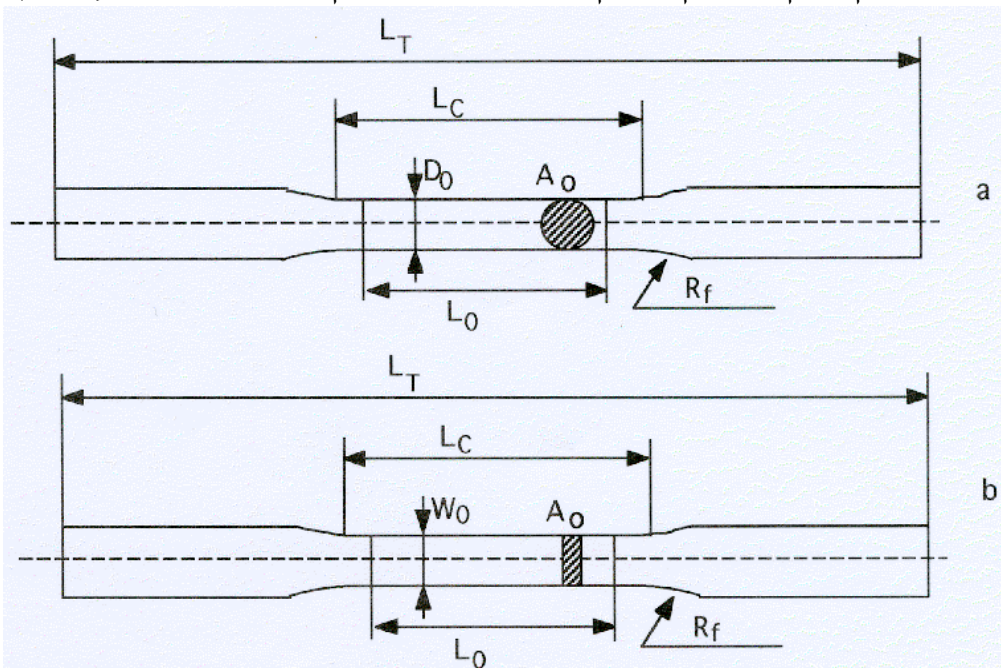
3. מטרה וקוים כלליים

מטרת בדיקת המתיחה היא להעריך את החוזק המכני ועצוב החומר, כאשר דגם מיצג וסטנדרטי של החומר נמתח על ידי כוח מתיחה צירי על שטח חתך הדגם (ציור 1)



ציור 1 הגיאומטריה של בדיקת מתיחה

בציור 1 אנו רואים בדיקת מתיחה צירית על כל החתך A, הניצב לציר הדגם. באופן מעשי דגם עגול או מלבני מעובד לצורה סטנדרטית (ציור 2) ותפוס באופן צירי בתפסניות של מכשיר מתיחה. מתקן הנעה המסוגל להעלות את כוח המתיחה (כוח "משיכה") מחובר לאחת התפסניות כשהתפסנית השנייה מחוברת לקורה קבועה. לקורה הקבועה מחובר מכשיר לקריאת כוח המתיחה (ציור 3).



ציור 2 : הצורות והמידות החשובות של דגם מתיחה סטנדרטי

a - דגם עגול.

b - דגם שטוח.

L_0 - אורך מדוד.

L_c - אורך בעל שטח חתך קבוע.

A_0 - שטח חתך.

R_f - רדיוס הכתפיים.

D_0 - קוטר הדגם (בדגם עגול).

W_0 - רוחב החתך בדגם המלבני.

עם הפעלת המכונה, העומס על הדגם עולה באופן הדרגתי וכתוצאה מכך הדגם נמתח. נפח הדגם נשאר קבוע מבחינה מקרוסקופית, כך שהחתך קטן כשאורך הדגם גדל. בשלב א' (ציור 3) הן ההתארכות של הקטע המדוד והן ההקטנה בשטח החתך אחידות. לכן משוויון הנפחים לפני ואחרי ההתארכות מקבלים:

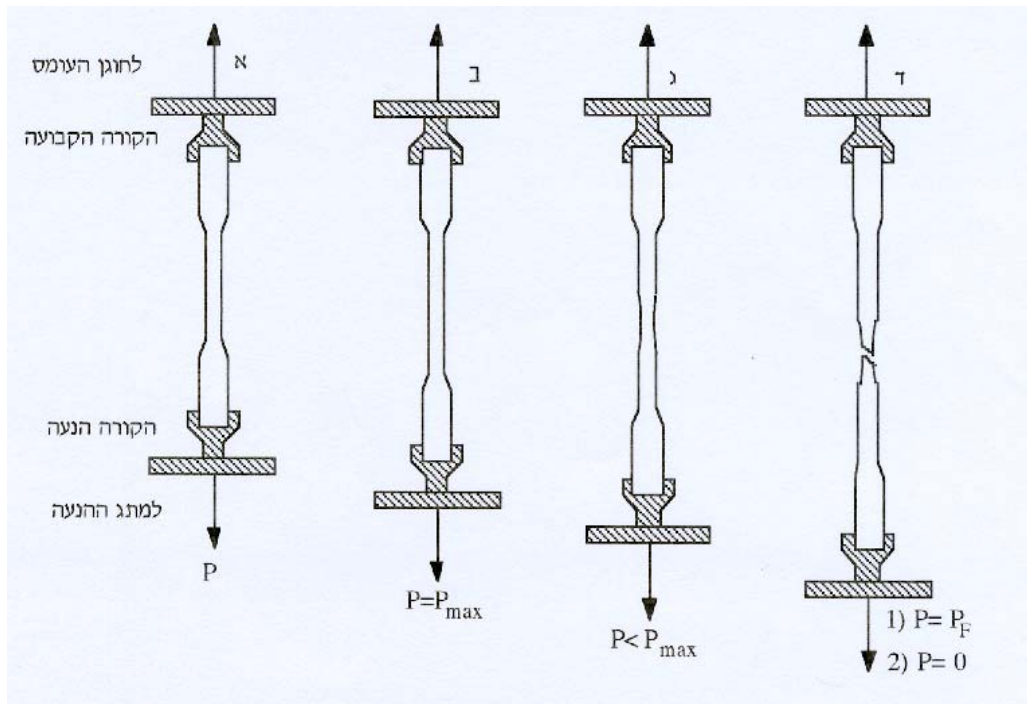
$$(1) \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \frac{A_0}{A_0 - \Delta A_0}$$

כאשר ΔL - השינוי באורך

ΔA_0 - השינוי בשטח החתך

בשלב ב' ההתארכות האחידה מגיעה לסופה וזהו העומס המקסימלי אשר הדגם מסוגל לסבול (P_{max}). בשלב ג' הדגם נכנס למצב של אי יציבות פלסטית המתבטאת בהתארכות והצרה בשטח חתך מקומי בחלק קטן מהאורך המדוד. דפורמציה מקומית זו נקראת "צוואר".

