

נספח ב' : בדיקות קושי

1. שאלות הכנה.

1. הגדר מה זה קושי.
2. האם קושי הוא תכונה אלסטית או פלסטית, הסבר.
3. הסבר את הנוסחאות לבדיקת קשיות בשיטות בריןל, ויקרס ורוקוול. באילו יחידות נמדדת הקשיות?
4. הסבר את הנוסחה $P = KD^2$ (עבור שיטת בריןל). עבור איזה K נקבל מדידה מדויקת יותר.
5. הסבר מה זה "אפקט שפה" כיצד הוא משפיע על מדידת הקושי.
6. כיצד משפיע עובי הדגם על דיוק מדידת הקושי.
7. מה הקשר בין הקושי לבין σ_{UTS} עבור פלדות (הסבר את הנוסחה).
8. כיצד נדע על ידי מדידת קושי האם החומר עבר עיבוד בקור.
9. הסבר את המושגים: מיקרו קושי, מאקרו קושי, מה ההבדל ביניהם.
10. מתי מעוניינים לבצע בדיקות מיקרו קושי ומתי בדיקות מאקרו קושי.
11. תן דוגמא לשיטה המאפשרת בדיקת מיקרו קושי הסבר את אופן פעולתה.
12. הסבר את שיטת רוקוול, במה היא שונה משיטות בריןל וויקרס.
13. כיצד מבטלים את השפעת פגמי השטח בשיטת רוקוול.
14. מה לדעתך יש לעשות אם במדידת קושי בשיטת רוקוול מסוג R_B מקבלים מספר שלילי.
15. מה השיטה המדייקת ביותר למדידת קושי, ומה הקלה ביותר, (מבין שלושת השיטות הנ"ל), הסבר.

2. רקע תיאורטי

קשיותו של חומר נמדדת על ידי בדיקת עמידותו בפני חדירת גוף זר בעל קושי גבוה מזה של החומר הנבדק. מאופי ההגדרה ברור שלהלכה יש מספר אפשרויות אין סופי למדידת הקשיות, המדידה יכולה להיעשות על ידי החדרת חודרנים מחומרים שונים בצורות גיאומטריות שונות ועומסים שונים על החומר. מספר האפשרויות נעשה מוגבל על ידי מספר תקנים אשר מגדירים בדייקנות את סוג החודרן והעומס המופעל בהתאם לחומר הנבדק והצרכים המיוחדים.

מדידת הקשיות מודדת רק את ההתנגדות לחדירה על פני השטח החיצוני של החומר, לכן נותנת ידיעה ישירה על מידת עמידותו של החלק בפני שחיקה. במקרים רבים מאוד מדידת הקשיות נותנת גם מידע טוב לגבי תכונות מכניות אחרות של החומר: חוזק, משיכות, פריכות וכולי. למעשה החודרן מבצע דפורמציה פלסטית בתוך החומר הנסדק ולכן קיים קשר בין התכונות המכניות השונות והקשיות. מדידות הקשיות מאד שימושיות בתעשייה ובמחקר בגלל פשטות המדידה, הזמן הקצר הדרוש לביצוע המדידה ומחירם הזול יחסית של מכשירי המדידה. שיטות המדידה מתחלקות עקרונית לשני סוגים:

- א. הקשיות נקבעת מתוך מדידת עומק חדירת החודרן.
- ב. הקשיות נקבעת על פי מדידת העקבה הנשארת על פני החומר לאחר הורדת החודרן.

טבלה 1 מסכמת את צורות החודרנים, העומסים התקניים ודרך חישוב הקשיות בשיטות המדידה המקובלות.

	Shape of indentation hardness	Load Side ² view	Top view	Indenter Test number		
Brinell	10 mm sphere of steel or tungsten carbide			$P \quad BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$		
Vickers	Diamond pyramid			$P \quad VHN = 1.72 P / d_1^2$		
Knoop microhardness	Diamond pyramid			$P \quad KHN = 14.2 P / l^2$		
Rockwell						
A } C } D }	Diamond cone			60 kg†† 150 kg 100 kg	$R_A =$ $R_C =$ $R_D =$	} 100 - 500r
B } F } G } E }	1/16 in. diameter steel sphere 1/8 in. diameter steel sphere			100 kg 60 kg † 150 kg 100 kg	$R_B =$ $R_F =$ $R_G =$ $R_E =$	

טבלה מס' 1 : שיטות שונות למדידת קשיות

3. בדיקת ברינל (B.H.N.)

