

נוסחאון במקצוע

יסודות המכניקה

הנדסאים – הנדסת מכונות – תיב"מ

סמל בחינה 97001

תשפ"ד – 2024

30 נובמבר 2023

תוכן עניינים

4.....	מבוא
4	1. סמלים ויחידות
6.....	סטיקה
6	2. מושגי יסוד, חוקים ואקסיומות סטיקה
8.....	כוח שקול (חיבור וחסור גודל וקטורי)
9.....	פירוק כוח לרכיבים ישרי זווית
11.....	סמכים
15	3. מערכת כוחות משותפי נקודה
17.....	גלגלות
21.....	קפיץ
24	4. מערכת כוחות מקבילים
34	5. מערכת כוחות מישוריים – מקרה כללי
40	6. מסבכים מישוריים
41.....	שיטת רייטר
44.....	שיטת הצומת
50	7. מרכז כובד
51.....	שטחים ומרכזי כובד – צורות שכיחות
57	8. חיכוך
59.....	מישור משופע
67.....	דינמיקה
67	9. תנועה של נקודה חומרית בקו ישר
67.....	תנועה במהירות קבועה (תנועה קצובה)
69.....	תנועה במהירות משתנה
76.....	נפילה חופשית
82	10. תנועה של נקודה חומרית באוויר במסלול עקום
82.....	זריקה אופקית
86.....	זריקה משופעת
90	11. תנועה סיבובית של נקודה חומרית
94.....	גרפיקה הנדסית

94	12. חתכים
100	13. מידות
109	14. סמלים לתעשייה
109	טיב העיבוד (מרקם המשטח).....
112	סבולת מידה (טולרנס).....
113	סבולות גיאומטריות (סבולת צורה ותנוחה).....
115	115..... תורת החומרים
115	15. מבוא ומושגי יסוד
115	מבנה החומר.....
117	מיון חומרים.....
118	התמצקות (התגבשות) החומר.....
120	סוגי מבנים סריג גבישי.....
122	תכונות חומרים.....
124	16. תכונות מכניות של חומרים
124	מבחן מתיחה (משיכה).....
130	מבחן קשיות.....
141	מבחן נגיפה (Impact Test).....
149	זחילה.....
152	התעייפות החומר.....
154	17. פלדות
156	סוגי פלדות.....
158	תקני פלדות.....
164	יציקת ברזל.....
165	פלדות בלתי מחלידות (פל"ב"מ).....
166	דיאגרמת פאזות – ברזל פחמן.....
174	טיפול תרמי.....
189	קורוזיה (שיתוך).....
192	18. מטלורגית אבקות
194	19. אלומיניום (חמרן)
201	זיקון – טיפול תרמי באלומיניום.....
203	20. חומרים מרוכבים

מבוא

1. סמלים ויחידות

יחידות בסיסיות (Din 1301-1)

גודל נמדד	אורך	מסה	זמן	זרם חשמלי	טמפרטורה	כמות חומר	עוצמת הארה
שם היחידה	meter	kilogram	second	Ampere	Kelvin	mole	Candela
סמל יחידה	m	kg	s	A	K	mol	cd

קידומות הכפלה וחילוק

קידומת	tera	giga	mega	kilo	hecto	deca	deci	centi	milli	micro	nano	pico
סמל	T	G	M	k	h	da	d	c	m	μ	n	p
חזקה	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^2	10^1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}

יחידות בסיס ונגזרותיהן

גודל	סמל	יחידה	מערכת יחסים
אורך	l	m	$1 \text{ m} = 10 \text{ dm} = 100 \text{ cm} = 1000 \text{ mm}$ $1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$
שטח	A	m^2	$1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2 = 10^6 \text{ mm}^2$
נפח	V	m^3 l, L	$1 \text{ m}^3 = 10^6 \text{ cm}^3 = 10^9 \text{ mm}^3$ $1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 0.001 \text{ m}^3$
זווית	$\alpha, \beta, \gamma \dots$	rad $^\circ$	$1 \text{ rad} = 57.3^\circ = \frac{180^\circ}{\pi}$ $1 \text{ deg} = \frac{\pi}{180^\circ} \text{ rad}$
מסה	m	kg	$1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$
כוח	F	N	$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = 1 \frac{\text{J}}{\text{m}}$ $1 \text{ kN} = 10^3 \text{ N}$ $1 \text{ MN} = 10^3 \text{ kN} = 10^6 \text{ N}$

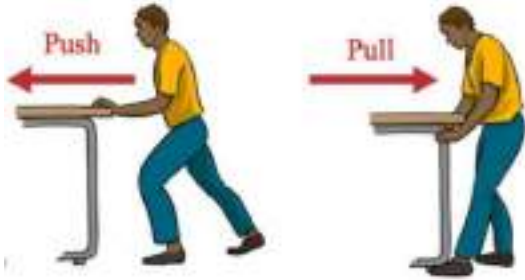
גודל	סמל	יחידה	מערכת יחסים
צפיפות	ρ	kg/m^3	$1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
מומנט	M, T	Nm	$1 \text{ Nm} = 1000 \text{ Nmm}$
לחץ	P	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$ $1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa} = 10^5 \text{ Pa}$ $1 \text{ MPa} = 1000 \text{ kPa} = 10^6 \text{ Pa}$
מאמץ מכני	σ, τ	N/mm^2	$1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 1 \text{ MPa}$
אנרגיה	E	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$
הספק	H, P	W	$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
עבודה	W	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$
מומנט התנגדות	Z_b, Z_o	mm^3	$1 \text{ mm}^3 = 10^{-3} \text{ cm}^3$
זמן	t	s min h d y	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$ $1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$ $1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 1440 \text{ min} = 86400 \text{ s}$ $1 \text{ y} = 365 \text{ d}$
מהירות סיבובית	n	1/s 1/min	$1/\text{s} = \frac{1/\text{min}}{60}$ $1/\text{min}$
מהירות	v	m/s m/min km/h	$\frac{m}{s}$ $\frac{m}{\text{min}} = \frac{1}{60} \frac{m}{s}$ $\frac{km}{h} = \frac{1}{3.6} \frac{m}{s}$
מהירות זוויתית	ω	rad/s	$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$
תאוצה	a	m/s^2	$1 \text{ m/s}^2 = \frac{1 \text{ m/s}}{1 \text{ s}}$
טמפרטורה	T	K	$1 \text{ K} = 273 + ^\circ\text{C}$

סְטָטִיקָה

2. מושגי יסוד, חוקים ואקסיומות סטטיקה

כוח – פעולת דחיפה או משיכה המתרחשת על גוף, הגורמת לשינוי בתנועתו או בצורתו של גוף.

יחידת מידה: $1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{sec}^2}$



הנחת יסוד: גוף קשיח **אינו משנה** מידותיו וצורתו עקב פעולת כוח.

מאפייני כוח:

- נקודת אחיזה – קו פעולת הכוח.
- **גודל** – אורך החץ, המראה את מקום פעולת הכוח ואת כיוונו (קו פעולה).
- **כיוון** – זווית ביחס לציר ה**אופקי**.

מסה – גודל פיזיקלי המתאר "כמות החומר" הנמצאת בגוף מסוים. כמות זו נותרת **קבועה** כל עוד לא מוסיפים או גורעים חומר.

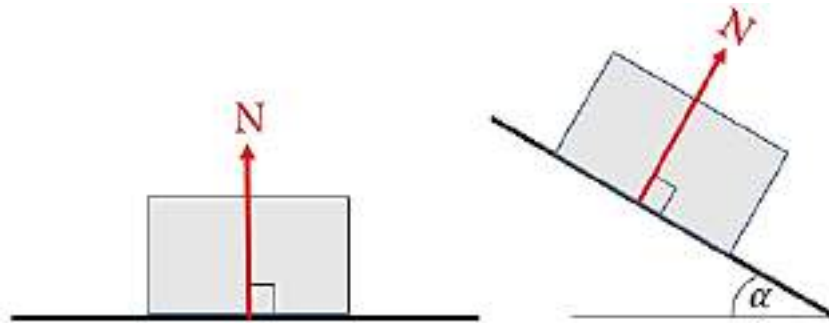
משקל – הכוח בו נמשך גוף אל שדה כבידה.

$$W = m \cdot g$$

N	משקל	W
kg	מסה	m
$\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$	תאוצת הכובד	g

הערה: כל עוד **לא** צוין אחרת, השתמש בערכה של תאוצת הכובד $g = 10 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$

"כוח נורמלי" – כוח שמפעיל משטח בתגובה לכוח המופעל עליו, כיוונו **ניצב** למשטח עליו פועל הכוח.



חוקי ניוטון

חוקי התנועה של ניוטון דנים בתנועתו של גוף בהשפעת כוחות וביחס בין כוח ותנועה:

"חוק ההתמדה" (חוק ראשון של ניוטון)

כאשר הכוח השקול ה**פועל** שווה לאפס, הגוף נמצא בשיווי משקל **במנוחה** (או נע בתנועה במהירות קבועה בקו ישר).

"חוק הכוח" (חוק שני של ניוטון)

"תאוצת גוף (שינוי מהירותו של גוף) שווה ליחס בין שקול כוחות חיצוניים הפועלים על גוף למסת הגוף".

$$\Sigma F = m \cdot a$$

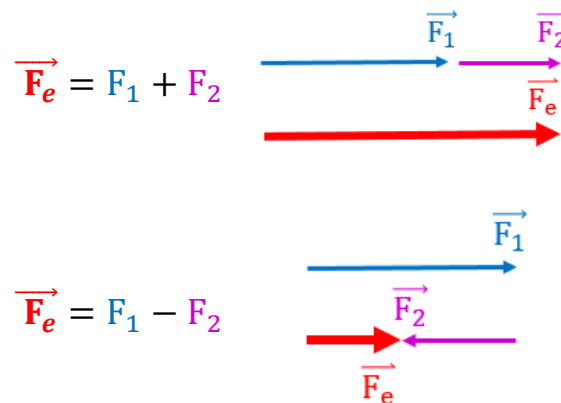
N	כוח	F
kg	מסה	m
$\frac{m}{sec^2}$	תאוצה	a

"חוק הפעולה והתגובה" (חוק שלישי של ניוטון)

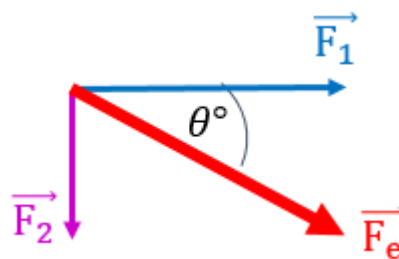
"לכל פעולה קיימת תגובה נגדית לה בכיוונה ושווה לה בעוצמתה". כאשר גוף מפעיל כוח כלשהו על גוף אחר, הגוף האחר יפעיל כוח השווה בעוצמתו אך **מנוגד** לו בכיוון על הגוף הראשון.

כוח שקול (חיבור וחסור גודל וקטורי)

כוחות הפועלים לאורך קו פעולה זהה אופקי או אנכי, נוכל להחליפם בכוח יחיד שעוצמתו שווה לעוצמת כלל הכוחות הנקרא כוח שקול (סכום הכוחות) ומסומן ב- $\vec{F}_e$ או (ΣF) .



כוחות הפועלים לאורך קווי פעולה אנכיים זה לזה, נוכל להחליפם בכוח יחיד שעוצמתו שווה לעוצמת כלל הכוחות הנקרא כוח שקול (סכום הכוחות) ומסומן ב- $\vec{F}_e$ או ΣF .



$$\vec{F}_e = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{F_2}{F_1} \right)$$

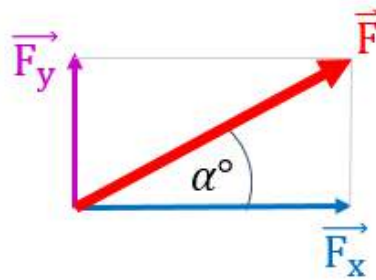
הערות:

* כאשר ערכו של סכום הכוחות שווה אפס הגוף במנוחה – לא נגרמת תנועה לאורך קו הפעולה הנבדק.

* כאשר ערכו של סכום הכוחות חיובי או שלילי ינוע הגוף לאורך קו הפעולה הנבדק.

פירוק כוח לרכיבים ישרי זווית

כדי לבחון את השפעתו של כוח נטוי על גוף, נפרקו לשני רכיבים ישרי זווית. כך נמנע מהשפעה הדדית של ציר אחד על משנהו !!!



$$\vec{F}_x = \vec{F} \cdot \cos \alpha^\circ$$

$$\vec{F}_y = \vec{F} \cdot \sin \alpha^\circ$$

F_x	רכיב כוח על ציר ה-x (רכיב אופקי)	N
F_y	רכיב כוח על ציר ה-y (רכיב אנכי)	N
α	זווית בין הכוח לציר ה-x	°

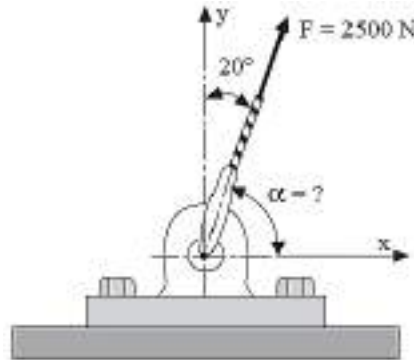
כלל הסימנים:

רכיב כוח יוגדר " + " (חיובי) כאשר הכוח מכון עם כיוון הציר.

רכיב כוח יוגדר " - " (שלילי) כאשר הכוח מכון נגד כיוון הציר.

דוגמה 1

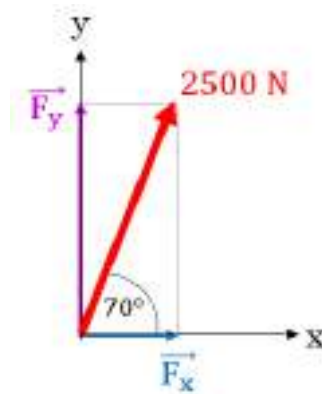
באיור לשאלה מתואר מחבר. על המחבר פועל כוח $F = 2500 \text{ N}$. הזווית בין הכוח F לציר האנכי, y , היא 20° .



פרקו את הכוח לשני רכיבי ישרי זווית וחשבו את גודלם.

פתרון דוגמה 1

1. סרטטו מערכת צירים ועליה את הכוח $\vec{F}$. את זווית נטיית הכוח מדדו מהציר האופקי x .
2. מקצה הכוח הורידו אנך לכל אחד מהצירים והתוצאה המתקבלת היא רכיב הכוח על גבי הציר המתאים.
3. חשבו את רכיבי הכוח.

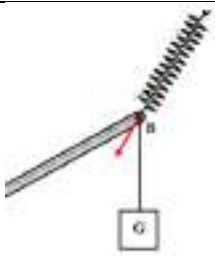
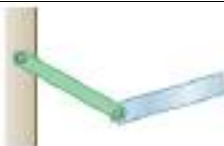
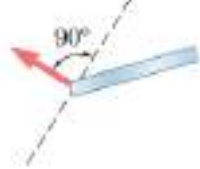
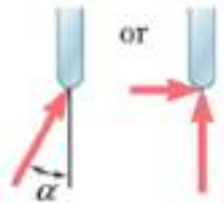
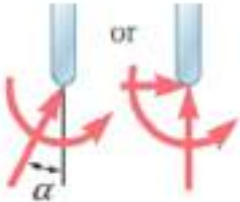
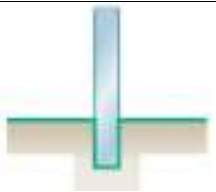


$$\vec{F}_x = \vec{F} \cdot \cos \alpha = 2500 \cdot \cos 70^\circ = 855 \text{ N}$$

$$\vec{F}_y = \vec{F} \cdot \sin \alpha = 2500 \cdot \sin 70^\circ = 2350 \text{ N}$$

סמכים

סמך – גוף המגביל תנועת גוף באמצעות הפעלת כוח/ות תגובה.