כשמתקבל ה"צוואר" העומס הדרוש ליצירת מתיחה נוספת נופל מתחת ל- P_{max} ככל ששטח החתך קטן ב"צוואר".



ציור 3 : השלבים האופייניים בניסוי מתיחה של חומר מתכתי משיך.

בשלב ד' קריעת הדגם נעשית ב"צוואר" בעומס קריעה P_F . עם קריעת הדגם מעגל העומס נפתח והעומס נופל ל-0 כל מכוונת ניסוי מכנית מצוידת במכשיר מדידת העומס (מסוג לחץ, מכני או חשמלי) אשר מאפשר קריאת העומס על ידי סקלה או מעביר את הקריאה לרשם X-Y. במספר מכוונות ההתארכות מועברת אוטומטית, כלומר הקורה הנעה מפעילה חוגן או מניעה את קואורדינטת ההתארכות ברשם X-Y. במכוונות אחרות ההתארכות נמדדת על ידי מכשיר חיצוני אשר מודד את הגדלת המרחק בין שתי נקודות מסומנות על הדגם. המכשיר למדידת ההתארכות יקבע לפי משיכות החומר הנבדק, אורך הדגם והדיוק הדרוש. הוא יכול להיות קליבר, מיקרומטר, מיקרומטר עם שעון קריאה ל- 1×10^{-2} או 1×10^{-3} מ"מ, אקסטנסומטר אופטי או אלקטרוני עם קריאה ל- 1×10^{-4} מ"מ או אפילו רגיש יותר. את הכוח הנמדד במשך הבדיקה רושמים בתלות ההתארכות (המדידה מתבצעת תחת עומס), גרף עומס ההתארכות ($P-\Delta L$) מתקבל. גרף זה מאפיין את כושר ההעמסה וכך נבדקים החוזק המכני והעיצוב (שנוי בצורה ובמידות) של הדגם.

4. עקומת מתיחה הנדסית

דגמים בעלי גיאומטריה שונה מאותו חומר יניבו עקומות מתיחה $P-AL$ שונות. לכן על מנת לאפיין את ההתנהגות המכנית של החומר הנבדק ולא של דגם מסוים ולהשוות תוצאות של בדיקות אשר בוצעו עם דגמים

בעלי צורות או מידות שונות, יש לצייר מחדש את עקומת עומס ההתארכות בקאורדינטות של מאמץ הנדסי (S) ומעוות הנדסי ליניארי (l). מגדירים מושגים אלו כך:

$$(2) S = \frac{P}{A_0}$$

$$(3) l = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$(3a) l = \frac{\Delta L}{L_0} 100\%$$

בהרבה מקרים מבטאים את l כמעוות ליניארי יחסי או התארכות יחסית.

כאשר:

L_0 - אורך התחלתי.

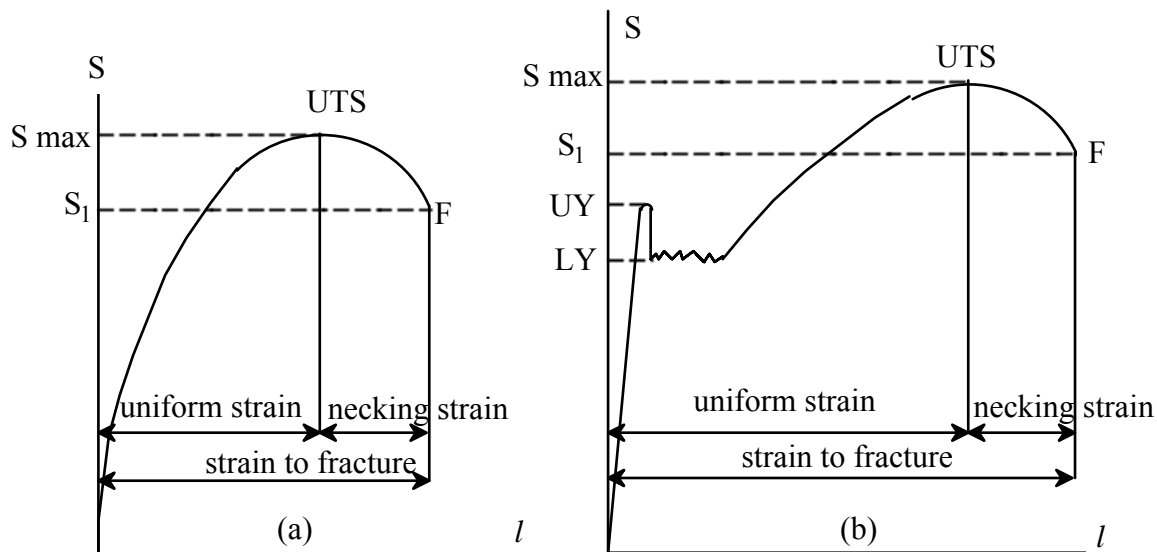
A_0 - שטח חתך התחלתי.

$L_0 + \Delta L = L$ - אורך הדגם ברגע כלשהו של הבדיקה.

P - העומס המתאים ל-L ברגע כלשהו.

העקומה המצוירת בקאורדינטות S ו-l נקראת עקומת מתיחה הנדסית או עקומת מאמץ מעוות הנדסית של החומר הנבדק. בספרות משתמשים לפעמים במושגים "נומינלית" או "מוסכמת" במקום "הנדסית". נוסחאות (2) עד (3a) מראות שלעקומות מאמץ מעוות הנדסית יש הצורה הכללית של עומס התארכות המוזכרת קודם, היות וקאורדינטות הקודמות $P-AL$ הוכפלו במקדמים קבועים שהם: $1/A_0$; $1/L_0$ בהתאמה. כלומר בבדיקות מתיחה שגרתיות בהם נבדקים דגמים בעלי מידות זהות למען השוואה לתקן איכות כלשהו, אפשר להשתמש בעקומת $P-AL$ כמו שהיא.

ציור 4 מדגים את שתי הצורות העיקריות של עקומות מתיחה הנדסיות לחומרים מתכתיים משיכים.



ציור 4 : הצורות העיקריות של עקומות מאמץ מעוות הנדסיות לחומרים מתכתיים משיכים.

(a) - כניעה רצופה,

(b) - כניעה בלתי רצופה (נקודת כניעה).