הבדיקה היא לפי התקנים: ASTM; E- 10 -54T (אמריקאי) DIN; 5031 (גרמני)

החודרן הוא כדור עשוי מפלדה מחוסמת או מקרביד הטונגסטן בעל ארבעה קטרים תקינים 1, 2.5, 5 ו-10 מ"מ. מספר ברינל (B.H.N.) מחושב לפי העומס מחולק לשטח עקבת כיפת הכדור החודר (טבלה 1). הממדים הם kgf/mm^2

$$B.H.N. = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

P (kgf) - עומס של החודרן.

D (mm) - קוטר החודרן.

d (mm) - הקוטר הנמדד של עקבת הכדור, נמדד בעזרת מיקרוסקופ. משך זמן ההחדרה - 10 - 15

שניות.

לפי נוסחה זו אפשר היה להלכה להפעיל כל כוח, אך מספר קושי ברינל של חומר מסוים יהיה שונה אם נפעיל עומסים שונים על כדורים בעלי קוטר שונה. סטנדרטיזציה של המדידה (קבלת מספר שווה בשיטות העמסה שונות עבור חומר זה) תתקבל במידה וישמר היחס הקבוע: $P = KD^2$

התקן קובע ארבעה ערכים ל-K: 2.5, 5, 10 ו-30. ביחד עם הגדלים התקינים של קטרי הכדור החודר מתקבלים כל העומסים האפשריים לפי טבלה 2.

טבלה מס' 2: תקן העומסים והקטרים האפשריים בבדיקת ברינל

Simple thickn.	Ball dia.	$P = 30 D^2$ [kgf]	$P = 10 D^2$ [kgf]	$P = 5 D^2$ [kgf]	$P = 2.5 D^2$ [kgf]
mm	D, mm	Still unhardness	Brass, copper Duraluminum	Soft copper Bearling metal	Lead and Lead alloys
Not below 6 15/64	10	3000	1000	500	250
Not below 3 1/8	5	750	250	125	62.5
Not below 1.2 0.047	2.5	187.5	62.5	31.25	15.625
Not below 0.5 0.020	1	30	10	5	

מומלץ לבחור את הערך - K משיקול קושי צפוי: $K = 30$ עבור חומרים קשים כפלדות (לא מוקשות) $K = 10$ עבור חומרים בעלי קושי בינוני כפליז, נתכי אלומיניום ונתכי נחושת. $K = 5$ עבור חומרים רכים כנחושת ואלומיניום. $K = 2.5$ עבור חומרים רכים מאוד כעופרת ונתכי עופרת. קוטר החודרן נקבע לפי עובי החלק הנמדד (ראה עמודה ראשונה בטבלה 2) אפשרויות ההעמסה ואפשרויות המדידה של המכשיר. מכשירים מעבדתיים רגילים מוגבלים עד 250 ק"ג. רצוי לבחור במידת האפשר את הקוטר הגדול ביותר אשר ייתן עקבה גדולה הניתנת למדידה מדויקת.

לדוגמא:

אם נרצה למדוד קשיותו של פליז. נבחר תחילה $K = 10$ הבחירה היא בין כדור 5 מ"מ ועומס 250 ק"ג, כדור 2.5 מ"מ ועומס 62.5 ק"ג וכדור בקוטר 1 מ"מ ועומס 10 ק"ג. שלושת האפשרויות צריכות לתת תוצאה זהה (בתחום השגיאה). במידה ועובי החלק מרשה, נבחר את האפשרות הראשונה. במידה ויש חשיבות לשמירת פני החלק מפני הריסה בזמן הבדיקה, נבחר את האפשרות השלישית.

סימון ורישום המדידה ניתן בצורה המגדירה בדייקנות את אופי המדידה.

$D=2.5$ $K=30$; B.H.N. $_{30/2..5} = 240 \pm 5$ Kgf/mm² (מגדיר בטבלה 2 את העומס).