דרוש	כוח/ות תגובה	תמיכה או חיבור
עוצמת הכוח ?	 קו פעולה ידוע	  מוט  כבל
עוצמת הכוח ?	 קו פעולה ידוע	 פין ללא חיכוך  מחליק על מוט ללא
עוצמת הכוח ?	 קו פעולה ידוע	 מישור ללא חיכוך  נדנדה  גלגל
עוצמת רכיב כוח ? כוח שקול + זווית ?	 or 	 מישור מחוספס  פין או ציר ללא חיכוך
מומנט מתנגד ? עוצמת רכיב כוח ? כוח שקול + זווית ?	 or 	 קיבוע/ריתום

דג"ח – דיאגרמת גוף חופשי

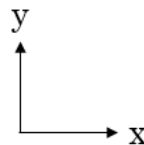
שיטה לניתוח הכוחות הפועלים על גופים והיא מיועדת לענות על אחד האתגרים הגדולים ביותר בתכנון מערכת הנדסית, ניתוח הכוחות הפועלים על חלק מערכת ובהמשך חישוב המאמצים הפועלים בחלק עצמו כדי להבטיח את תפקודו התקין בכל מצב.

שחרור הגוף מסמכים נקרא "דיאגרמת גוף חופשי" (דג"ח).

כל ניתוח של מצב מכני מתחיל בדיאגרמת גוף חופשי !

כיצד פותרים בעיות בשיווי משקל ?

(1) נתווה מערכת צירים ישרת זווית



(2) נשרטט במרכז מערכת הצירים את הגוף הנבדק (או הצומת הנבדק) כאשר הוא מנותק מסביבתו (או מגופים אחרים איתם הוא מצוי במגע).

(3) נשרטט על הגוף (או הצומת הנבדק) את הכוחות החיצוניים הפועלים עליו (משקל עצמי נחשב כוח חיצוני).

במקרה ויש כוחות נטויים נסמן את זוויות הכוחות **ביחס לציר ה-x**.

(4) נשער את כיוון פעולת כוחות תגובה (מומלץ להתחיל מהסמכים בעלי כוח תגובה אחד – כבל, קפיץ, סמך נייד ולאחר מכן לעבור לסמכים שהם יש יותר מכן תגובה אחד).

(5) נפרק כוחות נטויים לרכיבים ישרי זווית.

הערות:

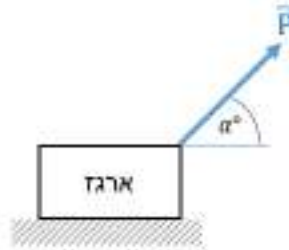
✧ מותר להזיז את הכוחות לאורך קו פעולתם כך שייחתכו עם הגוף.

✧ **הפרד** כל כוח נטוי לרכיביו ישרי הזווית.

✧ כאשר אין וודאות בכיוון פעולת כוח תגובה, **רצוי** לסמנו תמיד בכיוון שנבחר כ**חיובי**. אם תוצאת חישוב כוח התגובה **חיובית** אזי כיוון הכוח שהנחנו נכון, ואם התוצאה המתקבלת לאחר החישוב **שלילית** כיוונו של כוח התגובה צריך להימצא **הפוך** להנחה הראשונית.

דוגמה 2

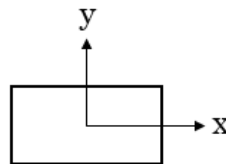
באיור לשאלה מתואר ארגז שמשקלו G , הנגרר על מישור מחוספס בעזרת כוח P . סרטוט דג"ח של הארגז.



פתרון דוגמה 2

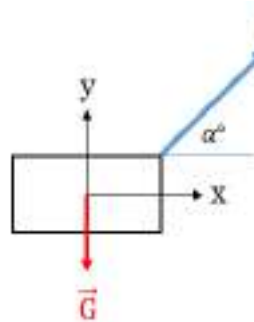
(1) נתווה מערכת צירים ישרת זווית

(2) נשרטט את הגוף הנבדק כאשר הוא מנותק מסביבתו במרכז מערכת הצירים.



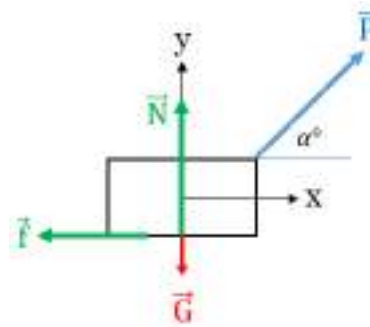
(3) נשרטט על הגוף (או הצומת הנבדקת) את הכוחות החיצוניים הפועלים עליו.

במקרה זה יש כוח נטוי בזווית α , אנו נסמנה בסרטוט **ביחס לציר ה-x**.

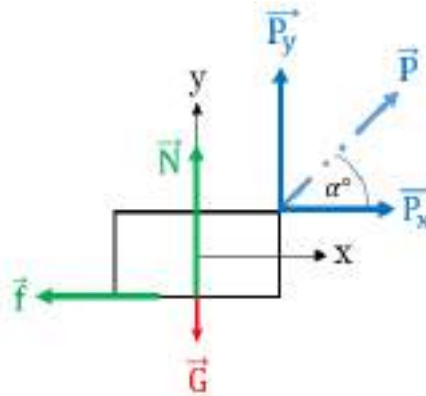


המשך פתרון דוגמה 2

(4) שערן כיוון פעולת כוחות תגובה.



(5) פרקן כוחות נטויים לרכיבים ישרי זווית.



3. מערכת כוחות משותפי נקודה

הגדרה: מערכת כוחות שקווי פעולתם נחתכים בנקודה אחת משותפת.

גוף נמצא **בשיווי משקל** כאשר שקול הכוחות הפועלים עליו **שווה אפס**.

קיימים שני מקרים:

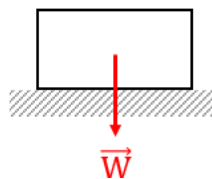
* אף כוח אינו פועל על הגוף.

* על הגוף פועל יותר מכוח אחד וסכומם (הווקטורי) שווה אפס – תנאי זה מספיק **רק** במקרה בו הכוחות משותפי נקודה. בהתאם לחוק הראשון של ניוטון מקרה זה מתקיים בשני מצבים: הגוף **נמצא במקומו במנוחה** או כאשר הגוף נע **במהירות קבועה בקו ישר**.

כאשר על גוף פועלים מספר כוחות והוא **אינו** בשיווי משקל, אם ברצוננו לגרום לגוף להימצא בשיווי משקל, עלינו להוסיף כוח שיאזן את שקול הכוחות, עוצמתו תהיה שווה לשקול הכוחות, ומיקומו יהיה על אותו קו פעולה בכיוון מנוגד.

דוגמה 3

גוף שמשקלו W המונח על הקרקע ללא תנועה. מה עוצמת תגובת הקרקע ?

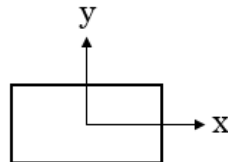


פתרון דוגמה 3

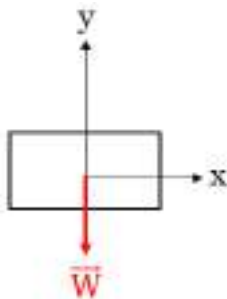
כל ניתוח של מצב מכני מתחיל בדיאגרמת גוף חופשי !

(1) נתווה מערכת צירים ישרת זווית.

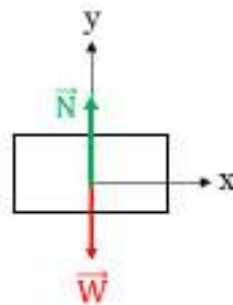
(2) נשרטט את הגוף הנבדק כאשר הוא מנותק מסביבתו במרכז מערכת הצירים.



(3) נשרטט על הגוף (או הצומת הנבדק) את הכוחות החיצוניים הפועלים עליו.



(4) נשער פעולת כוחות תגובה.



על-פי החוק השלישי של ניוטון מפעילה הקרקע כוח תגובה (הניצב לפני השטח). מיקומו בהמשך קו הפעולה של כוח המשקל וכיוונו הפוך לכיוון פעולת כוח המשקל.

מאחר והגוף נמצא בשיווי משקל (הוא אינו שוקע בקרקע ואינו עולה לאוויר) הרי שסכום הכוחות הפועלים עליו בציר האנכי y שווה לאפס, ובציר האופקי x ממילא לא פועלים כוחות.

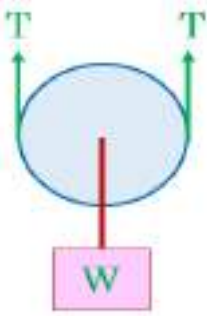
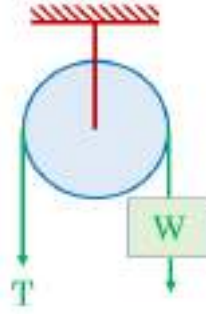
$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$-W + N = 0$$

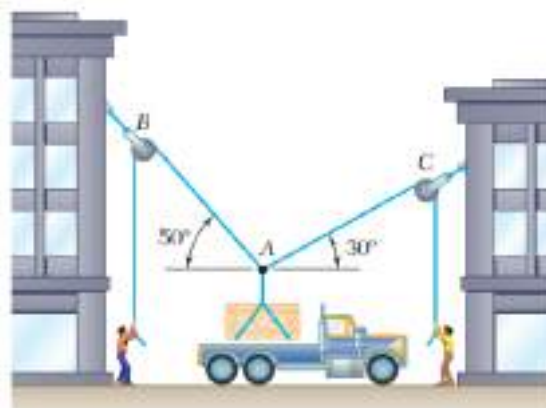
$$N = W$$

גלגלות

גלגלת ניידת (Movable Pulley)	גלגלת נייחת (Fixed Pulley)
משמשת להכפלת כוח המפעיל.	משמשת לשינוי כיוון פעולת הכוח
החבל אחוז בצד אחד, סובב סביב הגלגלת ונמשך מהצד השני. העומס המורם מחובר למרכז הגלגלת	הגלגלת עצמה סובבת סביב ציר קבוע ורק החבל נע
	
$T = \frac{W}{2}$	$T = W$

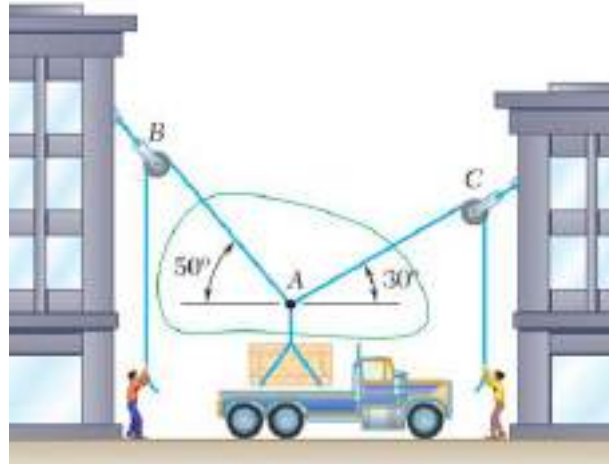
דוגמה 4

ארגז שמסתו 750 kg מורם על-ידי שני אנשים. חשב את הכוחות שמפעילים שני האנשים בכבל B ובכבל C.



פתרון דוגמה 4

נסמן על גבי הסרטוט את אזור החיתוך ונשרטט דג"ח של הצומת A.



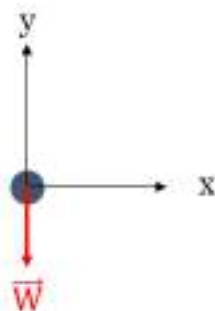
כל ניתוח של מצב מכני מתחיל בדיאגרמת גוף חופשי !

(1) נתונה מערכת צירים ישרת זווית.

(2) נשרטט את הצומת הנבדק כאשר היא מנותקת מסביבתה במרכז מערכת הצירים.



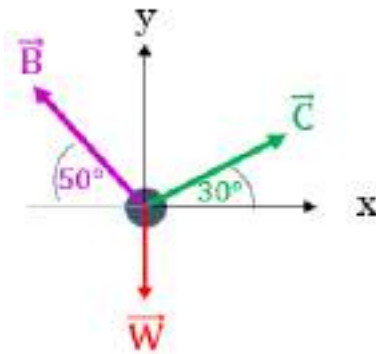
(3) נשרטט על הצומת הנבדקת את הכוחות החיצוניים הפועלים עליה.



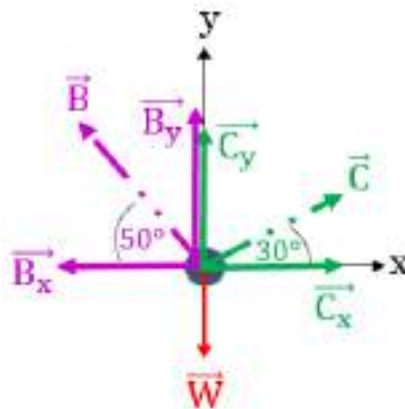
דוגמה 4 המשך מעמוד קודם

4) נשער פעולת כוחות תגובה.

במקרה זה יש כוחות נטויים, אנו נסמן את זוויות הנטייה שלהם בשרטוט **ביחס לציר ה-x**.



5) נפרק את הכוחות הנטויים לרכיבים ישרי זווית.



$$\vec{B}_x = \vec{B} \cdot \cos 50^\circ \quad \vec{C}_x = \vec{C} \cdot \cos 30^\circ$$

$$\vec{B}_y = \vec{B} \cdot \sin 50^\circ \quad \vec{C}_y = \vec{C} \cdot \sin 30^\circ$$

המשך פתרון דוגמה 4

הנחת יסוד הגוף מצוי בשיווי משקל. נכתוב משוואות שיווי משקל לציר אופקי ולציר אנכי.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-B \cdot \cos 50^\circ + C \cdot \cos 30^\circ = 0$$

$$C = 0.743 \cdot B$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$B \cdot \sin 50^\circ + C \cdot \sin 30^\circ - 750 = 0$$

$$B \cdot \sin 50^\circ + 0.743 \cdot B \cdot \sin 30^\circ - 750 = 0$$

$$B \cong 660 \text{ N}$$

$$C = 0.743 \cdot B = 0.743 \cdot 660 = 490 \text{ N}$$

מסקנה: כיווני הכוחות שהתקבלו בחישוב חיוביים ולכן הם תואמים את ההנחה הראשונית שלנו.

קפיץ

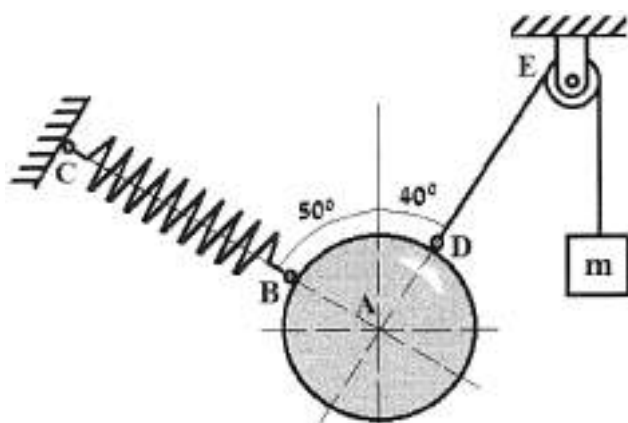
עצם גמיש המשמש לאגירת אנרגיה מכנית באמצעות אנרגיה פוטנציאלית אלסטית.

חוק הוק:

$$k = \frac{F_k}{x}$$

F_k הכוח הפועל על הקפיץ
 k קבוע הקפיץ – הכוח שיש להפעיל על הקפיץ לשינוי אורכו ביחידת אורך¹
 x מידת התארכות או התכווצות הקפיץ²
 $\frac{N}{mm}$
 mm

דוגמה 5



כדור אחיד A שמשקלו 150 N, מוחזק במצב המתואר באיור לשאלה, בעזרת קפיץ BC המחובר לכדור בנקודה B וכבל המחובר לכדור בנקודה D ועובר דרך גלגלת E. בקצה הכבל תלוי גוף שמסתו m. הקפיץ נטוי ביחס לציר האנכי בזווית 50° והכבל נטוי ביחס לציר האנכי בזווית 40° כמוצג באיור לשאלה.