U.T.S - מאמץ מתיחה מקסימאלי. (Ultimate Tensile Strength)

F - מאמץ קריעה. (Fracture)

U.Y - מאמץ כניעה עליון (נקודת כניעה עליונה). (Upper Yield)

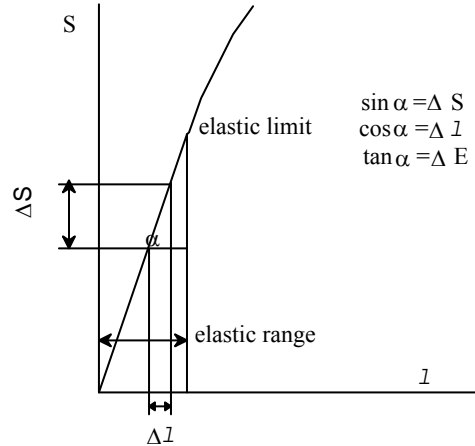
L.Y - מאמץ כניעה תחתון (נקודה כניעה תחתונה). (Lower Yield)

5. דפורמציה אלסטית

אנו רואים שבציור 4 החלק ההתחלתי של עקומת ההתארכות הוא ליניארי ומתאפיין על ידי שיפוע חד יחסית, זאת אומרת שבתחום הזה תוספת קטנה של מעוות ΔL דורשת תוספת מאמץ יחסית גדולה (היחס בין S ו- L הוא ליניארי). עובדות אלו מתבטאות על ידי חוק הוק.

$$(4) S = E \Delta L$$

כאשר קבוע הפרופורציונליות E הוא קבוע של החומר ונקרא מודול אלסטיות או מודול יאנג. המעוות הליניארי אשר מופיע בתחום $S-L$ בעקומת המתיחה (ראה נוסחה (4)) נקרא מעוות אלסטי או דפורמציה אלסטית: מעוות זה נעלם מיד עם שחרור העומס. אפשר להסתכל על המודול E כעל מאמץ אשר גורם למעוות אלסטי אשר ערכו הוא אחד. במובן גיאומטרי, E מוגדר כשיפוע של עקומת מאמץ מעוות בתחום האלסטי (ציור 5).



ציור 5 : התחום האלסטי של עקומת מתיחה (כניעה רצופה)

טבלה 1 : ערכים של מודול יאנג לכמה מתכות וסגסוגות טכנולוגיים

החומר	טוהר החומר	$E[\text{Kgf/mm}^2] * 10^3$
אלומיניום	נקיון כימי	7.19
סגסוגות אלומיניום	מסחר	7.0 ÷ 8.1
נחושת	ללא חמצון מוליכות גבוהה	12.5
נחושת	מסחרי	12.0 ÷ 12.7
פליז	אבץ % (30 , 40)	10.2 ÷ 11.2
ברזל יציקה	פחמן % (2.7 , 3.6)	9.15 ÷ 14.8
פלדה	פחמנית Low-Alloy	19.7 ÷ 22.5
פלדה אל-חלד	18% כרום 8% ניקל	19.7 ÷ 21.1
טיטניום	ניקיון כימי	10.8
סגסוגת טיטניום	מסחרי	10.8 ÷ 11.7
מגנזיום	ניקיון כימי	4.52
טונגסטן	ניקיון כימי	39.6

מודול יאנג הוא מדד של קשיחות החומר. ככל שהמודול גבוה יותר המעוות האלסטי המתאים למאמץ מסוים יהיה נמוך יותר. אנו רואים מטבלה 1 ש- E של פלדות הוא כשלוש פעמים גבוה יותר מאשר E של אלומיניום או סגסוגות אלומיניום. כלומר שהמעוות האלסטי של דגם או מבנה מאלומיניום יהיה כשלוש פעמים גדול מהמעוות האלסטי של דגם או מבנה מפלדה תחת מאמצים צירים שווים המופעלים עליהם. מודול האלסטי נקבע על ידי כוחות בין אטומיים אשר אינם משתנים ללא שנוי האופי היסודי של המתכת. המסקנה היא ש- E מושפע רק מעט מתוספת סגסוגות, טיפול תרמי או עיבוד קר, לכן מגדירים לעיתים את E ואת סגולות האלסטיות האחרות של מתכות, כסגולות שאינן רגישות מבנה, לעומת זאת E עלול להשתנות כתוצאה משינוי במבנה הגבישי, למשל מעבר אלוטרופי היות וזה משנה את האופי היסודי של החומר.

6. מעבר מהתנהגות אלסטית להתנהגות פלסטית - הכניעה הפלסטית

נחזור לציור 4. נראה שמעבר למאמץ גבולי מסוים, התלות של המאמץ במעוות כבר אינה ליניארית, כלומר הגרף S-l מתכופף לכוון הציור 1. יתר על כן, מעוות הדגם כבר לא נעלם לגמרי עם שחרור העומס. המעוות האלסטי

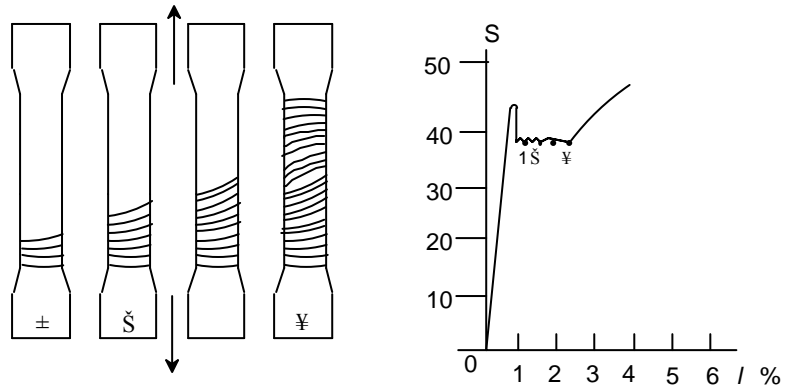
הטהור נעלם אך בדגם נשאר מעוות קבוע ומסוים אשר נקרא מעוות פלסטי (מעוות שיורי). החומר נכנס לתחום של דפורמציה פלסטית או של זרימה פלסטית. תופעה זו נקראת כניעה פלסטית. המאמץ הגבולי המסמן את תחילת הדפורמציה הפלסטית נקראה גבול האלסטי ומוגדר כמאמץ המקסימלי אשר החומר מסוגל לסבול בלי מעוות צירי כלשהו אחרי שחרור העומס.

ב-**ציור 4a** הכניעה הפלסטית היא כל כך הדרגתית עד שאין אפשרות להגדיר גבול אלסטי מוחלט. הערך המעשי של הגבול האלסטי תלוי בצורה קריטית ברגישות של שיטת המדידה: ככל שהשיטה רגישה יותר, הערך הניסיוני של הגבול האלסטי יהיה נמוך יותר. יתרה מזאת, המטלורגיה המכנית המתקדמת קבעה שהכניעה הפלסטית מתחילה כמיקרו מעוותים ברמה של המבנה האטומי של המתכת, זאת אומרת מתחת לכושר ההבחנה של המכשור הרגיש ביותר אשר ניתן להשגה בימינו בענף הבדיקות המכניות. אי לכך גבול אלסטי מוחלט לא ניתן למדידה במציאות. הוא נשאר בכל זאת מושג תיאורטי שמושי במטלורגיה מכנית מתקדמת.