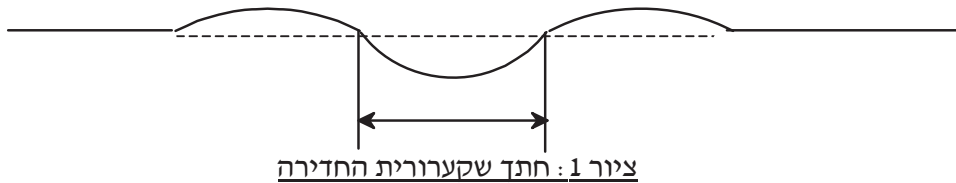
$P=187.5$ $D=2.5$; B.H.N. $_{2.5/187..5} = 240 \pm 5$ Kgf/mm² (מגדיר בטבלה 2 את K)

יש המציינים במקום B.H.N. H.B. (Hardness Brinell)

בדרך כלל אין צורך לחשב את B.H.N מתוך הנוסחה. לאחר מדידת d אפשר למצוא את הקושי לפי טבלאות הערוכות לפי D ו-P.

4. חסרונות, יתרונות והערות

- השיטה מצריכה הכנת שטח חלק ונקי ומכשור מיקרוסקופי מדויק לקריאת d.
- יש קושי עקרוני במדידת קוטר העקבה d בגלל אפקט שפה כפי שמתבטא בהגזמה בציור 1.



ג. המדידה מוגבלת לקשיות מכסימלית בגלל החודרן. עבור חודרן פלדה מוקשה הגבול העליון הוא 500 kgf/mm^2 , עבור חודרן מקרביד הטונגסטן הגבול העליון הוא 700 kgf/mm^2 . אם נעבור גבולות אלו יש סכנה למעיכת החודרן והריסתו.
ד. המדידה משאירה עקבה גדולה יחסית על פני השטח הנבדק ועלולה לגרום לפסילתו לשימוש.

ה. המדידה מוגבלת לעובי מינימלי הקשור לעומס ולקוטר החודרן. עובי מינימלי מתאים בערך ל-10 t (t - עומק החדירה). בדיקה פשוטה היא בדיקת המשטח התחתון של הפח הנבדק, באם התהווה סימן משמע שהעומס גדול עבור עובי פח זה.

ו. המדידה מוגבלת למרחק גדול יחסית מקצה הדגם. התקן דורש $d \leq 2.5$ מקצה הדגם למרכז החדירה.
ז. מתוך מדידת B.H.N. אפשר לקבל בדיקת של כ-5% עבור פלדות את החוזק המכסימלי לקריעה (U.T.S.) תוך שימוש במשוואה האמפירית:

$$U.T.S. = 0.36 \text{ B.H.N.}$$

ח. מדידת ברינל נותנת הערכה על מידת העבודה בקר (ערגול וכול') אשר עבר הדגם. חוק Meyer קובע ש- היחס $P = ad^n$, עומס, d - קוטר העקבה, a ו- n קבועים. הקבוע n נע בגבולות 2--2.5. עבור חומרים אשר לא עברו עיבוד בקר ה- $n \leq 2.5$ עבור חומרים מוקשים בקר $n \leq 2$.