מידות גלגלת E והחיכוך בה זניחים.

דרוש:

א. הכוח הפועל על הקפיץ.

ב. מה יהיה שינוי אורך הקפיץ לעומת מצבו החופשי אם קבוע הקפיץ $850 \frac{N}{mm}$?

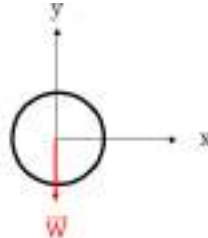
¹ בהמשך הדרך כאשר נלמד חלקי מכונות יסומן באות C.
² בהמשך הדרך כאשר נלמד חלקי מכונות יסומן באות f.

פתרון דוגמה 5

א. הכוח הפועל על הקפיץ

(1) נתונה מערכת צירים ישרת זווית.

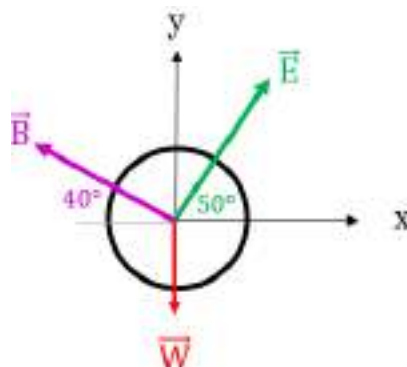
(2) נשרטט את הגוף הנבדק כאשר הוא מנותק מסביבתו במרכז מערכת הצירים.



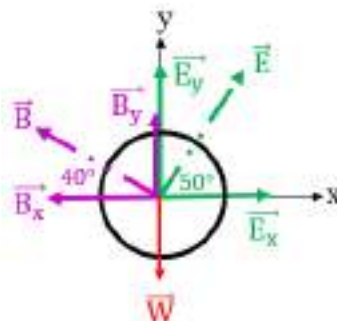
(3) נשרטט על הצומת הנבדקת את הכוחות החיצוניים הפועלים עליה.

(4) נשער פעולת כוחות תגובה.

במקרה זה יש כוחות נטויים, אנו נסמן את זוויות הנטייה שלהם בשרטוט **ביחס לציר ה-x**.



(5) נפרק את הכוחות הנטויים לרכיבים ישרי זווית.



$$\vec{B}_x = \vec{B} \cdot \cos 40^\circ \quad \vec{E}_x = \vec{E} \cdot \cos 50^\circ$$

$$\vec{B}_y = \vec{B} \cdot \sin 40^\circ \quad \vec{E}_y = \vec{E} \cdot \sin 50^\circ$$

דוגמה 5 המשך מעמוד קודם

הנחת יסוד הגוף מצוי בשיווי משקל. נכתוב משוואות שיווי משקל לציר אופקי ולציר אנכי.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-B \cdot \cos 40^\circ + E \cdot \cos 50^\circ = 0$$

$$E = 1.192 \cdot B$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$B \cdot \sin 40^\circ + E \cdot \sin 50^\circ - 150 = 0$$

$$B \cdot \sin 40^\circ + 1.192 \cdot B \cdot \sin 50^\circ - 150 = 0$$

$$B \cong 96.5 \text{ N}$$

$$E = 1.192 \cdot B = 1.192 \cdot 96.5 = 115 \text{ N}$$

מסקנה: כיווני הכוחות שהתקבלו בחישוב חיוביים ולכן הם תואמים את ההנחה הראשונית שלנו.

ב. שינוי אורך הקפיץ

$$k = \frac{F_k}{x}$$

$$850 = \frac{96.5}{x}$$

$$x = 0.114 \text{ mm}$$

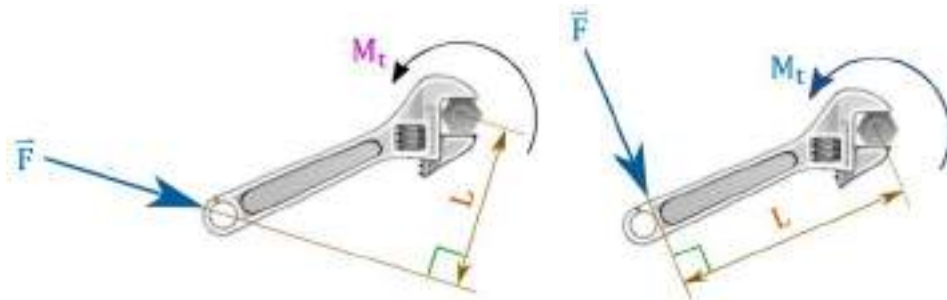
4. מערכת כוחות מקבילים

מומנט

תנועה סיבובית הנגרמת עקב פעולת כוח המצוי במרחק מנקודה קבועה המכונה ציר סיבוב (אמיתי או דמיוני). הקו הקצר ביותר בין נקודת הסיבוב (ציר) לקו פעולת הכוח הוא קו מיוחד היוצא מהציר ו**מאונך** לקו פעולת הכוח אותו נכנה 'זרוע'.

תנאים להיווצרות מומנט:

- * כוח מופעל על גוף בנקודת פעולה המצויה במרחק כלשהו מציר סיבוב.
- * בין קו פעולת הכוח לבין המרחק זווית 90° .



$$M_t = F \cdot L$$

$N \cdot m$	מומנט סיבוב	M_t
N	כוח הפועל במרחק מנקודת ציר	F
m	אורך הזרוע (הקו המאונך לקו פעולת הכוח) ³	L

כוח הפועל בנקודת הציר (או חודר לציר) אינו יוצר מומנט (מומנט הסיבוב שווה לאפס), תפקיד הציר "להחזיק" – להפעיל כוח המתנגד לפעולת הכוח.

כלל סימנים

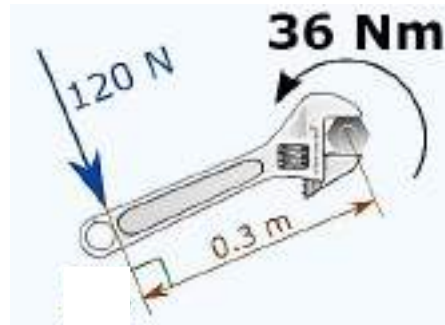
תנועה סיבובית נגד כיוון השעון תנועה סיבובית עם כיוון השעון



³ במידה ואורך הזרוע נתון במטר ניתן לבצע את חישוב המומנט ביחידות Nmm. הקפד על יחידות אחידות לאורך כל התרגיל.

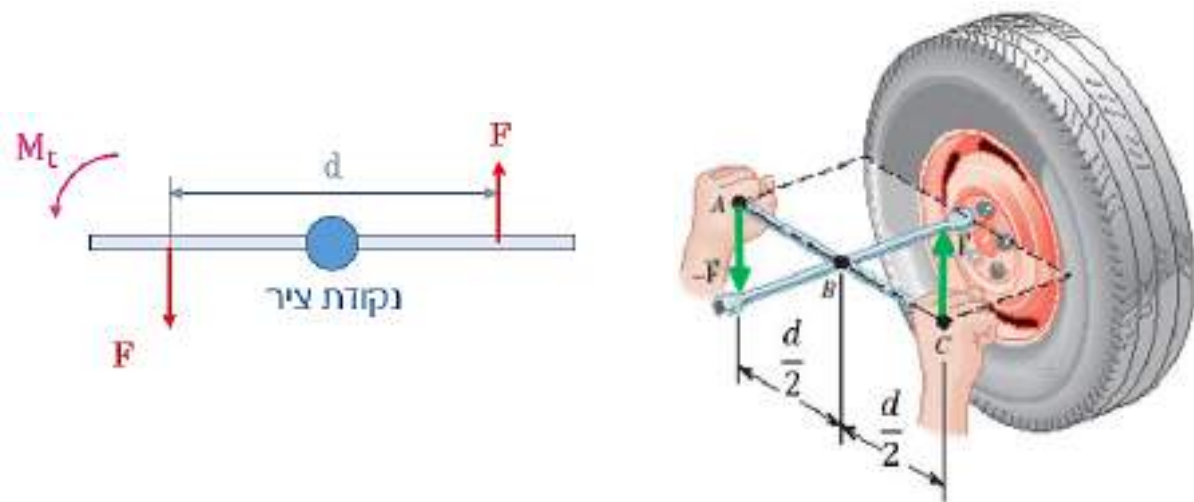
דוגמה 6

כוח שעוצמתו 120 N פועל בקצה זרוע שגודלה 0.3 m. מה עוצמת מומנט הסיבוב שיוצר הכוח על הבורג?



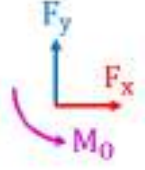
צמד כוחות (מומנט טהור)

מומנט הנוצר מהפעלת זוג כוחות שווים בעוצמתם ומונגדים בכיוונם, המקבילים זה לזה.



N · mm	מומנט סיבוב	M _t	
N	כוח הפועל במרחק מנקודת ציר	F	M _t = F · d
mm	מרחק בין הכוחות	d	

סמכים וכוחות תגובה נפוצים

שם הסמך	סמל	כוח תגובה	מספר נעלמים
סמך ניד			1
סמך ניח			2
רתום			3

סדר פתרון בעיות

1) שרטוט דג"ח

- נשרטט את הגוף הנבדק כאשר הוא מנותק מסביבתו (או מגופים אחרים איתם הוא מצוי במגע).
- נשרטט על הגוף את הכוחות החיצוניים הפועלים עליו (משקל עצמי נחשב כוח חיצוני).
- במקרה זה ויש כוחות נטויים נסמן את זווית/יות הכוחות **ביחס לציר ה-x**.
- נשער את כיוון פעולת כוחות תגובה (מומלץ להתחיל מהסמכים בעלי כוח תגובה אחד – כבל, קפיץ, סמך נייד ולאחר מכן לעבור לסמכים שהם יש יותר מכן תגובה אחד – סמך נייח או ריתום).
- נבחר נקודת ציר (נקודה בעלת מספר הנעלמים הגדול ביותר) ונסמן מרחקים ביחס לנקודת הציר.
- הננו מערכת צירים ישרת זווית ובסמוך לה נציין את הכיוון החיובי של מומנט הסיבוב.

הערה:

כאשר אין וודאות בכיוון פעולת כוח תגובה, **רצוי** לסמנו תמיד בכיוון שנבחר כחיובי. אם תוצאת חישוב כוח התגובה חיובית אזי כיוון הכוח שהנחנו נכון, ואם התוצאה המתקבלת לאחר החישוב שלילית כיוונו של כוח התגובה שגוי והוא צריך להימצא **הפוך** להנחה הראשונית.

2) נפרק כוחות נטויים לרכיבים ישרי זווית.

F_x	רכיב כוח על ציר ה-x (רכיב אופקי)	$\vec{F}_x = \vec{F} \cdot \cos \alpha^\circ$
F_y	רכיב כוח על ציר ה-y (רכיב אנכי)	$\vec{F}_y = \vec{F} \cdot \sin \alpha^\circ$
α°	זווית בין הכוח לציר ה-x	

כלל הסימנים:

- רכיב כוח יוגדר " + " (חיובי) כאשר הכוח מכון **עם** כיוון הציר
- רכיב כוח יוגדר " - " (שלילי) כאשר הכוח מכון **נגד** כיוון הציר.

3) נרשום תנאי שיווי משקל:

$$\Sigma M_0 = 0 \quad \text{אין תנועה סיבובית סביב נקודת ציר מוגדרת}$$

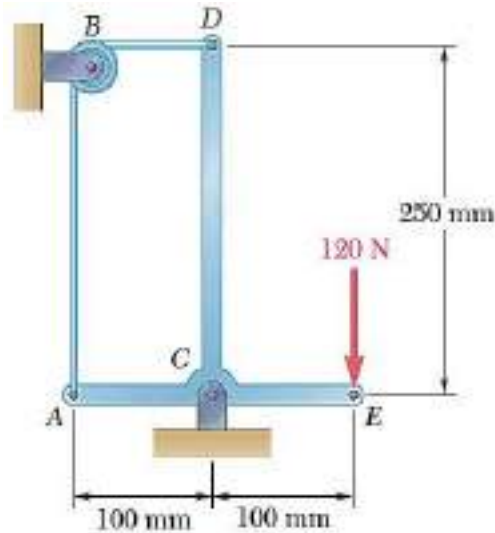
$$\Sigma F_y = 0 \quad \text{אין תנועה קווית בציר אנכי}$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad \text{אין תנועה קווית בציר אופקי}$$

4) נפתור את משוואות שיווי המשקל.

דוגמה 7

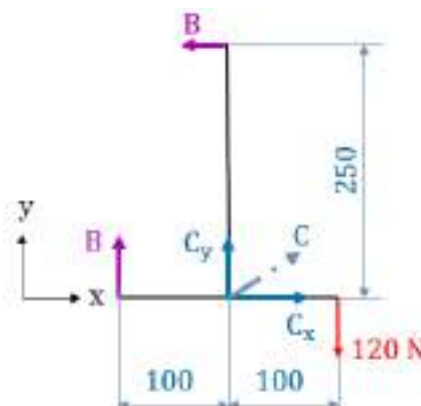
על הקורה ACDE פועל כוח שעוצמתו 120 N . בהזנחת כוחות החיכוך בגלגלת B וממדי הגלגלת, חשב את מתיחות הכבל ABC ואת כוחות התגובה בסמך הנייח C (עוצמה וכיוון).



פתרון דוגמה 7

1) שרטוט דג"ח

- נשרטט את הגוף הנבדק כאשר הוא מנותק מסביבתו (או מגופים אחרים איתם הוא מצוי במגע).
- נשרטט על הגוף את הכוחות החיצוניים הפועלים עליו (משקל עצמי נחשב כוח חיצוני).
- נשער את כיוון פעולת כוחות תגובה (מומלץ להתחיל מהסמכים בעלי כוח תגובה אחד – כבל, קפיץ, סמך ניד ולאחר מכן לעבור לסמכים שהם יש יותר מן תגובה אחד – סמך נייח או ריתום).
- נבחר נקודת ציר (נקודה בעלת מספר הנעלמים הגדול ביותר) ונסמן מרחקים ביחס לנקודת הציר.
- נתווה מערכת צירים ישרת זווית ובסמוך לה נציין את הכיוון החיובי של מומנט הסיבוב.



המשך פתרון דוגמה 7

(2) תנאי שיווי משקל

אין תנועה סיבובית סביב נקודת ציר מוגדרת – C

$$\Sigma M_C = 0$$

$$B \cdot 250 - B \cdot 100 + 120 \cdot 100 = 0$$

$$B = 80 \text{ N}$$

אין תנועה קווית בציר אנכי

$$\Sigma F_y = 0$$

$$80 - 120 + C_y = 0$$

$$C_y = 40 \text{ N}$$

אין תנועה קווית בציר אופקי

$$\Sigma F_x = 0$$

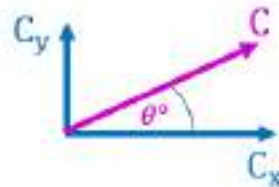
$$-80 + C_x = 0$$

$$C_x = 80 \text{ N}$$

כיווני הכוחות שהתקבלו בחישוב חיוביים ולכן הם תואמים את ההנחה הראשונית שלנו.

(3) כוח שקול סמך C

נסרטט את כוחות התגובה בסמך C לפי כיוונם ונחשב את הכוח השקול הפועל בסמך (עוצמה וכיוון).