הסוג השני של עקומת מאמץ מעוות (**ציור 4b**) מראה כאילו כניעה חדה כשמשתמשים בציוד בדיקה ומדידה מסחריים באיכות גבוהה. המאמץ גדל באופן ליניארי עם המעוות האלסטי, נופל באופן פתאומי ונשאר כמעט קבוע ולאחר מכן עולה עם המעוות בעקומה דומה לעקומות S-l עם כניעה רצופה. המאמץ אשר מתאים לנפילה הפתאומית נקרא נקודת כניעה עליונה U.Y.

המאמץ אשר כמעט קבוע נקרא נקודת כניעה תחתונה L.Y. והמעוות שנוצר במאמץ הקבוע נקרא התארכות בנקודת כניעה או מעוות של "Luders". שיטות ניסיוניות משוכללות אשר הופעלו בנסויי מתיחה של חומרים עם כניעה בלתי רציפה הראו שגם במקרה זה מופיע מיקרו מעוות לפני נקודת כניעה עליונה שהוא קדם כניעה והניתן למדידה עד הרגישות של $10^{-6} (2 \div 1)$. כלומר ה-U.Y אינו גבול אלסטי אמיתי של החומרים עם כניעה בלתי רצופה.

כניעה בלתי רצופה נובעת מדפורמציה בלתי אחידה של החומר ותופעה זו אפשר להבליט בעזרת דגמים שטוחים עם פני שטח מלוטשים. בעת ההגעה לנקודת כניעה עליונה מופיע פס בודד של מבנה מעוות במקום בו יש ריכוז מאמצים (חיבור הקשת של הכתף עם החלק בעל החתך הקבוע) הפס הזה מתקדם לאורך הדגם מקצה אחד אל הקצה השני וגורם להופעת התארכות בנקודת הכניעה (ציור 6). בהרבה מקרים מופיעים בבת אחת מספר פסים של מבנה מעוות וזה גורם לקפיצות קטנות של העומס באזור של ההתארכות בנקודת הכניעה (ראה את האזור "שיני משורי" בציור 4b). לפסים אלה של דפורמציה פלסטית בקפיצות קוראים פסי Luders.



ציור 6: התקדמות של פס Luders בודד בדגם של פח פלדה רכה והשפעתו על עקומת מאמץ מעוות.

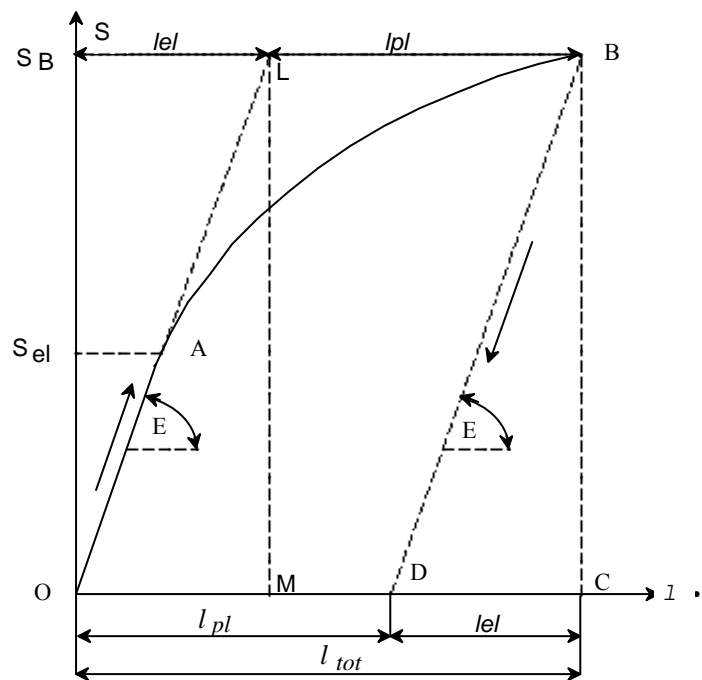
אי לכך בחומרים עם כניעה בלתי רצופה, הדפורמציה הפלסטית מתחילה במאמץ יותר גבוה מהמאמץ אשר מתאים להמשך הדפורמציה. לאחר שפסי Luders התקדמו על כל ה"אורך המדוד" (L_0 בציור 2). העומס הדרוש להתארכות אחידה מתחיל לעלות בצורה רצופה (מעבר לנקודה 4 בציור 6). תחילה מצאו את התופעה של נקודת כניעה חדשה בפלדות עם ריכוז פחמן נמוך אבל במשך הזמן מצאו תופעה זו גם במתכות ובסגסוגות אחרות. תופעה זו קשורה בדרך כלל לדיפוזיה של זיהומי חדירות Interstitial impurities כגון פחמן, חנקן וחמצן, במקרים של ברזל (פלדות), מוליבדנום, ניאוביום, טנטלום, טונגסטן, אבץ וקדמיום. או לדיפוזיה של זיהומי החלפה, במקרה של סגסוגות נחושת עם אבץ, אלומיניום, ארסן, אינדיום וסגסוגות אלומיניום עם מגנזיום ונחושת.

נקודת הכניעה העליונה איננה סגולה יסודית של החומרים מתכתיים, היא תלויה באופן קריטי מאוד ב-

1. 'קשיחות' של מכשיר הבדיקה ובזמן התגובה (אינרציה) של מכשיר מדידת העומס.
2. ההיסטוריה התרמו מכנית של החומר.
3. ההסתדרות הצירית של הדגם.
4. מהירות המתיחה.
5. טמפרטורת הסביבה.

מעבר לגבול האלסטי עם הגדלת המאמץ המופעל על הדגם המעוות המדוד תחת העומס הוא מעוות כולל אשר מכיל בתוכו תמיד גם מעוות אלסטי אשר תלוי במאמץ המופעל בהתאם לחוק הוק וגם מעוות פלסטי. ברור שהמעוות האלסטי יורד לאפס עם שבירת הדגם, לכן דגם שבור מכיל רק את המעוות השיורי שהוא מעוות פלסטי.

חלוקת המעוות הכללי למרכיבים אלסטיים ופלסטיים



ציור 7: הגדרה גרפית של המעוות הכללי (l_{tot}), המעוות האלסטי (l_{el}) המעוות הפלסטי (l_{pl}) עבור המאמץ S בנקודה B של עקומת מאמץ מעוות. S_{el} = גבול אלסטי.