5. בדיקת ויקרס Vickers Hardness Number

הבדיקה היא לפי תקנים

(אמריקאי) ASTM ; E 92 -52 T
(גרמני) DIN ;50 133

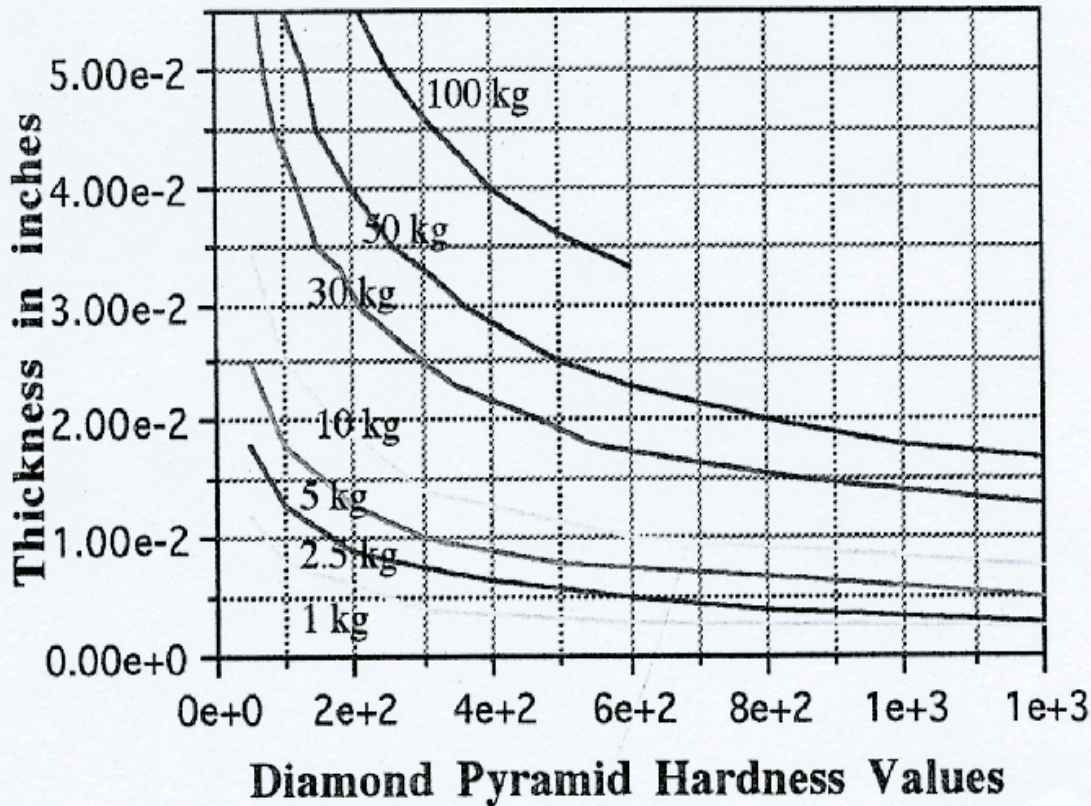
החודרן הוא פירמידת יהלום עם בסיס ריבועי, הזווית בין פאות 136° מסיבה זו נהוג גם לציין במקום V.H.N. גם D.P.N. Diamond Pyramid Hardness Number.

עקרון המדידה זהה לזה של ברינל אלא שבבדיקה זו צורת העקבה היא מרובע. V.H.N. מחושב מתוך העומס מחולק לשטח העקבה לאחר הורדת העומס. בעזרת מיקרוסקופ נמדדים אורכי האלכסון d (עושים ממוצע חשבוני של שני האלכסונים) ובעזרת טבלאות מתאימות מקבלים את קושי ויקרס ביחידות kg/mm^2

$$V.H.N. = 1.85 P/d^2$$

העומסים אינם מוגבלים לתקן מיוחד היות והקושי המחושב עבור עומסים שונים יהיה שווה (לא כמו בשיטת ברינל). העומסים המקובלים למדידות מקרוסקופיות הם $1 - 120 \text{ kg}$ לא נוהגים להעמיס מעל 120 ק"ג בגלל הנזק שעלול להיגרם בעיקר לדפנות פירמידת היהלום.

היות ואין הגבלה מינימלית בעומס ניתן להעמיס גם גרמים בודדים אך אז דרוש מיקרוסקופ יעיל למדידה מדויקת של האלכסונים. בעומסים קטנים המדידה היא מיקרוסקופית - מיקרו-קושי (Micro-hardness). כלומר העקבה הקטנה מודדת את הקושי הנקודתי ואינה משקפת את הקושי של הגוף כולו. לעיתים בגוף הטרוגני, בעל פזות שונות, רוצים לדעת את הקושי של כל פזה לחוד. ידיעה זו עוזרת במחקר הקושר את המבנה עם התכונות המכניות. מדידת קושי תעשייתית היא בדרך כלל מקרוסקופית ונותנת ידיעה על הקושי הממוצע של כל הדגם.



ציור מס' 2: עומס מקסימלי בתלות עובי מינימלי וקושי

בחירת העומס המתאים קשורה במספר גורמים:

א. באם המדידה היא מיקרו או מקרו.

ב. באם המדידה היא מקרוסקופית והחומר הוא הטרוגני מאוד, דרוש עומס גדול כך שהעקבה תכסה שטח מקסימלי.