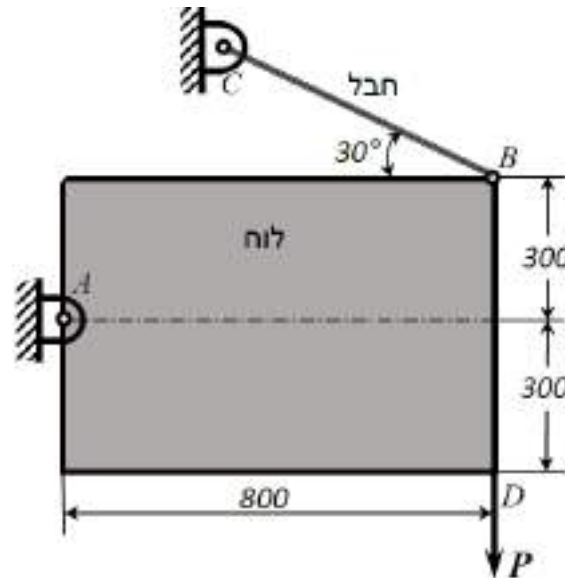


$$C = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} = \sqrt{80^2 + 40^2} = 89.5 \text{ N}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{C_y}{C_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{40}{80}\right) = 26.6^\circ$$

דוגמה 8

לוח אחיד שמשקלו 300 N נתמך בנקודה A בסמך נייח ובנקודה B הוא מחובר לחבל BC , כמתואר באיור לשאלה. בנקודה D מופעל על הלוח כוח אנכי, $P = 750\text{ N}$. הלוח נמצא במצב שיווי משקל. חשבו את כוחות התגובה בסמך A (שיעור וכיוון).

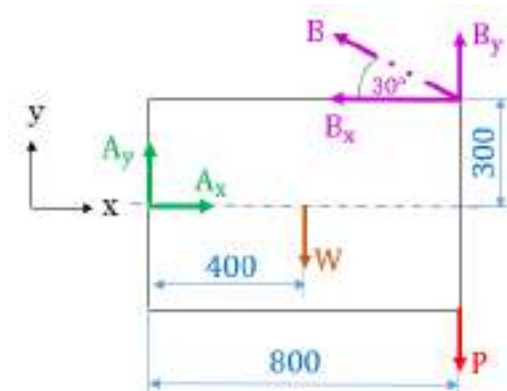


פתרון דוגמה 8

1) שרטוט דג"ח

- א. נשרטט את הגוף הנבדק כאשר הוא מנותק מסביבתו (או מגופים אחרים איתם הוא מצוי במגע).
- ב. נשרטט על הגוף את הכוחות החיצוניים הפועלים עליו (משקל עצמי נחשב כוח חיצוני). במקרה זה ויש כוחות נטויים נסמן את זווית/יות הכוח/ות **ביחס לציר ה-x**.
- ג. נשער את כיוון פעולת כוחות תגובה (מומלץ להתחיל מהסמכים בעלי כוח תגובה אחד – כבל, קפיץ, סמך ניד ולאחר מכן לעבור לסמכים שהם יש יותר מכן תגובה אחד – סמך נייח או ריתום).
- ד. נבחר נקודת ציר (נקודה בעלת מספר הנעלמים הגדול ביותר) ונסמן מרחקים ביחס לנקודת הציר.
- ה. נתווה מערכת צירים ישרת זווית ובסמוך לה נציין את הכיוון החיובי של מומנט הסיבוב.

דוגמה 8 המשך מעמוד קודם



(2) נפרק כוחות נטויים לרכיבים ישרי זווית

$$\vec{B}_x = \vec{B} \cdot \cos 30^\circ$$

$$\vec{B}_y = \vec{B} \cdot \sin 30^\circ$$

(3) תנאי שיווי משקל

אין תנועה סיבובית סביב נקודת ציר מוגדרת – A

$$\Sigma M_A = 0$$

$$-W \cdot 400 - P \cdot 800 + B_y \cdot 800 + B_x \cdot 300 = 0$$

$$-300 \cdot 400 - 750 \cdot 800 + B \cdot \cos 30^\circ \cdot 800 + B \cdot \sin 30^\circ \cdot 300 = 0$$

$$B \cong 855 \text{ N}$$

אין תנועה קווית בציר אנכי

$$\Sigma F_y = 0$$

$$A_y - W - P + \vec{B} \cdot \sin 30^\circ = 0$$

$$A_y - 300 - 750 + 855 \cdot \sin 30^\circ = 0$$

$$A_y = 622.5 \text{ N}$$

אין תנועה קווית בציר אופקי

$$\Sigma F_x = 0$$

$$A_x - \vec{B} \cdot \cos 30^\circ = 0$$

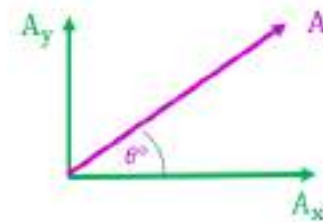
$$A_x - 855 \cdot \cos 30^\circ = 0$$

$$A_x = 740.5 \text{ N}$$

כיווני הכוחות שהתקבלו בחישוב חיוביים ולכן הם תואמים את ההנחה הראשונית שלנו.

דוגמה 8 המשך מעמוד קודם

4) כוח שקול סמך A
נסרטט את כוחות התגובה בסמך לפי כיוונם



$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} = \sqrt{740.5^2 + 622.5^2} \approx 967.5 \text{ N}$$

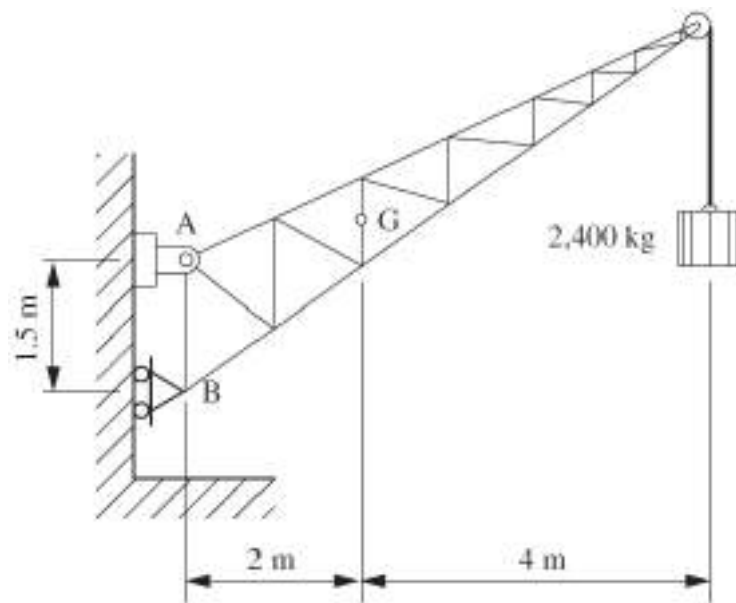
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{A_y}{A_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{622.5}{740.5}\right) = 40^\circ$$

5. מערכת כוחות מישוריים – מקרה כללי

דוגמה 9

המנוף המתואר באיור לשאלה מחובר לקיר באמצעות פין A וסמך נייד B. המנוף מיועד להרמת עומס שמסתו 2400 kg. מסה עצמית של המנוף (ללא עומס), 1000 kg. מרכז הכובד של המנוף מצוין באיור באות G.

הנח שתאוצת הכובד: $g = 10 \frac{m}{sec^2}$.

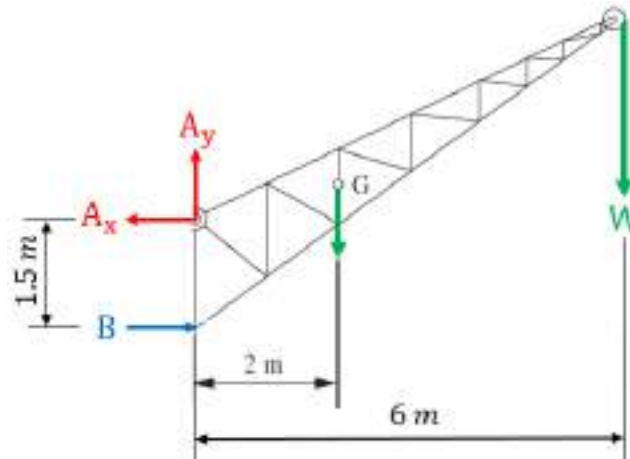


דרוש:

- בנו דיאגרמת גוף חופשי של המנוף.
- כתבו משוואת שיווי משקל למנוף.
- חשבו את כוחות התגובה בפין A (גודל וכיוון) ואת כוח התגובה בסמך B (גודל וכיוון).

פתרון דוגמה 9

א. בנו דיאגרמת גוף חופשי של המנוף.



ב. כתבו משוואות שיווי משקל למנוף.

$$\begin{aligned}\Sigma M_A &= 0 \\ +B \cdot 1.5 - G \cdot 2 - W \cdot 6 &= 0\end{aligned}$$

אין תנועה קווית בציר אנכי

$$\begin{aligned}\Sigma F_y &= 0 \\ A_y - G - W &= 0\end{aligned}$$

אין תנועה קווית בציר אופקי

$$\begin{aligned}\Sigma F_x &= 0 \\ -A_x + B &= 0\end{aligned}$$

ג. חשבו את כוחות התגובה בפין A (גודל וכיוון) ואת כוח התגובה בסמך B (גודל וכיוון).

$$+B \cdot 1.5 - 1000 \cdot 10 \cdot 2 - 2400 \cdot 10 \cdot 6 = 0$$

$$B = 29334 \text{ N}$$

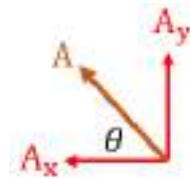
$$A_y - 10000 - 24000 = 0$$

$$A_y = 34000 \text{ N}$$

$$-A_x + B = 0$$

$$A_x = 29334 \text{ N}$$

דוגמה 9 המשך מעמוד קודם

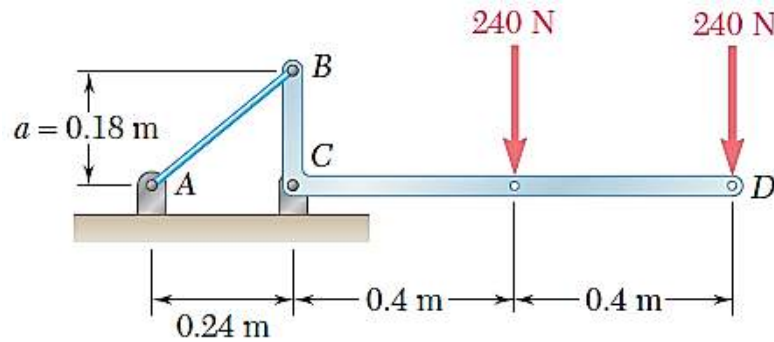


$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} = \sqrt{29334^2 + 34000^2} \cong 44905 \text{ N}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{A_y}{A_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{34000}{-29334}\right) = -49.2^\circ$$

דוגמה 10

הקורה המכופפת BCD יכולה להסתובב סביב סמך C ומקובעת במקומה באמצעות כבל AB. חשב את כוח המתיחה בכבל B ואת כוחות התגובה בסמך C.

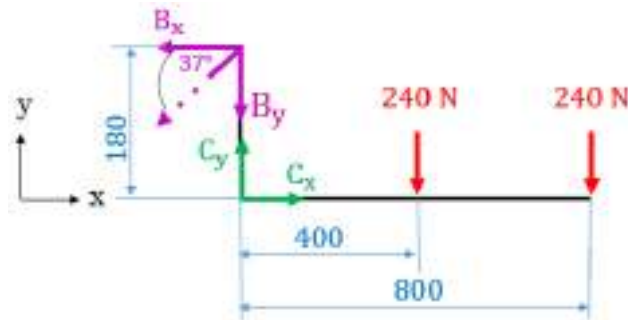


דרוש:

- בנו דיאגרמת גוף חופשי של הקורה המכופפת BCD.
- כתבו משוואות שיווי משקל לקורה.
- חשבו את כוחות התגובה בפין C (גודל וכיוון) ואת כוח התגובה בכבל AB (גודל וכיוון).

פתרון דוגמה 10

א. בנו דיאגרמת גוף חופשי של הקורה המכופפת BCD.



ב. כתבו משוואת שיווי משקל לקורה.

נפרק כוחות/נטוים לרכיבים ישרי זווית

$$\tan^{-1}\left(\frac{0.18}{0.24}\right) = 37^\circ$$

$$B_x = B \cdot \cos 37^\circ$$

$$B_y = B \cdot \sin 37^\circ$$

אין תנועה סיבובית סביב נקודת ציר מוגדרת – C

$$\begin{aligned} \Sigma M_C &= 0 \\ B_x \cdot 180 - 240 \cdot 400 - 240 \cdot 800 &= 0 \end{aligned}$$

אין תנועה קווית בציר אנכי

$$\begin{aligned} \Sigma F_y &= 0 \\ -B_y + C_y - 240 - 240 &= 0 \end{aligned}$$

אין תנועה קווית בציר אופקי

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 \\ C_x - B_x &= 0 \end{aligned}$$

דוגמה 10 המשך מעמוד קודם

ג. חשבו את כוחות התגובה בפין C (גודל וכיוון) ואת כוח התגובה בכבל AB (גודל וכיוון).

$$B \cdot \cos 37^\circ \cdot 180 - 240 \cdot 400 - 240 \cdot 800 = 0$$

$$B = 2003.5 \text{ N}$$

$$-B \cdot \cos 37^\circ + C_y - 240 - 240 = 0$$

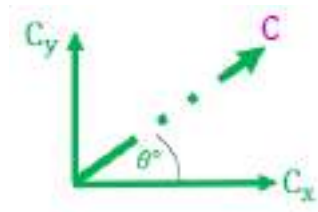
$$C_y = 726 \text{ N}$$

$$C_x - B \cdot \cos 37^\circ = 0$$

$$C_x = 1600 \text{ N}$$

כיווני הכוחות שהתקבלו בחישוב חיוביים ולכן הם תואמים את ההנחה הראשונית שלנו.

כוח שקול סמך C

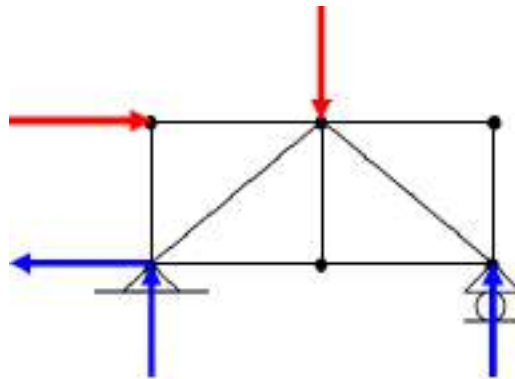


$$C = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} = \sqrt{1600^2 + 726^2} = 1757 \text{ N}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{C_y}{C_x} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{726}{1600} \right) = 24.5^\circ$$

6. מסבכים מישוריים

מבנה המורכב מוטות המחברים ביניהם באמצעות פרקים ונשענים על גבי סמכים. נקודות החיבור בין המוטות מכונות צמתים. על המבנה פועלים כוחות ונדרש לחשב את הכוחות הפנימיים הפועלים במוטות.



בחישוב מסבכים אנו מניחים:

1. כל הכוחות פועלים בצמתים בלבד.
2. כל הפרקים הם אידיאליים (אין בהם חיכוך).
3. כל המוטות חסרי משקל.

קיום שלושת התנאים האלה מבטיח כי כל הכוחות הפנימיים פועלים לאורך צירי המוטות בלבד ולכן הם כוחות מתיחה או לחיצה.

כללים לפתרון מסבכים:

1. מתחילים כל פתרון מסבך מחישוב כוחות התגובה בסמכים.
2. הכוחות הפנימיים הפועלים במוטות הם שווים ומונגדים. אם תוצאות החישוב של הכוחות הפנימיים מכוונים כלפי פנים – המוט נמתח, ואם הם מכוונים כלפי חוץ – המוט נלחץ.