בעיה שוטפת בבדיקות מכניות היא ההבחנה במרכיבים של המעוות הכולל כאשר המטרה היא קביעת מעוותים פלסטיים טהורים לפני השבירה, אפילו כשערך מדויק של הגבול האלסטי אינו ידוע. טכניקה ישירה ומדויקת להפרדת מעוות פלסטי טהור של דגם מתיחה מתבטאת באופן עקרוני על ידי ביצוע מספר פעמים של העמסת הדגם, שחרורו ומדידת ההתארכות הקבועה. מדידת ההתארכות הקבועה מתבצעת בעזרת אקסטנסומטר (Extensometer) בעל רגישות גבוהה. טכניקה זו דורשת זמן רב ומסובכת מדי לבדיקות מכניות שוטפות.

טכניקה מקובלת יותר מבוססת על "שחרור גרפי" במקום שחרור ניסיוני של העומס. גישה זו מבוססת על העובדה שברוב המקרים עקומת השחרור של דגם או חלק גדול ממנה היא קו ישר המקביל לקטע האלסטי של עקומת מאמץ מעוות. במילים אחרות לעקומת השחרור או לקטע ממנה יש שיפוע השווה בערך למודול E של החומר.

כך בציור 7: אם משחררים את העומס מנקודה B של עקומת מאמץ מעוות OAB עקומת השחרור האידיאלית תהיה \overline{BD} המקבילה לקו האלסטי \overline{OA} או לקו \overline{OL} , חשוב לציין שסגולה זו של עקומת השחרור תופסת רק במקרה של מעוותים פלסטיים קטנים בערך עד 1%. אנחנו נראה בהמשך שדווקא קביעה מדויקת של מעוותים פלסטיים קטנים היינה אחת הבעיות החשובות והקשות בבדיקות טכניות. ב-ציור 7 \overline{OC} מיצג את המעוות הכולל (l_{tot}) תחת המאמץ המופעל S_B כאשר \overline{OL} ו- \overline{DC} מיצגים את המעוות הפלסטי הטהור (l_{pl}) ואת המעוות האלסטי הטהור (l_{el}) בהתאמה. אנו רואים ש- $\overline{DC} = \overline{OM}$ כלומר המאמץ האלסטי הטהור המתאים לנקודה כלשהי B בתוך האזור הפלסטי הוא המעוות אשר המאמץ S_B היה יוצר בהתאם לעקומת מאמץ מעוות האלסטי הדמיונית \overline{OL} .

לשיטה המתוארת מעלה אשר מבוססת על קביעת מעוות פלסטי בעזרת "שחרור גרפי" קוראים גם שיטת "התזוזה" (off-set) היות ו- (lpl) מדוד כקטע מוזז הצידה על הציר של ' l ' ביחס לנקודת ה- 0.1% שלו. במקום לקבוע את המעוות הפלסטי המתאים למאמץ נתון רוצים עכשיו למצוא את המאמץ המתאים למעוות פלסטי נתון, למשל
 ל- $l=0.1\%$ [0.001 mm/mm].

הדרך היא: מודדים קטע $\overline{OD} = 0.001$ ומציירים מנקודה D קו המקביל לקו האלסטי הראשוני עד החתוך עם עקומת מאמץ מעוות. הקואורדינטה S_B של נקודת החתוך B היא המאמץ הדרוש. בהרבה מקרים מפעילים דרך זו ישירות לעקומה עומס-התארכות (P- ΔL) הראשונות בלי לצייר אותה מחדש בקואורדינטות S-l. האופי אלסטי + פלסטי של המעוות המדוד תחת עומס בהקשר לעקומות S-l עם כניעה רצופה, מתאים במידה מסוימת לעקומות S-l עם כניעה לא רציפה. אבל באופן מעשי הטכניקה של הקטע המוזז (off-set) לא כל כך שימושית בקביעת מעוותים קטנים באזור הכניעה של העקומות עם נקודת כניעה: בדרך כלל נקודת כניעה עליונה מקובלת במאמץ אשר מאפיין את הכניעה הבלתי רציפה. במקרים בודדים משתמשים בנקודת כניעה תחתונה לאותה מטרה.

7. הפרמטרים של כניעה פלסטית

הפרמטרים המאפיינים את המעבר מהתנהגות אלסטית להתנהגות אלסטית + פלסטית, עבור כל חומר גבישי וכל סוג עקומת S-l, הם הגבול האלסטי והגבול הפרופורציונלי. היום משתמשים מעט מאוד בפרמטרים אלו בהנדסה החדשה אבל הם עדיין מופיעים כמושגים קלאסיים ברוב ספרי הלימוד. ההגדרה לגבול האלסטי ניתנה בפרק "מעבר מהתנהגות אלסטית להתנהגות פלסטית". ואילו את הגבול הפרופורציונלי מגדירים כמאמץ המקסימלי אשר החומר מסוגל לסבול בלי סטייה מהתלות הליניארית בין מאמץ ומעוות.

באופן מעשי קובעים את הגבול הפרופורציונלי בשיטה גרפית על העקומה כמאמץ המתאים לנקודה הסוטה מקו האלסטי הישר. מהגדרות אלו נובע שרגישות המדידה יכולה להיות נמוכה יותר בקביעת הגבול הפרופורציונלי מאשר בקביעת הגבול האלסטי. הגבול הפרופורציונלי הוא בדרך כלל גבוה יותר מהגבול האלסטי, במקרה האידיאלי שני הפרמטרים צריכים להיות שווים. במקרים של חומרים מסוימים בעלי מבנה בלתי אחיד בצורה בולטת כגון: ברזל יציקה אפור או מתכות מסונטרות, הגבול הפרופורציונלי עלול להופיע מתחת לגבול האלסטי. במקרה של חומרים הנכנעים באופן רצוף, הגבול של האלסטיות השימושית למטרות הנדסיות מיוצג על ידי המושג חוזק כניעה.

חוזק הכניעה מוגדר כמאמץ הדרוש לבצע מעוות פלסטי טהור מסוים, לדוגמא 0.1% או 0.2% . מעוותים כאלה כה קטנים שאפשר לזהות את המאמצים המתאימים להם לגבול אלסטי מקורב. מעוותים אלו בכל זאת מספיק גדולים על מנת למדוד אותם עם רוב האקסטנסומטרים המסחריים שבאיכות טובה. יש לציין שחוזק הכניעה הוא מושג מוסכם התלוי בגודל המעוות. חוזק כניעה של 0.2% הוא המקובל ביותר בעולם ונקרא מאמץ כניעה מוסכם (Proof-Stress) בספרות הבריטית. חוזק כניעה של 0.1% מקובל בבדיקות בדיוק גבוה - ומוכר בספרות הגרמנית כגבול אלסטי הנדסי.

מקובלות שתי שיטות לקביעה ניסיונית של חוזק הכניעה אשר כבר הוזכרו בפרק קודם והן: השיטה הישירה, המבוססת על העמסת שחרור מחזוריים והשיטה הבלתי ישירה, כלומר השיטה של הקטע המוזז (Off-Set). השיטה של העמסה-שחרור מומלצת לפעמים לקביעת חוזק הכניעה 0.1% , לעומת זאת שיטת ה- (Off-Set) היא המקובלת ביותר בשביל חוזק כניעה 0.2% .