ג. רצוי לבחור עומס גדול לקבלת עקבה גדולה והגדלת דיוק קריאת d.

ד. עובי הדגם ביחד עם הקושי המצופה יקבעו במידה רבה את העומס המקסימלי. מומלץ לקחת $I > 1.5 d$ (I: עובי הדגם). היות ולפי גיאומטריה נקבל $t = 1/7 d$ (עומק חדירה) התנאי לעובי מינימלי דומה לזה

שנהוג בבדיקות ברינל $I = 10 t$ אך, כאמור העומס נקבע גם ממידת הקושיות כפי שהדבר נראה בציור מס' 2. ה. עומס גדול ייתן עקבה גדולה אשר תפגע בפני השטח. נהוג לא לרדת מ-5 ק"ג במדידות מקרו-קושי.

6. חסרונות, יתרונות והערות

א. כל ההנחיות לגבי פני השטח הנבדק זהות לאלו שבבדיקת ברינל: ליטוש מקבילות וניקיון.

ב. אין אפשרות של בדיקת שטחים לא מישוריים אלא רק באופן השוואתי היות והאלכסונים אינם בעלי אורך אמיתי.

ג. יש צורך במכשור מיקרוסקופי יקר ועבודה זהירה עם חודרן היהלום (מאוד שביר).

ד. לצורך דיוק יתר נהוג למדוד בעומסים שונים ולהשוות את התוצאות.

ה. יש שתי שיטות מיקרוסקופיות עיקריות למדידת d. האחת ע"י הקרנת התמונה על מסך ומדידה על ידי סרגל (נהוגות בדרך כלל הגדלות עד פי 140 עבור מדידות מקרו קושי). השיטה השניה היא הסתכלות ישירה במיקרוסקופ ומדידה על ידי אובייקטיב מכויל (נהוגה הגדלה עד פי 600 עבור מדידות מיקרו-קושי).

מכל השיטות בדיקת ויקרס מקובלת יותר ויותר גם בתעשייה בגלל דיוק המדידה ומהימנותה.

7. בדיקת קנופ

בדיקה זו מיועדת בעיקר לבדיקות מיקרו-קושי. החודרן הוא יהלום בצורת פירמידה מעוינת (ראה טבלה 1).

היתרון בשיטה זו הוא עומק החדירה הקטן לעומת האלכסון הארוך של המעוין $t = l/30$ מסיבה זו המדידה מתאימה למדידת פחים דקים מאוד בשיטת המיקרו-קושי. כמו כן השיטה מתאימה למדידות קשיות של פזות שונות, התפלגות של קושי ליד פגמים מטלוגרפים וכלו'.

בעזרת מיקרוסקופ מודדים את האורך של האלכסון הגדול l ומחשבים (או בעזרת טבלה) את

$$K.H.N. = 14.2 P / l^2$$

נוסחה זו מבטאת, כבשיטות הקודמות, את העומס מחולק לשטח העקבה.

8. בדיקת רוקוול Rockwell Hardness

הבדיקה היא לפני תקנים: ASTM; E 18-42 (אמריקאי)

DIN ; 50103 (גרמני)

בניגוד לשיטות הקודמות, בשיטה זו הקשיות נקבעת מתוך מדידת עומק חדירת חודרן תקני בזמן העמסת עומס תקני.

צורך של עומסים תקניים וחודרנים מאפשרים 15 צורות מדידה בשיטת הרוקוול. למעשה משתמשים בשלוש או ארבע בלבד (ראה טבלה מס' 3).

טבלה מס' 3: ארבע שיטות תקניות (מתוך 15 קימות) למדידת קושי רוקוול

Scale	Indenter	Major load	Typical test material
A	Diamond cone (black scale)	60 kg	Contented carbides thin steel
B	T 1/16 in. ball (red scale)	100 kg	Cu alloy, steels, Al alloys
C	Diamond cone (black scale)	150 kg	Steels, hard cast irons, Ti alloys
F	T 1/16 in. ball (red scale)	60 kg	Annealed Cu alloys, thin soft sheet

רוקוול (RC)

החודרן הוא קונוס יהלום בזווית פתיחה של 120° וחוד ברדיוס 0.2 מ"מ. העומס הוא 150 ק"ג. שיטה זו מיועדת לחומרים קשים מאוד. אם כי סקלת המדידה היא 0-100, לא נוהגים למדוד בשיטה זו מתחת ל-20RC. לדוגמא, פלדה פחמנית מחוסמת (קשה) מגיע בשיא הקושי רק ל-67 RC.