שיטת רייטר

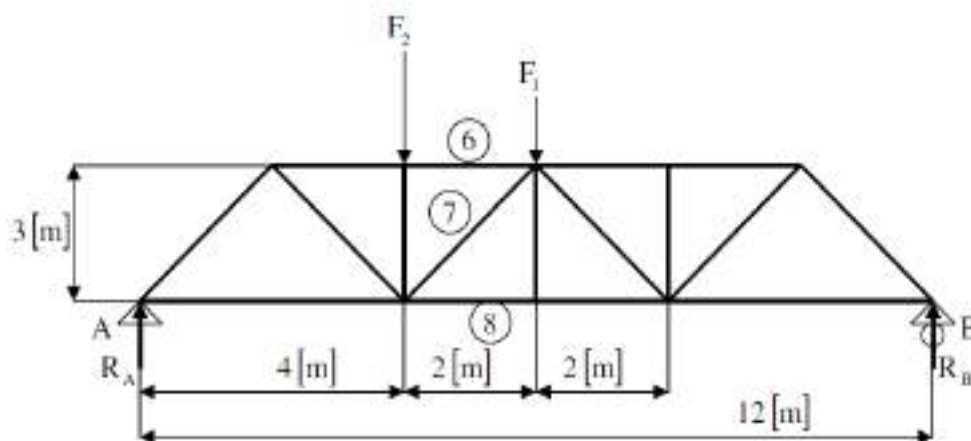
יתרונה של השיטה הזו היא שבעזרתה אנו יכולים לחשב ישירות את הכוחות באותם מוטות בהם אנו מעוניינים, ואין צורך לחשב את כל המסבך.

השיטה מבוססת על כך שאם המסבך נמצא בשיווי משקל, אזי כל צומת בו מצוי בשיווי משקל. בשיטה זו אנו חותכים באורח דמיוני את המסבך דרך המוטות אותם אנו רוצים לחשב, מסירים את אחד הצדדים החתוכים של המסבך ומפעילים לאורך המוטות בחלק המסבך שנותר את הכוחות הפנימיים הפועלים בכל אחד מהמוטות ואת הכוחות החיצוניים הפועלים עליו.

חיתוך המוטות **חייב** להתבצע לאורך קו ישר מקצהו החיצוני האחד של המסבך ועד לקצה החיצוני של המסבך, כך שהמסבך יופרד לשני חלקים. החיתוך יכול להיות בכל נקודה לאורך המוט (**לא בצומת**). במערכת כוחות משותפי נקודה יש לנו רק שתי משוואות שיווי משקל ולכן אסור לנו לחתוך צומת בו יש יותר משני נעלמים.

דוגמה 11

על המסבך פועלים הכוחות הבאים: $F_1 = 100 \text{ N}$; $F_2 = 300 \text{ N}$, חשב את הכוחות הפנימיים הפועלים במוטות ⑥, ⑦, ⑧, וסמן האם הם נלחצים או נמתחים.



דוגמה 11 המשך מעמוד קודם

כוחות תגובה בסמכים:

$$\Sigma M_A = -F_2 \cdot 4 - F_1 \cdot 6 + B \cdot 12 = 0$$

$$-300 \cdot 4 - 100 \cdot 6 + B \cdot 12 = 0$$

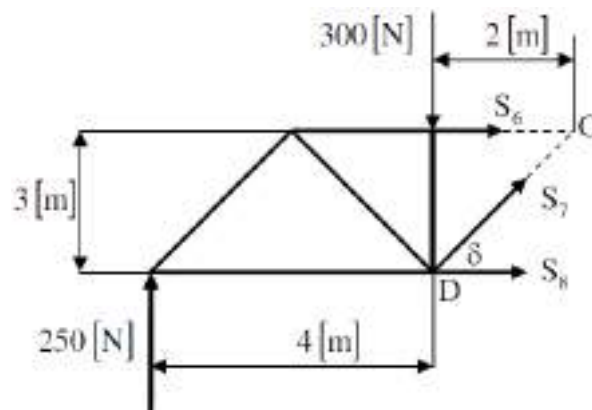
$$B = 150 \text{ N}$$

$$\Sigma F_y = A - F_2 - F_1 + B = 0$$

$$A - 300 - 100 + 150 = 0$$

$$A = 250 \text{ N}$$

נחתוך את המסבך מקצהו החיצוני העליון דרך המוטות המבוקשים ועד קצהו החיצוני התחתון, נסיר את הצד הימני של המסבך ונסמן בחלק הנשאר את הכוחות הפנימיים כלפי חוץ, כאילו הם גורמים למתיחת המוטות. אם התוצאה תהיה **חיובית** המוט **נמתח** ואם התוצאה תהיה **שלילית** המוט **נלחץ** (ניתן להסיר את החלק השמאלי הבחירה היא שרירותית).



דוגמה 11 המשך מעמוד קודם

מוט ⑧

$$\Sigma M_C = -A \cdot 6 + F_2 \cdot 2 + S_8 \cdot 3 = 0$$

$$-250 \cdot 6 + 300 \cdot 2 + S_8 \cdot 3 = 0$$

$S_8 = 300$ N, מתיחה

מוט ⑥

$$\Sigma M_D = -A \cdot 4 - S_6 \cdot 3 = 0$$

$$-250 \cdot 4 - S_6 \cdot 3 = 0$$

$S_6 = -333.4$ N, לחיצה

מוט ⑦

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{3}{2} \right) = 56.3^\circ$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$250 - 300 + S_7 \cdot \sin 56.3^\circ = 0$$

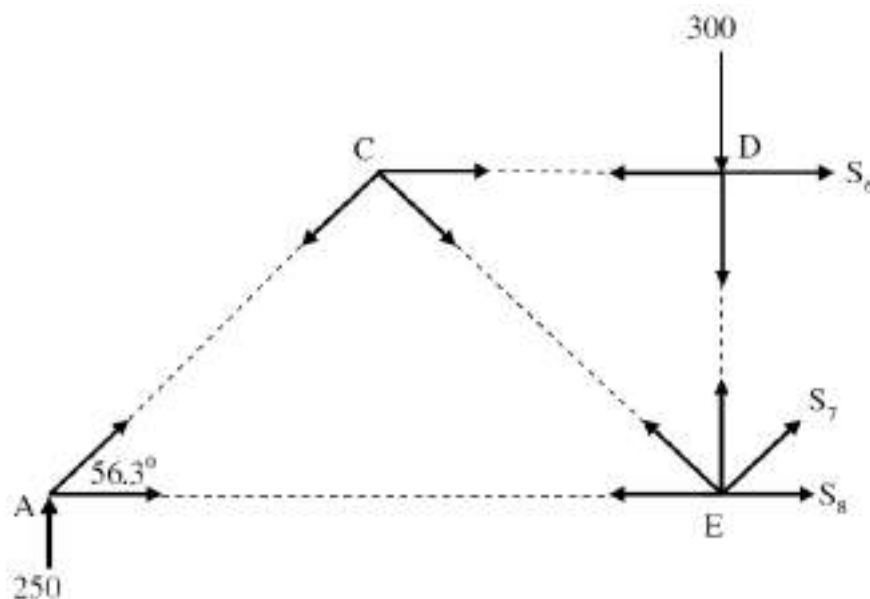
$S_7 = 60.1$ N, מתיחה

שיטת הצומת

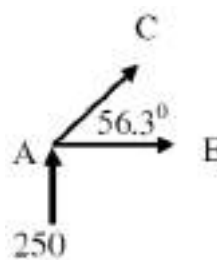
בשיטה זו אנו מפרקים את כל המסבך לצמתים ומשאירים את המוטות המחוברים לאותו הצומת. מתנאי שיווי משקל כל צומת נמצא בשיווי משקל, כלומר סה"כ הכוחות הפועלים בצומת הוא אפס. גם בשיטה זו יש לחשב תחילה את כוחות התגובה בסמכים.

הערה: מתחילים את הפתרון מהצומת שיש לנו נתון מספרי.

דוגמה 12



צומת A



$$\Sigma F_y = 0$$

$$250 + AC \cdot \sin 56.3^\circ = 0$$

$$AC = -300.5 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-300.5 \cdot \cos 56.3^\circ + AE = 0$$

$$AE = 166.75 \text{ N}$$

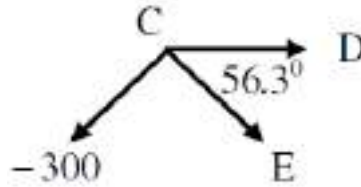
המשך בעמוד הבא

דוגמה 12 המשך מעמוד קודם

צומת C

$$\Sigma F_y = 0$$

$$-CE \cdot \sin 56.3^\circ - 300.5 \cdot \sin 56.3^\circ = 0$$



$$CE = -300.5 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

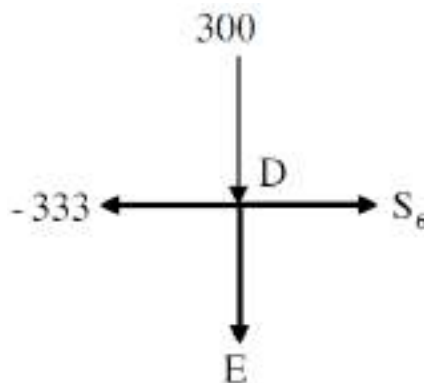
$$CD - 300.5 \cdot \cos 56.3^\circ - 300.5 \cdot \cos 56.3^\circ = 0$$

$$CD = 333.5 \text{ N}$$

צומת D

$$\Sigma F_y = 0$$

$$-300 - DE = 0$$



$$DE = -300 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

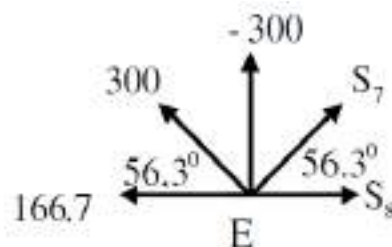
$$+333.5 + S_6 = 0$$

$$S_6 = -333.5 \text{ N, לחיצה}$$

צומת E

$$\Sigma F_y = 0$$

$$-300 + 300.5 \cdot \sin 56.3^\circ + S_7 \cdot \sin 56.3^\circ = 0$$



$$S_7 = 60.1 \text{ N, מתיחה}$$

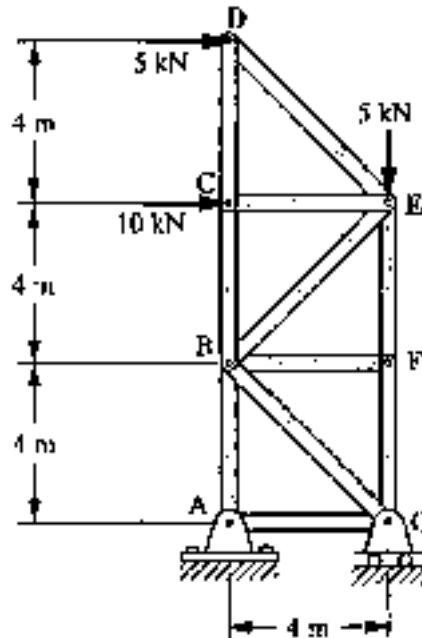
$$\Sigma F_x = 0$$

$$-166.7 - 300 \cdot \cos 56.3^\circ + S_8 + 60.1 \cdot \cos 56.3^\circ = 0$$

$$S_8 = 300 \text{ N, מתיחה}$$

דוגמה 13

באיור לשאלה מתואר מסבך הנתמך על ידי סמך ניח בנקודה A וסמך נייד בנקודה G. על המסבך פועלים שני כוחות אופקיים וכוח אחד אנכי, כמתואר באיור.

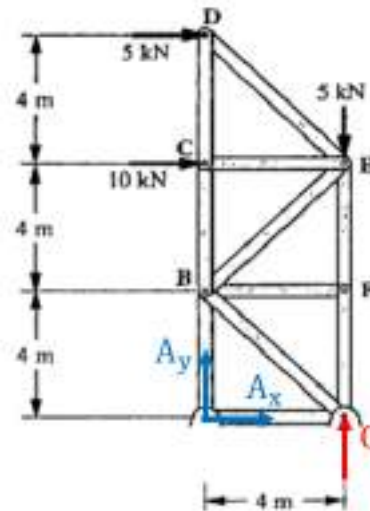


דרוש:

- תגובות סמכי המסבך A ו-G.
 - כוחות פנימיים במוטות BC, BE ו-EF.
- הערה:** לגבי כל מוט, ציין האם הוא נמתח או נלחץ.
- באיזה מוט של המסבך לא נוצרים כוחות פנימיים, הסבר את תשובתך.

פתרון דוגמה 13

א. תגובות סמכי המסבך A ו-G.



אין תנועה סיבובית סביב נקודת ציר מוגדרת – A

$$\Sigma M_A = 0$$

$$-5 \cdot 12 - 10 \cdot 8 - 5 \cdot 4 + G \cdot 4 = 0$$

$$G \approx 40 \text{ kN}$$

אין תנועה קווית בציר אנכי

$$\Sigma F_y = 0$$

$$A_y + G - 5 = 0$$

$$A_y + 40 - 5 = 0$$

$$A_y = -35 \text{ kN}$$

אין תנועה קווית בציר אופקי

$$\Sigma F_x = 0$$

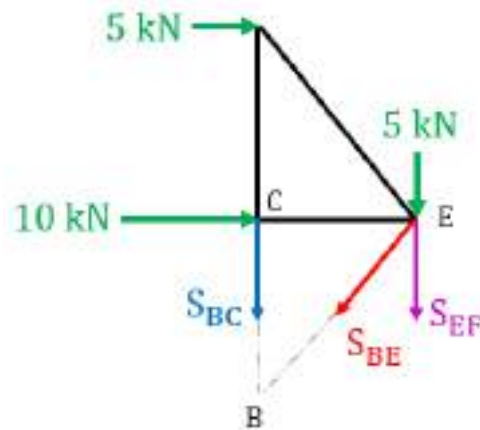
$$A_x + 5 + 10 = 0$$

$$A_x = -15 \text{ kN}$$

דוגמה 13 המשך מעמוד קודם

ב. כוחות פנימיים במוטות BC, BE ו-EF.

הערה: לגבי כל מוט, ציין האם הוא נמתח או נלחץ.



אין תנועה סיבובית סביב נקודת ציר מוגדרת – B

$$\Sigma M_B = 0$$

$$-5 \cdot 8 - 10 \cdot 4 - 5 \cdot 4 - S_{EF} \cdot 4 = 0$$

לחיצה, $S_{EF} = -25 \text{ kN}$

אין תנועה קווית בציר אופקי

$$\Sigma F_x = 0$$

$$5 + 10 - S_{EB} \cdot \cos 45^\circ = 0$$

מתיחה, $S_{EB} = 21.2 \text{ kN}$

אין תנועה סיבובית סביב נקודת ציר מוגדרת – E

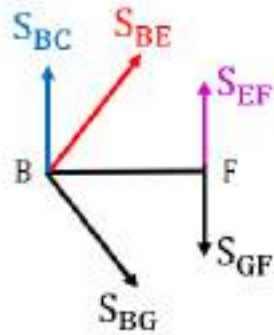
$$\Sigma M_E = 0$$

$$-5 \cdot 8 + S_{BC} \cdot 4 = 0$$

מתיחה, $S_{BC} = 10 \text{ kN}$

דוגמה 13 המשך מעמוד קודם

ג. באיזה מוט של המסבך לא נוצרים כוחות פנימיים, הסבר את תשובתך.



במוט BF לא נוצרים כוחות פנימיים, מאחר ולא נוצרים כוחות בציר x.

סעיף זה פתרנו לפי שיטת חיתוך הצומת.

7. מרכז כובד

נקודה בתוך או מחוץ לגוף קשיח אשר דרכה עוברים כל קווי הפעולה של המשקל הכללי של הגוף (השקול של כל כוחות המשיכה עובר דרך נקודה זו). ובשפה פשוטה: אם נתמוך את הגוף הקשיח במרכז הכובד הוא יישאר מאוזן.