המושג ההנדסי המבטא את הגבול של התנהגות אלסטית שימושית בחומרים אשר נכנעים באופן בלתי רציף הוא מאמץ הכניעה Yield-Stress. מגדירים את מאמץ הכניעה כמאמץ המתאים לנקודת כניעה העליונה או התחתונה בהתאם לזו הבולטת יותר בגרף S-l.

ההבדל במושגים ובסמנטיקה בין "מאמץ כניעה" (מופיע בכניעה בלתי רציפה) ו"חוזק כניעה" (מופיע בכניעה רציפה), אמנם אינו מקובל על כולם, אך הנו מוצדק ומועיל. אמנם מאמץ כניעה איננו מושג יסודי אך הוא פחות שרירותי מחוזק הכניעה.

מספר תוצאות שנתקבלו בבדיקות מתיחה של נחושת טהורה מורפית, מובאות ב-טבלה 2 על מנת להדגיש את ההבדלים האפשריים בגודל בין הגבול האלסטי, הגבול הפרופורציונלי וחוזק הכניעה 0.2% .

טבלה 2: פרמטרים כניעה של נחושת

אקסטנסומטר	מדוד lpl mm/mm	מ א מ γ	
		פרמטר	ערך [Kgf/mm ²]
דגם מחקרי מיוחד	2×10^{-6}	S_{el}	= 0.02
מסחרי, רגישות גבוהה	1.1×10^{-4}	S_{pl}	= 0.4
מסחרי שגרתי	2×10^{-3}	$S_{0.2\%}$	= 2.0

8. התנהגות פלסטית והקשיית מעוותים

לאחר המעבר מהתנהגות אלסטית להתנהגות אלסטו-פלסטית המאמץ הדרוש להמשך הדפורמציה עולה, אבל בניגוד לאזור האלסטי, המאמץ והמעוות כבר אינם קשורים באמצעות קבוע יחסית פשוט (ציור 4). עליית המאמץ אומרת שהמתכת מוקשית על ידי הדפורמציה הפלסטית: הקשיה זו מוכרת כהקשיית מעוותים או הקשיית עיבוד (Work Hardening or Strain Hardening). בזמן ניסוי מתיחה מופעלים שני גורמים מתנגדים אשר קובעים את גודל המאמץ הנוצר כתוצאה ממעוות מסוים. הגורם הראשון הוא הקשיית מעוותים אשר מוביל לעליית המאמץ, והגורם השני הוא הקטנת שטח החתך כתוצאה מהתארכות הדגם אשר מוביל להקטנת המאמץ. במעוותים קטנים עליית הדפורמציה הפלסטית עם המאמץ היא איטית, זאת אומרת הקשיית המעוותים היא הגורם המתגבר (ציור 4). לעומת זאת במעוותים גדולים הדפורמציה הפלסטית יותר מהירה, עקומת $S-l$ נעשית שטוחה יותר ויותר עד לערך מקסימלי מסוים S_{max} של המאמץ הנקרא מאמץ מתיחה מקסימלי (Ultimate Tensile Strength U.T.S.) זאת אומרת שהקשיית מעוותים אינה מסוגלת לאזן בהמשך את הקטנת שטח החתך. עד ל- U.T.S. ההתארכות והקטנת שטח החתך אחידות על כל האורך L_0 של הדגם (המחזוריים של מעוות אחד בציור 4). בנקודת U.T.S. מתחילה תופעה של "חוסר יציבות פלסטית": אזור כלשהו בדגם אשר הוא קצת יותר חלש מבחינה מכנית יקבל תחת העומס המופעל התארכות קצת יותר גדולה מאשר בשאר האזורים, אי לכך, באזור המוזכר תהיה נטייה להקטנת שטח החתך והיווצרות של ריכוז מאמצים מקומי. כתוצאה מכך ההתארכות הנוספת תיווצר בעיקר באזור הזה ו"צוואר" ייווצר כפי שנראה בציור 3. מצב זה בולט על עקומת $S-l$ (ציור 4) בירידת המאמץ מעבר לנקודה U.T.S. עד לשבירה. סיבות אפשריות לחולשה המקומית אשר מובילה להיווצרות "צוואר" הן: טמפרטורות מקומיות גבוהות הנוצרות על ידי חימום אדיאבטי במשך הדפורמציה, פגמים בחומר כמו אינקלוזיות, חלקים של פזה שניה, חרירים, מקרו-סדקים וכו'.

9. התנהגות פלסטית ומשיכות

כושרו של חומר מתכתי לסבול מעוותים פלסטיים גדולים לפני השבירה נקרא משיכות. משיכות היא סגולה הנדסית חשובה: בעיבוד פלסטי של חומרים מתכתיים כגון: ערגול, חישול, כבישה וכול'. משיכות טובה מאפשרת לחומר פילוג המאמצים המרוכזים על ידי הזרימה הפלסטית: כך ניתן לעבד את החומר לצורות מסובכות ללא סדיקה או שבירה. אם החומר המתכתי מסוגל לסבול רק מעוותים קטנים אפסיים לפני השבירה כדוגמא, ברזל יציקה, מתארים את החומר כפריך או שביר. שני פרמטרים מקובלים לבטא כמותית את משיכות החומרים בניסוי מתיחה. הראשון הוא התארכות עד השבירה ומוגדר כ:

$$(5) l_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} 100\%$$

כאשר L_f הוא האורך המדוד בזמן השבירה. הפרמטר השני הוא הפחתת שטח החתך

$$(6) R_A = \frac{A_0 - A_f}{A_0} 100\%$$

כאשר A_f הוא שטח החתך בזמן השבירה.

ההתארכות עד השבירה היא הפרמטר של המשיכות המקובל ביותר עדיין למרות שיש לו חסרון של תלות בגיאומטריית הדגם או יותר מדויק של תלות ביחס $\sqrt{A_0/L_0}$. במילים אחרות, נתוני משיכות בביטוי של l_f ניתנים להשוואה נכונה אך ורק אם יתקבלו מדגמים זהים מבחינה גיאומטרית, בעלי $\sqrt{A_0/L_0}$ קבוע. עובדה זו מבליטה את הצורך בסטנדרטיזציה של הדגמים. יחסים $\sqrt{A_0/L_0}$ מקובלים הם: 5.65 : 1 (אירופה ואנגליה) או 4 : 1 (ארה"ב).