רוקוול (RA)

החודרן זהה לזה של רוקוול C, העומס התקני רק 60 ק"ג. שיטה זו מכסה את כל תחום הקושי, גם חומרים רכים וגם קשים מאוד.

רוקוול (RB)

החודרן הוא כדור פלדה מוקשה בקוטר $1/16''$. העומס 100 ק"ג. שיטה זו מתאימה לחומרים רכים אשר קשיותם מתחת ל-20 RC.

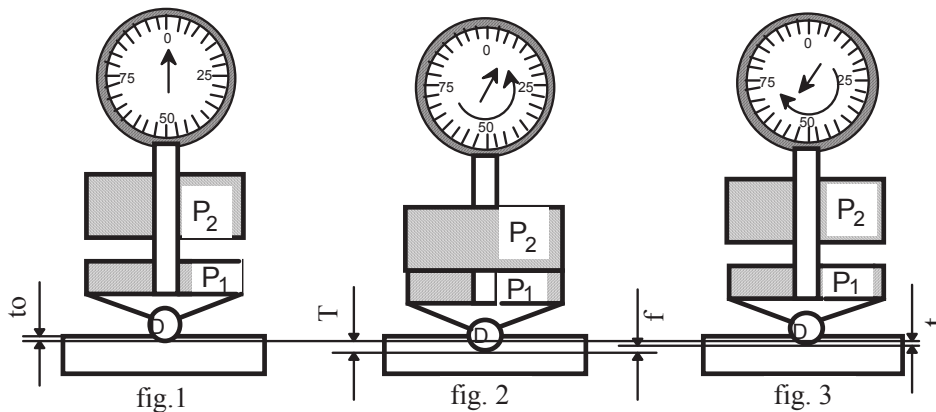
עבור מדידת קושי בשיטת Rockwell בגופים קמורים או קעורים, יש לבצע תיקון הערך הנמדד כתלות ברדיוס העקמומיות של הגוף הנמדד. במקרה של גוף קמור, לדוגמה מעטפת גליל, יש להוסיף לקושי הנמדד ערך תיקון על מנת להגדילו. זאת כיוון שהמעטפת הקמורה מתעקלת הרחק מהחודרן ועל כן ישנו פחות חומר סביב החודרן מאשר במקרה של מעטפת מישורית. עקב כך, החודרן חודר עמוק יותר ומתקבל ערך קושי קטן מידי. באותו אופן, במקרה של גוף קעור יש להחסיר ערך תיקון עקב הערך הגבוה של הקושי הנמדד. זאת עקב חומר רב יותר סביב החודרן. טבלת ערכי התיקון עבור גופים גליליים בתמונה 1.

CORREZIONE PER PROVE SU TONDI (da aggiungere al valore letto sul comparatore)						
CORRECTION VALUES FOR THIN CYLINDRICAL TEST PIECES (Dial gauge reading + correction value = natural hardness)						
Ø	Rockwell C					
mm	70	60	50	40	30	
6	1	1.5	2.5	3.5	5	
8	1	1.5	2.5	3	4	
10	1	1.5	2	2.5	3.5	
12	0.5	1	1.5	2	2.5	
15	0.5	1	1	1.5	2	
20	0.5	0.5	1	1	1.5	
Ø	Rockwell 15-N 30-N 45-N					
mm	90	80	70	60	50	40
3	0.5	1	2	3	3.5	4.5
6	0.5	0.5	1	1.5	2	3
8		0.5	1	1	1.5	2.5
10		0.5	1	1	1.5	2
12		0.5	0.5	1	1	1.5
15			0.5	0.5	1	1
20			0.5	0.5	1	1
Ø	Rockwell B					
mm	100	90	80	70	60	50
6	3.5	4	5	6	7	8
8	3	3.5	4.5	5	6	7
10	2.5	3	3.5	4	5	5.5
12	1.5	2	2.5	3	3.5	4
15	1.5	1.5	2	2.5	3	3.5
20	1	1.5	1.5	2	2.5	3

תמונה 1 – טבלת תיקון עבור גופים גליליים.