ניתן לראות כל גוף קשיח כגוף שכל משקלו מרוכז בנקודה זו.

כאשר גוף סימטרי ביחס לאחר הצירים, מרכז הכובד ימצא תמיד על קו הסימטריה הנתון. כאשר הגוף אינו סימטרי ביחס לצירים או כאשר הגוף אינו בעל צורה מוגדרת קשה לחשב את מרכז הכובד שלו. אולם ניתן לחלק את הגוף לגופי משנה שהצורה שלהם מאפשרת לנו לדעת את מרכז הכובד של כל אחד מהם, ואז בעזרת פעולה חשבונית למצוא את מרכז הכובד של הגוף הכללי.

מרכז כובד של שטח

1. סרטט את הגוף ורשום את מידותיו.

2. בחר מערכת צירים שרירותית x, y (במידה ויש צירי סימטריה עבור דרכם).

3. חלק את הגוף לתת גופים שאנו יודעים לחשב את מרכז הכובד שלהם (ראה טבלה בעמוד הבא), ותן לכל תת

גוף שם.

4. הכן טבלה

#	שם תת גוף	שטח $A [mm^2]$	$x_c [mm]$	$x_c \cdot A$	$y_c [mm]$	$y_c \cdot A$
1						
2						
3						
	סה"כ	ΣA		$\Sigma(x_c \cdot A)$		$\Sigma(y_c \cdot A)$

5. סכם בתחתית הטבלה: סה"כ שטח הגוף ΣA , סה"כ מומנט סטטי ביחס לציר ה- y $\Sigma(x_c \cdot A)$, סה"כ מומנט

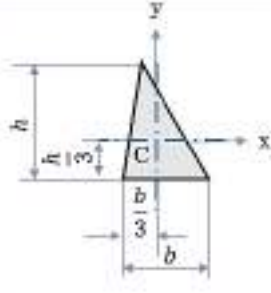
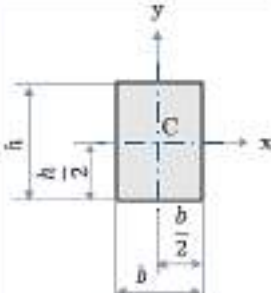
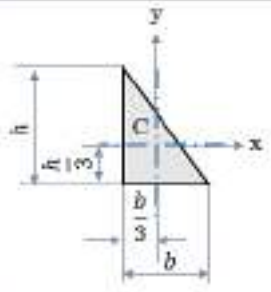
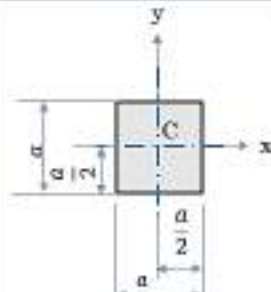
סטטי ביחס לציר ה- x $\Sigma(y_c \cdot A)$.

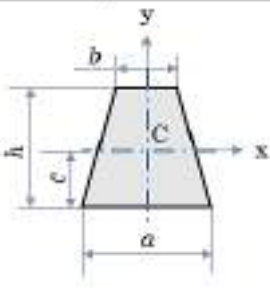
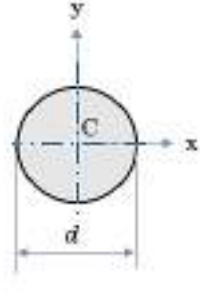
6. חשב מיקום מרכז כובד

$$x_c = \frac{\Sigma(x_c \cdot A)}{\Sigma A}$$

$$y_c = \frac{\Sigma(y_c \cdot A)}{\Sigma A}$$

שטחים ומרכזי כובד – צורות שכיחות

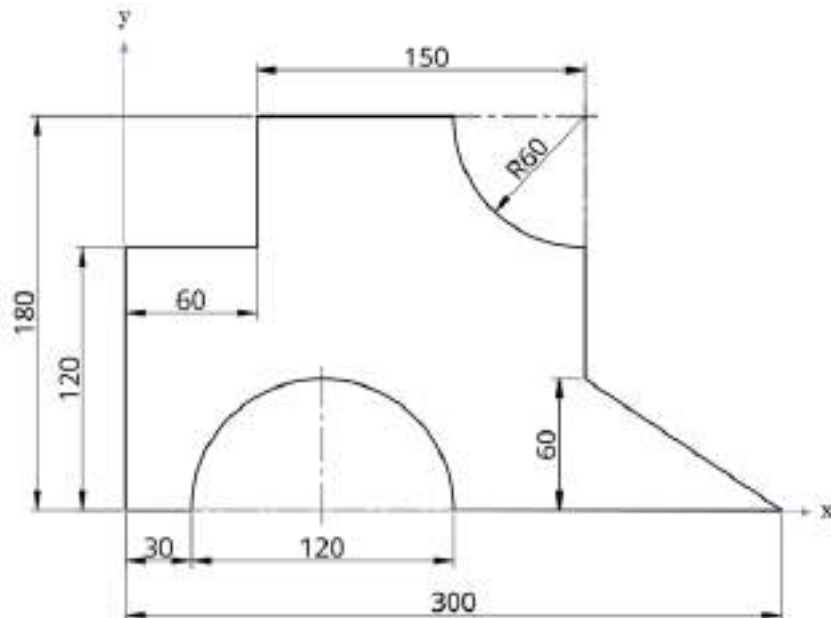
שטח חתך – A	צורת חתך	שטח חתך – A	צורת חתך
$A = \frac{b \cdot h}{2}$		$A = b \cdot h$	
$A = \frac{b \cdot h}{2}$		$A = a^2$	

שטח חתך – A	צורת חתך
$A = \frac{h}{2} \cdot (a + b)$ $c = \frac{h}{3} \cdot \left(\frac{a + 2b}{a + b} \right)$	
$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$	

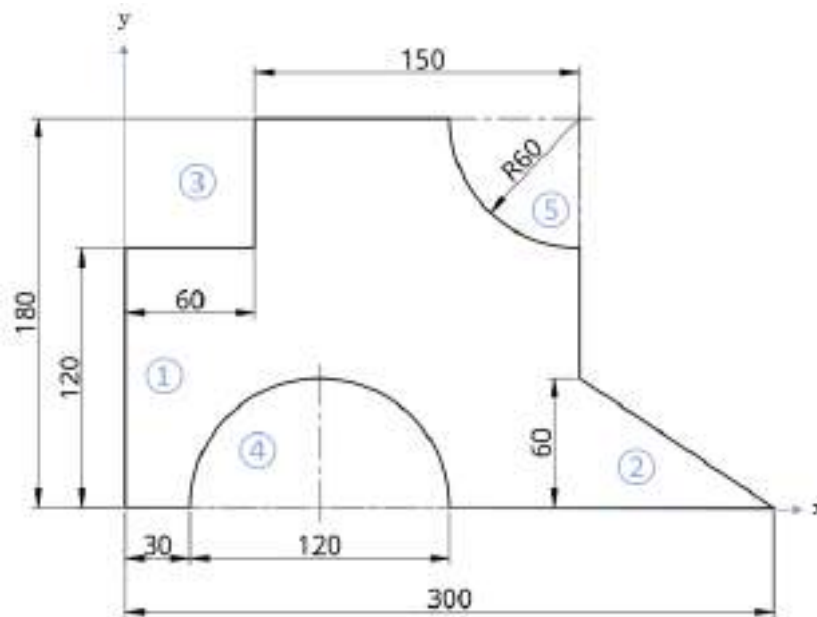
שטח חתך – A	צורת חתך
$A = \frac{\pi \cdot R^2}{2}$ $c = \frac{4 \cdot R}{3\pi}$	
$A = \frac{\pi \cdot R^2}{4}$ $c = \frac{4 \cdot R}{3\pi}$	

דוגמה 14

באיור לשאלה מתואר לוח במערכת צירים x-y (ללא קנ"מ). הלוח עשוי פח בעל עובי אחיד. מידות הלוח נתונות באיור במ"מ. חשב את קואורדינטות מרכז הכובד של הלוח ביחס למערכת הצירים.



פתרון דוגמה 14



חלק ① – מלבן 210×180

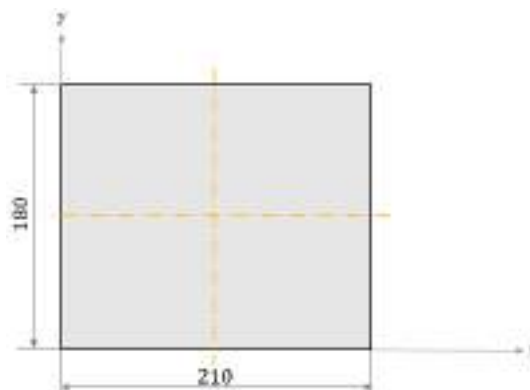
$$A = b \cdot h = 210 \cdot 180 = 37800 \text{ mm}^2$$

$$x_c = 105 \text{ mm}$$

$$x_c \cdot A = 105 \cdot 37800 = 3969000 \text{ mm}^3$$

$$y_c = 90 \text{ mm}$$

$$y_c \cdot A = 90 \cdot 37800 = 3402000 \text{ mm}^3$$



חלק ② – משולש ישר זווית

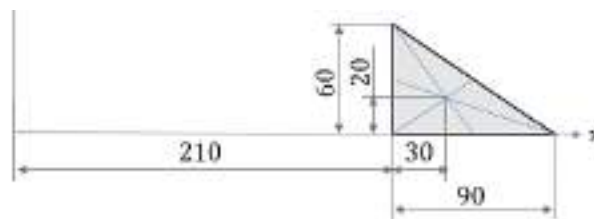
$$A = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{90 \cdot 60}{2} = 2700 \text{ mm}^2$$

$$x_c = 210 + \frac{90}{3} = 240 \text{ mm}$$

$$x_c \cdot A = 240 \cdot 2700 = 648000 \text{ mm}^3$$

$$y_c = 20 \text{ mm}$$

$$y_c \cdot A = 20 \cdot 2700 = 54000 \text{ mm}^3$$



דוגמה 14 המשך מעמוד קודם

חלק ③ – חצי מעגל

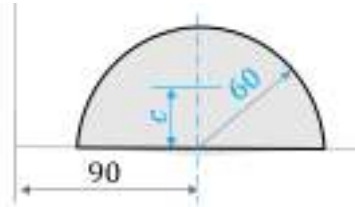
$$A = -\frac{\pi \cdot R^2}{2} = -\frac{\pi \cdot 60^2}{2} \cong -5655 \text{ mm}^2$$

$$x_c = 90 \text{ mm}$$

$$x_c \cdot A = 90 \cdot (-5655) = -508950 \text{ mm}^3$$

$$y_c = \frac{4 \cdot R}{3\pi} = \frac{4 \cdot 60}{3\pi} = 25.5 \text{ mm}$$

$$y_c \cdot A = 25.5 \cdot (-5655) = -144202.5 \text{ mm}^3$$



חלק ④ – ריבוע

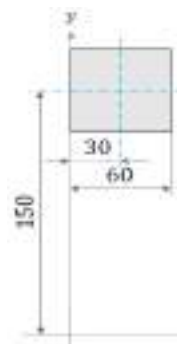
$$A = -a^2 = -60^2 \cong -3600 \text{ mm}^2$$

$$x_c = 90 \text{ mm}$$

$$x_c \cdot A = 30 \cdot (-3600) = -108000 \text{ mm}^3$$

$$y_c = 150 \text{ mm}$$

$$y_c \cdot A = 150 \cdot (-108000) = -16200000 \text{ mm}^3$$



חלק ⑤ – רבע מעגל

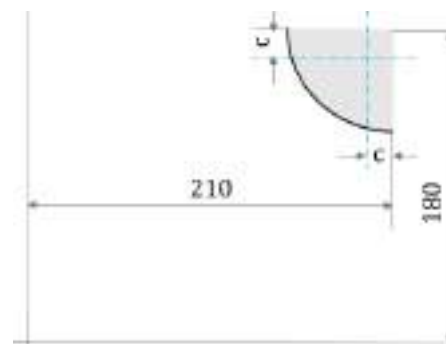
$$A = -\frac{\pi \cdot R^2}{4} = -\frac{\pi \cdot 60^2}{4} \cong -2827.5 \text{ mm}^2$$

$$x_c = 210 - c = 210 - \frac{4 \cdot 60}{3\pi} = 184.5 \text{ mm}$$

$$x_c \cdot A = 184.5 \cdot (-2827.5) \cong -521674 \text{ mm}^3$$

$$y_c = 180 - c = 180 - \frac{4 \cdot 60}{3\pi} = 154.5 \text{ mm}$$

$$y_c \cdot A = 154.5 \cdot (-2827.5) \cong -436849 \text{ mm}^3$$



דוגמה 14 המשך מעמוד קודם

#	תת גוף	שטח - $A [mm^2]$	$x_c [mm]$	$x_c \cdot A$	$y_c [mm]$	$y_c \cdot A$
1	מלבן	37800	105	3969000	90	3402000
2	משולש	2700	240	648000	20	54000
3	חצי מעגל	-5655	90	-508950	25.5	-144202.5
4	ריבוע	-3600	30	-108000	150	-1620000
5	רבע מעגל	-2827.5	184.5	-521674	154.5	-436849
$\Sigma A =$		28417.5	$\Sigma(x_c \cdot A) =$	3478376	$\Sigma(y_c \cdot A) =$	1254948.5

$$x_c = \frac{\Sigma(x_c \cdot A)}{\Sigma A} = \frac{3478376}{28417.5} = 122.4 \text{ mm}$$

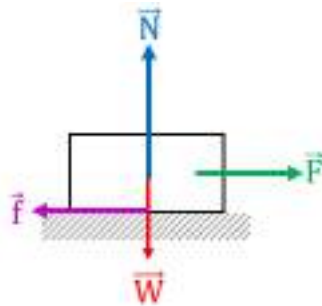
$$y_c = \frac{\Sigma(y_c \cdot A)}{\Sigma A} = \frac{1254948.5}{28417.5} = 44.2 \text{ mm}$$

8. חיכוך

ניתן להסתכל על החיכוך כעל הדבקות רגעית בין החומרים הבאים במגע, והכוח המפריד ביניהם הוא כוח החיכוך.

כוח החיכוך הינו גורם מעכב ומפריע לתנועה, כיוונו **הפוך** לכיוון תנועת הגוף על המשטח. מנגד ללא חיכוך לא תתאפשר תנועה כלל.

כאשר שני גופים מחליקים זה על גבי זה, מפעיל כל גוף על משנהו כוח חיכוך המקביל למשטחים המחליקים. כוח החיכוך פועל על כל גוף במגמה **הפוכה** למגמת התנועה – או רצון התנועה – של אותו גוף יחסית לגוף השני. כוחות החיכוך פועלים גם כאשר אין תנועה יחסית בין הגופים.



כוח חיכוך סטטי

הנוסחה מתאימה רק למקרה שבו הגוף נמצא על סף החלקה.

$$f = \mu_s \cdot N$$

f	כוח חיכוך סטטי	N
N	תגובת המשטח (כוח נורמלי)	N
μ_s	מקדם חיכוך סטטי	

מקדם חיכוך

אינו מתייחס לגוף בודד. זהו ערך שקיים בין שני גופים הבאים במגע זה עם זה.

מבחינים בשני סוגים של מקדם חיכוך:

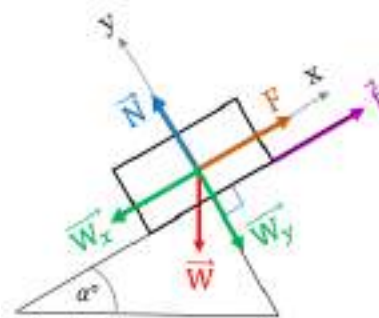
μ_s מקדם חיכוך סטטי – פועל בין הגופים כל עוד **אין תנועה** ביניהם
 μ_k מקדם חיכוך קינטי – מתחיל לפעול בין הגופים ברגע בו הם נעים זה ביחס לזה

מקדם החיכוך הדינמי **נמוך** יותר ממקדם החיכוך הסטטי ולכן הכוח הדרוש להזזת גוף המצוי במנוחה יהיה **גדול** יותר מהכוח שיש להשקיע כדי לקיים את תנועתו של הגוף.