לעומת זאת הפחתת שטח החתך בשבירה היא מעשית בלתי תלויה בגיאומטריית הדגם בתנאי ש $\sqrt{A_0/L_0} < 3.5$: 1. למרות שהיא לפעמים קשה למדידה, במיוחד על דגמים שטוחים ודקים, מורגשת נטייה חדישה בבדיקות מכניות לקבל את הפרמטר הזה כפרמטר משיכות האמין ביותר.

10. עקומת מתיחה אמיתית

עקומת מאמץ מעוות הנדסית אינה נותנת תמונה אמיתית של דפורמציה פלסטית של מתכת מפני שהיא מבוססת על המידות ההתחלתיות של הדגם, בעוד שהמידות הללו משתנות באופן רצוף בזמן הניסוי. בבדיקות מתיחה של מתכות משיכות מתקבלים לעיתים קרובות מעוותים גדולים, זאת אומרת ששטח החתך של הדגם עלול לקטון במידה ניכרת. הופעת אי היציבות הפלסטית וה"צוואר" גורמת לירידה של העומס. המאמץ הממוצע המבוסס על שטח חתך התחלתי A_0 קטן גם כן, עובדה המובילה לכך שמעבר לנקודת U.T.S. נוצר שיפוע יורד הנראה לעין בעקומת מתיחה הנדסית. האמת היא שהקשיית המעוותים של המתכת נמשכת כל הזמן עד לשבירה כך שהמאמץ הדרוש להמשך הדפורמציה היה צריך לגדול. אם עקומת המתיחה מצוירת בקואורדינטות של מאמץ אמיתי σ ושל מעוות אמיתי ϵ , היא תתקבל עם שיפוע עולה דווקא (ציור 8). המאמץ האמיתי מוגדר כיחס בין העומס ושטח החתך באותו רגע.

$$(7) \sigma = \frac{P}{A}$$

המעוות האמיתי מוגדר כגבול של שנויים קטנים עוקבים במעוות ההנדסי.

$$(8) \varepsilon = \sum \left(\frac{L_1 - L_0}{L_0} + \frac{L_2 - L_1}{L_1} + \frac{L_3 - L_2}{L_2} + \dots \right) = \int_{L_0}^{L_1} \frac{dL}{L} = L_n \frac{L}{L_0}$$

היות והנפח נשאר מעשית קבוע בזמן הדפורמציה הפלסטית של חומרים מתכתיים אחידים אפשר לבטא את המעוות בתלות של האורך המדוד L_0 , שטח החתך או הקוטר באזור המדוד:

$$\varepsilon = L_n \frac{L}{L_0} = L_n \frac{A_0}{A} = 2L_n \frac{D_0}{D}$$

בתחום של ההתארכות האחידה (עד הצוואר), אנחנו יכולים לעבור ממאמץ ומעוות הנדסי למאמץ ומעוות אמיתי היות:

$$\sigma = S \frac{A_0}{A} \quad \text{מקבלים} \quad S = \frac{P}{A_0}; \sigma = \frac{P}{A}$$

$$\text{היות} \quad \frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} \quad \text{ו-} \quad \frac{L}{L_0} = 1 + l \quad \text{אנחנו מקבלים:}$$

$$(9) \sigma = S(1+l)$$

$$(10) \varepsilon = L_n(1+l)$$

הערכים של המעוות האמיתי ושל המעוות ההנדסי כמעט זהים מכיוון (פיתוח לטור טיילור)

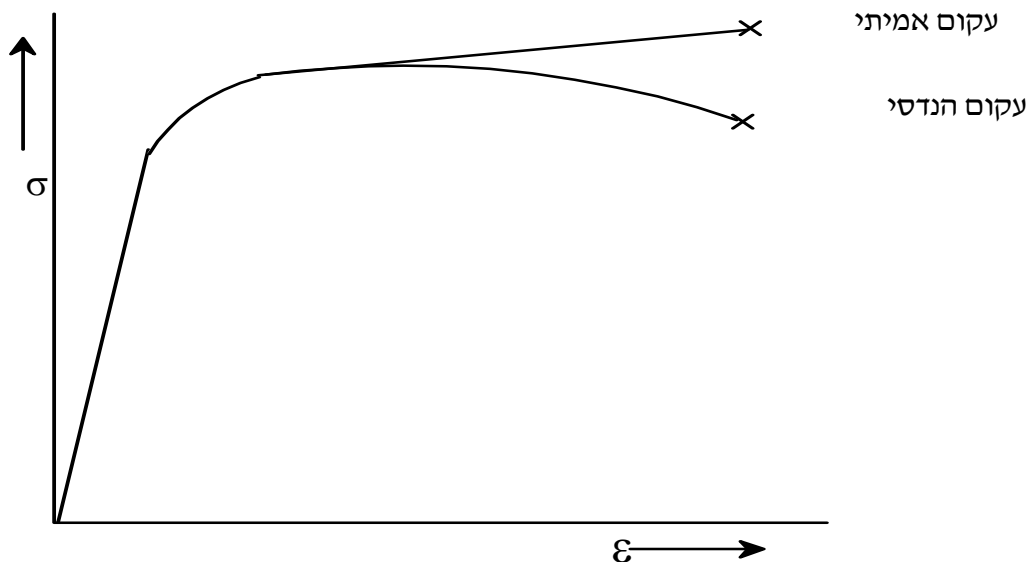
$$\varepsilon = L_n(1+l) = l - \frac{l^2}{2} + \frac{l^3}{3} - \frac{l^4}{4} + \dots;$$

הערכים של המרכיבים בעלי החזקה הנם קטנים עד כדי הזנחה. לעומת זאת בעבודה מדויקת מאד רצוי להגביל את השימוש ב- l למעוותים אלסטיים בלבד.

השוואה של דפורמציות מתיחה לדפורמציות לחיצה מדגימה באופן משמעותי את התועלת של המעוות האמיתי. במקרה זה אנחנו קובעים מראש שמעוותים של מתיחה צירים יהיו חיוביים ומעוותי לחיצה צירים יהיו שליליים. אם דגם צילינדר אחיד נמתח לאורך השווה לכפול מהאורך ההתחלתי ($L=2L_0$) או נלחץ לאורך השווה למחצית האורך ההתחלתי ($L=1/2 L_0$) נקבל מעוות הנדסי של $l=+1$ או $l=-0.5$ - 50% או לחיצה. על מנת לבצע מעוות הנדסי -100% בלחיצה, היינו צריכים ללחוץ את הדגם עד אורך אפס! בכל זאת אנחנו מצפים באופן אינטואיטיבי לקבל ערכים זהים בעלי סמנים הפוכים, למעוותים המתקבלים בלחיצת צילינדר למחצית אורכו ההתחלתי ובמתיחת הדגם לאורך הכפול מערכו ההתחלתי.