9. עיקרון המדידה

כאמור עקרון המדידה הוא מדידת עומק חדירת החודרן בדגם. מדידת העומק מבוצעת על ידי חוגן.



ציור מס' 3: עקרון המדידה בשיטות רוקוול

עומס קבוע (P1) של 10 ק"ג (בכל השיטות). העמסה זו באה לתקן את פגמי השטח כתוצאה מליטוש לא חלק ופגמי שטח אחרים, ולמעשה איננה משתתפת במדידה עצמה. במצב זה החודרן חדר לעומק t_0 . בשלב הבא מעמיסים את העומס העיקרי (P2) (תקני לפי השיטות השונות). לדוגמא, אם העומס התקני הוא 100 ק"ג, אזי $P1 = 10$ ק"ג ו- $P2 = 90$ ק"ג. במצב זה יש תוספת חדירה f . לבסוף מורידים את P2 (P1 עדין מועמס). החודרן עולה בגלל הדפורמציה האלסטית בעוד הדפורמציה הפלסטית שנוצרה עקב העומס P2 מצוינת ב- t . החדירה הפלסטית משקפת את הקשיות לפי:

$$\frac{R_A}{R_C} = 100 - 500 t, \quad RB = 130 - 500 t$$

למעשה מספר רוקוול הוא מספר שרירותי. לדוגמא, עבור RA ו- RC, היות והמספרים נעים בין 0 ל- 100, פרוש הדבר ש- t נע בין 0 מ"מ ו- 0.25 מ"מ. חדירה פלסטית בשיעור של 0.2 מ"מ תיתן את הקריאה המינימלית 0.

היות וקיים יחס ישר בין העומק ומספר רוקוול, החוגן המודד את עומק החדירה מכויל ליחידות רוקוול כך שקריאת הקושיות נעשית בצורה מיידית על השעון.

10. חסרונות, יתרונות והערות

- א. הקריאה בשיטה זו מהירה מאד וזולה יחסית היות ואינה מצריכה ציוד מיקרוסקופי.
 - ב. השיטה היא חצי אוטומטית, אין שגיאה עקב גורם אנושי.
 - ג. מומלץ עובי דגם מינימלי לפחות פי 10 מעומק החדירה (ראה טבלה 4).
 - ד. אין צורך בליטוש סופי של הדגם, מספיק שטח אשר עובד בשיבוב עדין.
 - ה. דיוק המדידה נמוך יחסית לשיטות המיקרוסקופיות. שגיאה במדידת חדירה בשיעור של 0.002 מ"מ מבטאת יחידה אחת במדידת RA ו- RC
 - ו. כיול ואיפוס המכשיר נעשים עם תחילת כל מדידה בעזרת דגמים סטנדרטיים.
 - ז. עקמומיות הדגם (מדידת קושי גליל על היקפו) משפיעה על המדידה. ככל שקוטר הדגם קטן יותר וערך הקשיות נמוך יותר דרוש תיקון גדול יותר. הסבר מדוע.
- לדוגמא עבור גליל בקוטר 6 מ"מ וקושי RC 20 יש להוסיף 6 יחידות לערך הנמדד, ראה טבלאות תיקון במעבדה.

11. שיטות מדידה אחרות

- א. Shore Scleroscope. בשיטה זו אין מחדירים חודרן לתוך הדגם אלא מפילים משקולת תקנית מגובה 10" ומוודדים את גובה ההקפצה (rebound). ככל שהחומר קשה יותר המשקולת תקפוץ לגובה גדול יותר. שיטה זו מחייבת שטח פנים מלוטש אך מצד שני אינה משאירה עקבה על הדגם.
 - ב. בדיקת Shore לחומרים פלסטיים וגומי לסוגיו השונים. בשיטה זו מחדירים חודרן תקני (מחט) לתוך הדגם וקוראים את עומק החדירה בעזרת אינדיקטור. השיטות מתחלקות בהתאם לחודרנים השונים (עובי המחט) ומצוינות כ- Shore A, Shore B
- * ראה בנוסף את הספר "מבוא להנדסת חומרים" מאת ד. אלון, ד.ג. ברנדון, ש. נדיב, א. רוזן. עמודים: 199-203.