מישור משופע

מישור הנטוי לאופק בזווית כלשהי α .

גוף שמסתו m המונח על מישור משופע מפעיל עליו את משקלו העצמי W , המכוון כלפי מטה בניצב לקו האופקי. נטה את מערכת הצירים כך שציר x יהיה מקביל למישור וציר y יהיה ניצב למישור. באופן הזה נוכל לפרק את המשקל W , לשני רכיבים, רכיב המקביל למישור הנטוי x ורכיב הניצב למישור הנטוי y .



N	כוח חיכוך סטטי	f
N	תגובת המשטח (כוח נורמלי)	N
N	כוח חיצוני הפועל על הגוף	F
N	משקל הגוף	W
	מקדם חיכוך סטטי	μ_s

$$\Sigma F_y = 0$$

$$N - W_y = 0$$

$$N - W \cdot \cos \alpha = 0$$

$$N = W \cdot \cos \alpha$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-W_x + F + f = 0$$

$$-W \cdot \sin \alpha + F + f = 0$$

$$F = W \cdot \sin \alpha - f$$

זה נכון רק כאשר הגוף נמצא על סף החלקה

$$f = \mu_s \cdot N = \mu_s \cdot W \cdot \cos \alpha$$

$$F = W \cdot \sin \alpha - \mu_s \cdot W \cdot \cos \alpha = W \cdot (\sin \alpha - \mu_s \cdot \cos \alpha)$$

תנאי לעצירה עצמית (סף החלקה)

הגוף יחליק מטה כאשר רכיב הכוח המושך אותו כלפי מטה לאורך השיפוע משתווה (ומעט גדול יותר) מרכיב כוח החיכוך המתנגד לתנועתו (במצב זה לא מופעל כוח F על הגוף).

$$\Sigma F_y = 0$$

$$N - W_y = 0$$

$$N - W \cdot \cos \alpha = 0$$

$$N = W \cdot \cos \alpha$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-W_x + f = 0$$

$$-W \cdot \sin \alpha + f = 0$$

$$f = W \cdot \sin \alpha$$

$$f = \mu_s \cdot N$$

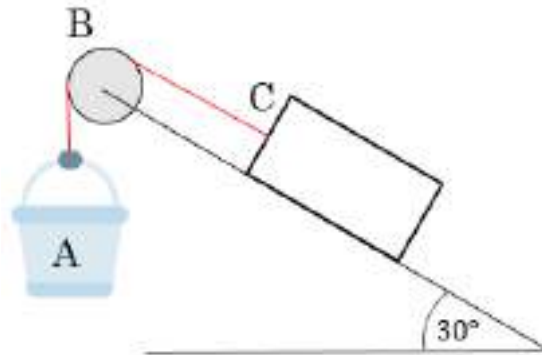
$$W \cdot \sin \alpha = \mu_s \cdot W \cdot \cos \alpha$$

$$\mu_s = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha$$

- α זווית המישור המשופע
- μ_s מקדם חיכוך סטטי

דוגמה 15

דלי A מחובר באמצעות כבל, העובר דרך גלגלת חסרת חיכוך B למשקולת $C = 200 \text{ N}$. מקדם החיכוך הסטטי בין המשקולת והמשטח 0.2.

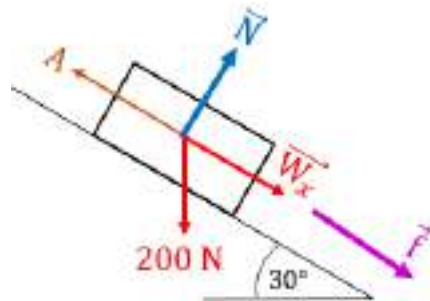


דרוש:

- א. משקל הדלי W הדרוש על מנת שהמשקולת C, תתחיל לנוע במעלה המישור.
- ב. משקל הדלי W הדרוש על מנת שהמשקולת C, תתחיל לנוע במורד המישור.
- ג. בהנחה שמשקל הדלי $W = 0$, מה הזווית המרבית של המישור בה תישאר המשקולת C ללא תנועה?

פתרון דוגמה 15

א. משקל הדלי W הדרוש על מנת שהמשקולת C, תתחיל לנוע במעלה המישור.



$$\Sigma F_y = 0$$

$$N - W_y = 0$$

$$N - W \cdot \cos 30^\circ = 0$$

$$\vec{N} = W \cdot \cos \alpha^\circ = 200 \cdot \cos 30^\circ = 173.205 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-\vec{A} + W_x + f = 0$$

$$-\vec{A} + 200 \cdot \sin 30^\circ + f = 0$$

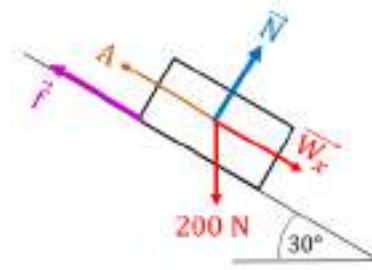
$$\vec{A} = 100 + f$$

$$f = \mu_s \cdot \vec{N} = 0.2 \cdot 173.205 = 34.65 \text{ N}$$

$$\vec{A} = 100 + f = 100 + 34.65 = 134.65 \text{ N}$$

דוגמה 15 המשך מעמוד קודם

ב. משקל הדלי W הדרוש על מנת שהמשקולת C, תתחיל לנוע במורד המישור.



$$\Sigma F_y = 0$$

$$N - W_y = 0$$

$$N - W \cdot \cos 30^\circ = 0$$

$$\vec{N} = W \cdot \cos \alpha^\circ = 200 \cdot \cos 30^\circ = 173.205 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-\vec{A} - f + W_x = 0$$

$$-\vec{A} - f + 200 \cdot \sin 30^\circ = 0$$

$$\vec{A} = 100 - f$$

$$f = \mu_s \cdot \vec{N} = 0.2 \cdot 173.205 = 34.65 \text{ N}$$

$$\vec{A} = 100 - f = 100 - 34.65 = 65.35 \text{ N}$$

ג. בהנחה שמשקל הדלי $W = 0$, מה הזווית המרבית של המישור בה תישאר המשקולת C ללא תנועה?

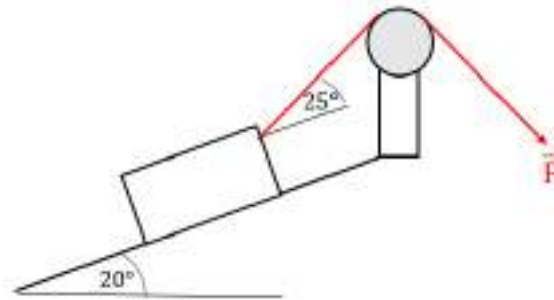
$$\mu_s = \tan \alpha$$

$$0.2 = \tan \alpha$$

$$\alpha = 11.31^\circ$$

דוגמה 16

גוף שמסתו $m = 10 \text{ kg}$ מונח על גבי מישור משופע, הנטוי בזווית $\alpha = 20^\circ$. הגוף נמשך על-ידי כוח P באמצעות כבל וגלגלת חסרת חיכוך. הכבל נטוי ביחס למישור המשופע בזווית $\theta = 25^\circ$ כמתואר באיור לשאלה. מקדם חיכוך סטטי בין הגוף למישור $\mu_s = 0.3$.

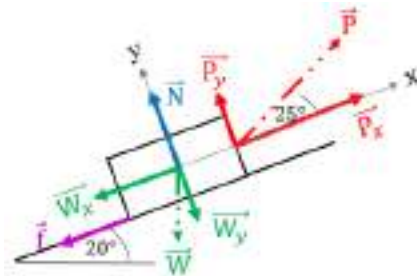


דרוש:

- א. ערך מרבי של כוח P שבו הגוף לא יחליק במעלה המשטח.
- ב. ערך מרבי של כוח P שבו הגוף לא יחליק במורד המשטח.

פתרון דוגמה 16

א. ערך מרבי של כוח P שבו הגוף לא יחליק במעלה המשטח.



$$\Sigma F_y = 0$$

$$N + P_y - W_y = 0$$

$$N + P \cdot \sin 25^\circ - 100 \cdot \cos 20^\circ = 0$$

$$N = 94 - P \cdot 0.422$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-W_x - f + P_x = 0$$

$$-100 \cdot \sin 20^\circ - f + P \cdot 0.906 = 0$$

$$f = -34.2 + P \cdot 0.906$$

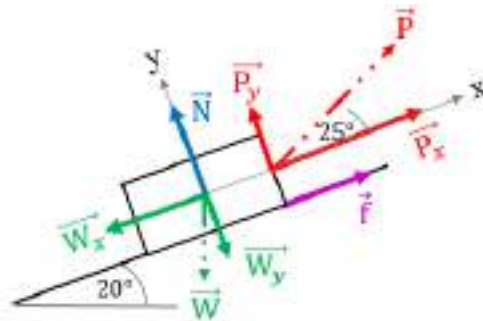
$$f = \mu_s \cdot N$$

$$-34.2 + P \cdot 0.906 = 0.3 \cdot (94 - P \cdot 0.422)$$

$$P = 60.5 \text{ N}$$

דוגמה 16 המשך מעמוד קודם

ב. ערך מרבי של כוח P שבו הגוף לא יחליק במורד המשטח.



$$\Sigma F_y = 0$$

$$N - W_y + P_y = 0$$

$$N - 100 \cdot \cos 20^\circ + P \cdot \sin 25^\circ = 0$$

$$N = 94 - P \cdot 0.422$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-W_x + P_x + f = 0$$

$$-100 \cdot \sin 20^\circ + P \cdot 0.906 + f = 0$$

$$f = 34.2 - P \cdot 0.906$$

$$f = \mu_s \cdot N$$

$$34.2 - P \cdot 0.906 = 0.3 \cdot (94 - P \cdot 0.422)$$

$$P = 7.7 \text{ N}$$

דינמיקה

9. תנועה של נקודה חומרית בקו ישר

תנועה – שינוי מתמיד במצבו של גוף בשני זמנים שונים.

תנועה במהירות קבועה (תנועה קצובה)

תנועה המתבצעת כאשר המהירות אינה משתנה בזמן.

$$V = \frac{x}{t} \quad \text{מהירות}$$

$$x = V \cdot t \quad \text{דרך}$$

$$t = \frac{x}{V} \quad \text{זמן}$$

$$\frac{m}{sec} \quad \text{מהירות} \quad v$$

$$\frac{m}{sec} \quad \text{דרך} \quad x$$

$$\frac{m}{sec} \quad \text{זמן} \quad t$$

המרת יחידות

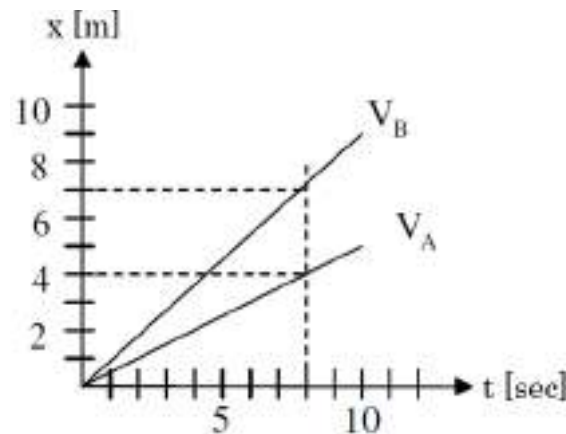
$$1 \frac{m}{sec} = \frac{1}{3.6} \frac{km}{h} (kmh)$$

$$1 km = 1000 m$$

גרף תנועה במהירות קבועה

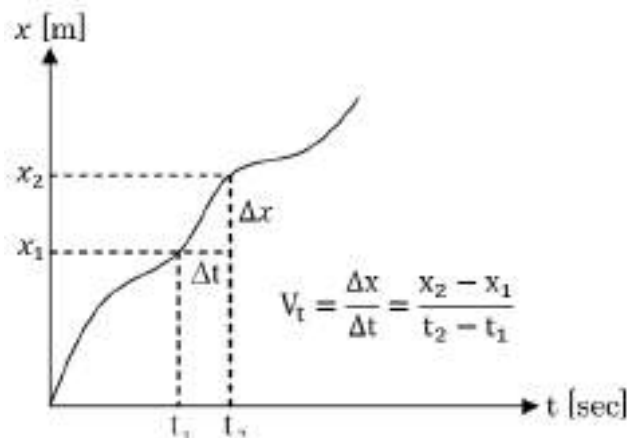
נצייר מערכת צירים כאשר הציר האנכי יציין את הדרך והציר האופקי את הזמן.

הפונקציה $x = V \cdot t$ היא גודל קבוע השווה לשיפוע הגרף, הזמן t הוא משתנה בלתי תלוי והמרחק x הוא משתנה תלוי זמן.



מהירות רגעית – V_t

כאשר גוף נע במהירות לא קבועה, המהירות הרגעית היא מהירות הגוף ברגע המדידה. זהו השינוי שחל במרחק בפרק זמן קצר מאוד, השואף לאפס.



תנועה במהירות משתנה

זוהי תנועה שמהירותה אינה קבועה, בתנועה זו עובר הגוף בפרקי זמן שווים מרחקים שונים או להיפך, בפרקי זמן שווים עובר הגוף מרחקים שווים. מהירות הגוף בין כל נקודה ונקודה לאורך המסלול משתנה – מואצת או מואטת.

תאוצה – a

קצב שינוי המהירות של גוף נע.

כלל הסימנים:

תאוצה חיובית (+) – הגדלת מהירות הגוף ביחידת זמן.

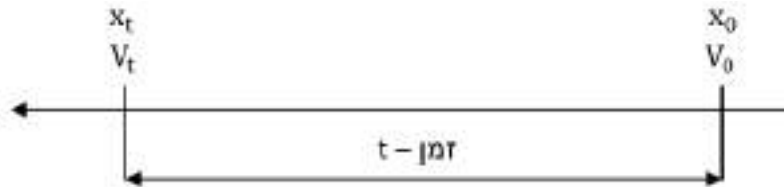
תאוצה שלילית (-), תאוצה – הקטנת מהירות הגוף ביחידת זמן.

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1}$$

$\frac{m}{sec^2}$	תאוצה	a
$\frac{m}{sec}$	מהירות	v
sec	זמן	t

תנועה שוות תאוצה

זוהי תנועה שבה התאוצה **קבועה** ולא משתנה עם הזמן. פירוש הדבר, הגוף מגביר או מאט מהירות באותו קצב בכל יחידת זמן.