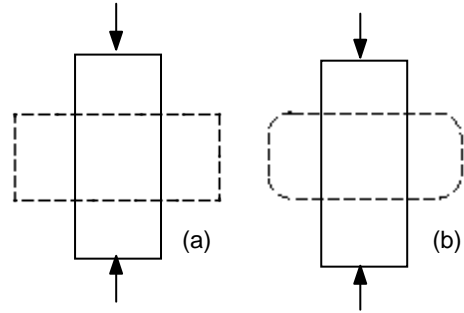
בעזרת המעוות האמיתי (משוואה 8) מושגת חפיפה לשני המקרים $\varepsilon = L_n(2)$ במתיחה

$$\text{ו-} \quad \varepsilon = L_n(1/2) = -L_n(2) \quad \text{בלחיצה.}$$



ציר 8: עקומת מאמץ-מעוות אמיתית ועקומת מאמץ-מעוות הנדסית.

הצורה המוזכרת של עקומת לחיצה הנדסית (צויר 8) נובעת מהגדלה בלתי אחידה של שטח החתך בזמן הלחיצה, תופעה מוכרת כ"חבית" (צויר 9).



צויר 9: לחיצה צירית (a) - דפורמציה אחידה, צורת הדגם נשארת צורת צילינדר. (b) - דפורמציה בלתי אחידה מתקבלת צורת "חבית".

צויר 8 מראה שבניגוד לעקומות מאמץ מעוות הנדסיות, עקומת מאמץ מעוות אמיתית עולה באופן מונוטוני כל הדרך עד לשבירה, וזאת כתוצאה מעליה רצופה בהקשיית מעוותים של החומר. אי לכך עקומת מאמץ מעוות אמיתית מייצגת את ההתנהגות המכנית האמיתית של חומרים מתכתיים במאמץ אמיתי העולה באופן רצוף. במקרה של עקומות מאמץ מעוות הנדסיות, ההתנהגות האמיתית של החומר מוסתרת על ידי הקטנת שטח החתך והופעת הצוואר במתיחה, או על ידי הגדלת שטח החתך וקבלת צורת "חבית" בלחיצה. עקרונית, עקומות מאמץ המתקבלות במתיחה ובלחיצה היו צריכות להיות זהות עבור אותו החומר. בכל זאת מבחינה מעשית זהות אידיאלית מתקבלת רק לעיתים רחוקות וזאת בגלל קשיים ניסיוניים.

הקטע של עקומת מאמץ מעוות אמיתית מעבר לכניעה הפלסטית נקרא עקומת זרימה של החומר ובתוך קטע זה המאמץ המתאים למעוות מסוים נקרא מאמץ הזרימה. עקומת הזרימה אופיינית לכל חומר וניתן לקבל אותה באמצעות בדיקות מתיחה, לחיצה או פיתול. משתמשים בעקומות זרימה על מנת להשוות התנהגות חומרים שונים וכדי שיהיה ניתן לחזות את התנהגות החומרים תחת מערכות מורכבות של מאמצים.

11. משוואת הקשיית מעוותים

ראינו בפרק הקודם שאפשר לאפיין את העצוב (formability) של חומר מתכתי באמצעות פרמטרים משיכות הניתנים להשגה מנסיי מתיחה. יש לזכור שהעצוב קטן עם הגדלה הקשיית המעוותים. אי לכך הערכה מושלמת להתנהגות פלסטית של חומר מתכתי זקוקה גם למאפיין כמותי של הכושר להקשיית מעוותים. עקומות זרימה של חומרים רבים במצב מורפה כגון אלומיניום טהור, סגסוגות משיכות של אלומיניום, נחושת, פליו מסוגים שונים, פלדות פחמניות עם ריכוזי פחמן נמוכים או בינוניים, פלדות אל-חלד אוסטיניות וכולי, ניתנות לביטוי מספק על ידי המשוואה האמפירית של **Ludwik**.

$$(11) \sigma = \sigma_0 \varepsilon^n$$

בנוסחה זו σ_0 ו- n קבועים של החומר. σ_0 הוא המאמץ האמיתי אשר מתאים למעוות אמיתי $\varepsilon=1$, ו- n מוכר כמקדם הקשיית מעוותים.

הערכים של σ_0 ו- n המתקבלים מדפורמציה צירית במתיחה ובלחיצה זהים עבור אותו חומר. משוואת Ludwik מתאימה בדרך כלל לתחום מעוותים של מ-2% $l = 2\%$ ועד הופעת "צוואר", עבור חומרים הנכנעים בצורה בלתי רצופה, המשוואה מתאימה רק מעבר למעוות **Luder's**.

אם משוואת Ludwik מתאימה כללית לחומר מסוים, אז גרף של $\log \sigma$ כתלות עם $\log \varepsilon$ צריך להתקבל כקו ישר מייצג את הנוסחה

$$(12) \log \sigma = \log \sigma_0 + n \log \varepsilon$$

בגרף כזה n הוא השיפוע של הקו הישר כאשר σ_0 הוא הקואורדינטה בנקודה $\varepsilon = 1$, n תמיד קטן מ-1. נוסחה (12) נותנת לא רק את האפשרות לבדיקת הנכונות של משוואת **Ludwik** אלא מאפשרת גם קביעת מעשית של n ושל σ_0 , או בשיטה גרפית מתוך הגרף של הקו הישר ממשוואה (12), או על ידי חשב מתוך קואורדינטות של שתי נקודות השייכות לעקומת זרימה: $(\sigma_1, \varepsilon_1)$, $(\sigma_2, \varepsilon_2)$:

$$(13) n = \frac{d(\log \sigma)}{d(\log \varepsilon)} = \frac{\log \sigma_2 - \log \sigma_1}{\log \varepsilon_2 - \log \varepsilon_1}$$

בדרך כלל משתמשים בשתי השיטות המוזכרות בעבודות מחקר בלבד היות וקביעת הזרימה וקבלת גרף מדויק של נוסחה (12) דורשות טכניקות ניסיוניות וחשובות מדויקות מאוד וגם לאורך זמן רב.

עבור מטרה טכנולוגית אפשר לחשב את מקדם הקשיית מעוותים בדרגה אמינות סבירה מתוך שתי נקודות של עקומת (P- ΔL) מדויקת, בתנאי ש:

$$2\% \leq l_1 \leq l_2 \leq l_{necking}$$

$$(14) n = \frac{L_n \frac{l_2}{1+l_1} + L_n \frac{P_2}{R}}{L_n \frac{L_n(1+l_2)}{L_n(1+l_1)}}$$

בעזרת נוסחאות (7, 10, 13) $l = \frac{A_0}{A} - 1$ ו- $\log X = M \text{Ln} X$ נקבל:

l_2, l_1 בנוסחה (14) הם מעוותים פלסטיים הנדסיים.

מאת ד. אלון, ד.ג. ברנדון, ש. נדיב, א. רוזן

- ראה בנוסף את הספר " מבוא להנדסת חומרים" עמודים: 168-175.