מהירות לאחר פרק זמן t

משוואה זו מתארת את המהירות הרגעית V_t שתימדד לאחר פרק t שניות של תנועה בתאוצה a, כאשר בתחילת מדידת זמן התנועה הייתה לגוף מהירות התחלתית V_0 .

$$V_t = V_0 + a \cdot t = \sqrt{V_0^2 + 2 \cdot a \cdot (x_t - x_0)} = \frac{2 \cdot (x_t - x_0) + a \cdot t^2}{2t} = \frac{2 \cdot (x_t - x_0)}{t} - V_0$$

משוואה זו מתארת את המהירות הרגעית V_t אליה הגיע גוף הנע בתאוצה קבועה a, אם התחיל את תנועתו במיקום x_0 ובמהירות V_0 , ונע בתאוצה קבועה עד הגעתו למיקום x_t .

$$V_t^2 = V_0^2 + 2 \cdot a \cdot (x_t - x_0)$$

מרחק לאחר זמן t

משוואה זו מתארת את המיקום x_t אליו מגיע גוף הנע בתאוצה קבועה a, אשר התחיל את תנועתו במיקום x_0 ובמהירות V_0 הנע בתאוצה קבועה במשך זמן t.

$$x_t = x_0 + V_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} = \frac{V_t^2 - V_0^2}{2 \cdot a}$$

זמן תנועה - t

$$t = \frac{V_t - V_0}{a} = \frac{2 \cdot x}{V_0 + V_t}$$

$$t_{1,2} = \frac{-V_0 \pm \sqrt{V_0^2 - 2 \cdot a \cdot (x_t - x_0)}}{a}$$

תאוצה – a

$$a = \frac{V_t - V_0}{t} = \frac{V_t^2 - V_0^2}{2 \cdot (x_t - x_0)} = \frac{2 \cdot (x_t - x_0) - 2 \cdot V_0 \cdot t}{t^2}$$

מהירות התחלתית – V_0

$$V_0 = V_t - a \cdot t = \frac{2 \cdot (x_t - x_0) - a \cdot t^2}{2 \cdot t} = \sqrt{V_t^2 - 2 \cdot a \cdot (x_t - x_0)}$$

$\frac{m}{sec}$	מהירות לאחר זמן t	V_t
$\frac{m}{sec}$	מהירות התחלתית	V_0
$\frac{m}{sec^2}$	תאוצה	a
sec	זמן	t
m	מרחק לאחר זמן t	x_t
m	מרחק התחלתי	x_0

לא נתון הנח: $x_0 = 0 m$

שלבי פתרון

א. המירו את כל יחידות המידה הנתונות ליחידות מידה תקינות להצבה בנוסחאות

$$a \quad \text{תאוצת הגוף} \quad \frac{m}{sec^2}$$

$$V_0, V_t \quad \text{מהירות} \quad \frac{m}{sec}$$

$$t \quad \text{זמן} \quad sec$$

$$x \quad \text{מרחק} \quad m$$

ב. קראו את השאלה וחלקו אותה למצבים/קטעים במידת הצורך.

ג. לכל מצב מלאו את הנתונים המתאימים בטבלה.

x_0	x_t	V_0	V_t	t	a

$$V_0 = 0 \quad \frac{m}{sec} - \text{"מתחיל במנוחה"}$$

$$V_0 = V_t \quad \frac{m}{sec}, \quad a = 0 \quad \frac{m}{sec^2} - \text{"נעה ללא שינוי"}$$

$$V_t = 0 \quad \frac{m}{sec} - \text{"נעצרה"}$$

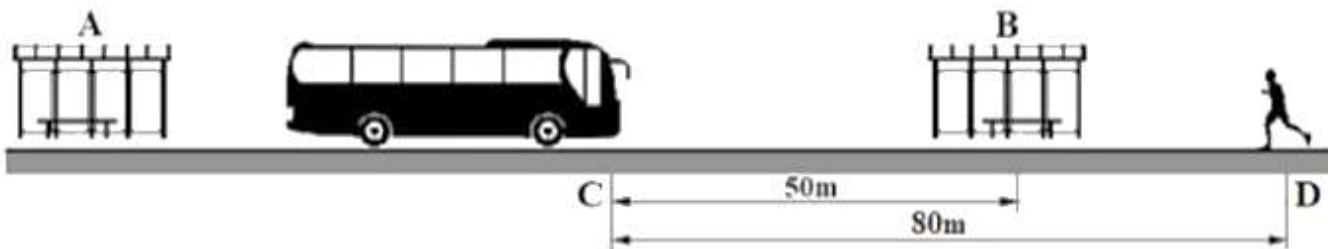
ד. בחרו נוסחה מתאימה לפי נתוני השאלה.

הערה: כאשר שני גופים נעים בכיוונים נגדיים, קובעים את כיוונו של אחד הגופים בו המהירות חיובית והגוף הנגדי המהירות בו תהיה שלילית.

דוגמה 17

אוטובוס מתחיל את תנועתו בתחנה A ממנוחה, מאיץ במשך 7 שניות וממשיך את תנועתו לתחנה B במהירות קבועה $50.4 \frac{km}{h}$ במשך 5 דקות. בנקודה C, הנמצאת במרחק 50 m לפני הגעתו לתחנה B, האוטובוס מתחיל להאט כדי לעצור בתחנה.

אדם שרוצה לעלות לאוטובוס הולך ברגל לתחנה B בכיוון הנגדי לכיוון תנועת האוטובוס במהירות קבועה $2 \frac{m}{sec}$. כאשר האוטובוס מתחיל להאט בנקודה C, האדם נמצא בנקודה D במרחק 80 m ממנו.

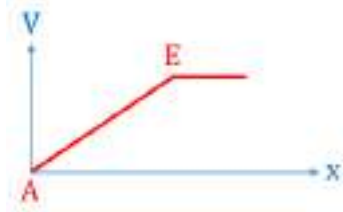


דרוש:

- תאוצת האוטובוס בתחילת תנועתו מתחנה A לתחנה B.
- המרחק בין תחנות A ו-B.
- כמה דקות נע האוטובוס בין תחנות A ו-B?
- באיזו תאוצה על האדם לרוץ מנקודה D כדי להגיע לתחנה B ברגע עצירת האוטובוס בתחנה?

פתרון דוגמה 17

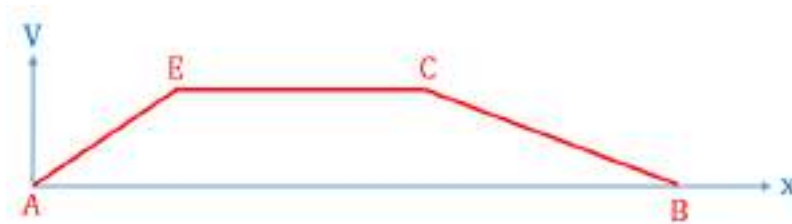
א. תאוצת האוטובוס בתחילת תנועתו מתחנה A לתחנה B.



x_0	x_t	V_0	V_t	t	a
0	?	0	$14 \frac{m}{sec}$	7 sec	?

$$a = \frac{V_t - V_0}{t} = \frac{14 - 0}{7} = 2 \frac{m}{sec^2}$$

ב. המרחק בין תחנות A ו-B.



x_0	x_t	V_0	V_t	t	a	מקטע
0	49	0	$14 \frac{m}{sec}$	7 sec	2	AE
49	$x_{AB} - 99$	$14 \frac{m}{sec}$	$14 \frac{m}{sec}$	300	0	EC
50	0	14	0	t_{CB}	-?	CB

$$x_7 = V_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} = 0 \cdot 7 + \frac{2 \cdot 7^2}{2} = 49 \text{ m}$$

$$x_{300} = V \cdot t = 14 \cdot 300 = 4200 \text{ m}$$

$$x_{AB} = 49 + 4200 + 50 = 4299 \text{ m}$$

המשך בעמוד הבא

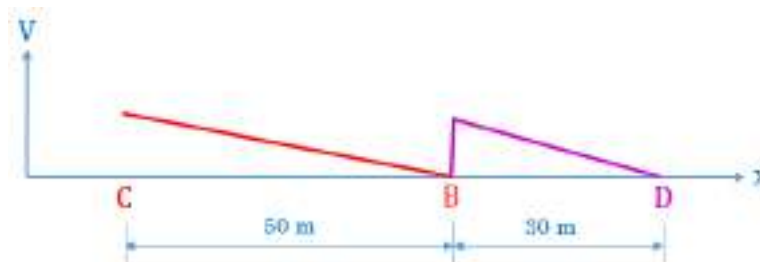
דוגמה 17 המשך מעמוד קודם

ג. כמה דקות נע האוטובוס בין תחנות A ו-B?

$$t_{CB} = \frac{2 \cdot x}{V_0 + V_t} = \frac{2 \cdot 50}{14 + 0} = 7.15 \text{ sec}$$

$$t_{AB} = 2 + 300 + 7.15 = 309.15 \text{ sec} = 5.15 \text{ min}$$

ד. באיזו תאוצה על האדם לרוץ מנקודה D כדי להגיע לתחנה B ברגע עצירת האוטובוס בתחנה?



מקטע	a	t	V _t	V ₀	x _t	x ₀
BD	?	7.15	?	$2 \frac{m}{sec}$	0	30

$$a = \frac{2 \cdot x - 2 \cdot V_0 \cdot t}{t^2} = \frac{2 \cdot 30 - 2 \cdot 2 \cdot 7.15}{7.15^2} = 0.614 \frac{m}{sec^2}$$

נפילה חופשית

תנועת גוף בהשפעת כוח הכובד בלבד. התנועה היא שווה תאוצה ואינה תלויה במשקל הגוף, בהשפעת רוח או התנגדות שכבות האוויר.

V_0 מהירות התחלתית

$g = -10 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$ תאוצת כובד

נקודת הזריקה ראשית הצירים

$y_0 = 0 \text{ m}$ מיקום התחלתי

y_t מיקום סופי

מהירות לאחר פרק זמן t

$$V_t = V_0 + g \cdot t = \sqrt{V_0^2 - 2 \cdot g \cdot y_t} = \frac{2 \cdot y + g \cdot t^2}{2 \cdot t}$$

$$V_t^2 = V_0^2 + 2 \cdot g \cdot y_t$$

מרחק לאחר זמן t

$$y_t = V_0 \cdot t + \frac{g \cdot t^2}{2} = \frac{V_t^2 - V_0^2}{2 \cdot g}$$

זמן תנועה – t

$$t = \frac{V_t - V_0}{g}$$

$$t_{1,2} = \frac{-V_0 \pm \sqrt{V_0^2 - 2 \cdot g \cdot y_t}}{g}$$

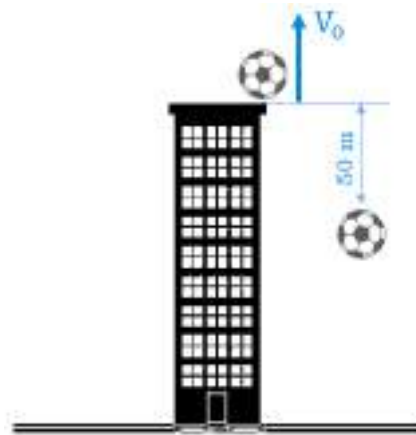
$\frac{m}{sec}$	מהירות לאחר זמן t	V_t
$\frac{m}{sec}$	מהירות התחלתית	V_0
$\frac{m}{sec^2}$	תאוצת הכובד	g
sec	זמן	t
m	מרחק לאחר זמן t	y_t
m	מרחק התחלתי	y_0

לא נתון הנח: $y_0 = 0 m$

הערה: כל עוד לא צוין אחרת, השתמש בערכה של תאוצת הכובד $g = -10 \frac{m}{sec^2}$

דוגמה 18

כדור נזרק מעלה מגג של בניין גבוה. כעבור 5 שניות בדרכו מטה עובר הכדור בנקודה הנמצאת 50 m מתחת לנקודת הזריקה.

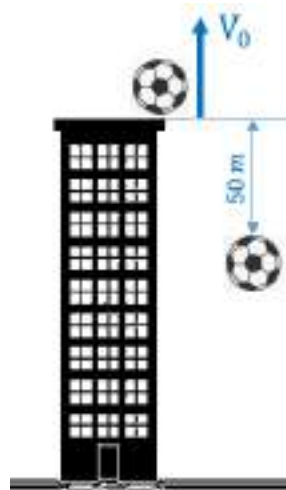


דרוש:

- מהי מהירותו ההתחלתית של הכדור ?
- מהו הגובה המרבי אליו הגיע הכדור ?
- מה מהירות הכדור בגובה 20 m מתחת לנקודת הזריקה ?

פתרון דוגמה 18

א. מהי מהירותו ההתחלתית של הכדור ?



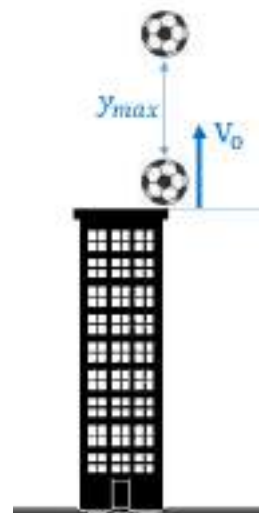
$$V_0 = \frac{2 \cdot y_t + g \cdot t^2}{2 \cdot t} = \frac{2 \cdot (-50) + 10 \cdot 5^2}{2 \cdot 5} = 15 \frac{m}{sec}$$

ב. מהו הגובה המרבי אליו הגיע הכדור ?

$$V_t = \sqrt{V_0^2 - 2 \cdot g \cdot y_t}$$

$$0 = \sqrt{15^2 - 2 \cdot 10 \cdot y_t}$$

$$y_t = 11.25 m$$

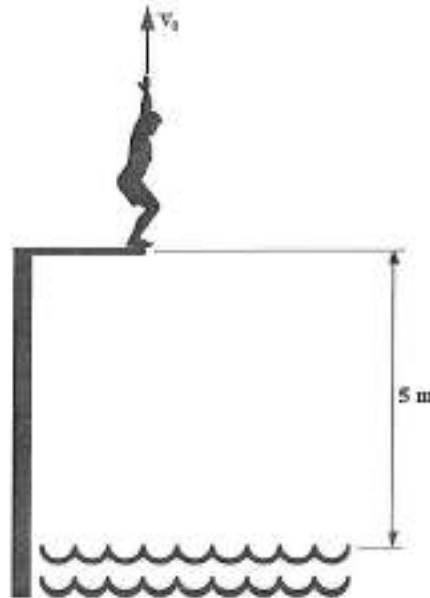


ג. מה מהירות הכדור בגובה 20 m מתחת לנקודת הזריקה ?

$$V_t = \sqrt{V_0^2 + 2 \cdot g \cdot y_t} = \sqrt{15^2 + 2 \cdot 10 \cdot 20} = 25 \frac{m}{sec}$$

דוגמה 19

באיור לשאלה מתואר ילד הקופץ לבריכה ממקפצה בגובה 5 m ומגיע למים תוך 1.5 sec.



דרוש:

- מהירות התחלתית V_0 של קפיצת הילד בהנחה שהוא קופץ אנכית כלפי מעלה.
- מה גובה הילד מעל המים בקפיצה?
- באיזו מהירות נכנס הילד למים?
- אם הילד יקפוץ אנכית כלפי מעלה במהירות התחלתית $V_0 = 2 \frac{m}{sec}$, תוך כמה זמן הוא יכנס למים?

פתרון דוגמה 19

א. מהירות התחלתית V_0 של קפיצת הילד בהנחה שהוא קופץ אנכית כלפי מעלה.

$$V_0 = \frac{2 \cdot y + g \cdot t^2}{2 \cdot t} = \frac{2 \cdot (-5) + 10 \cdot 1.5^2}{2 \cdot 1.5} = 4.2 \frac{m}{sec}$$

ב. מה גובה הילד מעל המים בקפיצה?

$$t_{1,2} = \frac{-V_0 \pm \sqrt{V_0^2 - 2 \cdot g \cdot y}}{g} = \frac{-0 \pm \sqrt{0^2 - 2 \cdot 10 \cdot 5}}{10}$$

$$t_1 = 1 \text{ sec} ; t_2 = -1 \text{ sec}$$

$$y = V_0 \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2} = 4.2 \cdot 0.5 - \frac{10 \cdot 0.5^2}{2} = 0.85 \text{ m}$$

$$y_{max} = 5 + 0.83 = 5.83 \text{ m}$$

ג. באיזו מהירות נכנס הילד למים?

$$V_y = \sqrt{V_0^2 + 2 \cdot g \cdot y} = \sqrt{4.2^2 + 2 \cdot 10 \cdot 5} = 10.85 \frac{m}{sec}$$

ד. אם הילד יקפוץ אנכית כלפי מעלה במהירות התחלתית $V_0 = 2 \frac{m}{sec}$, תוך כמה זמן הוא יכנס למים?

$$t_{1,2} = \frac{-V_0 \pm \sqrt{V_0^2 - 2 \cdot g \cdot y}}{g} = \frac{-2 \pm \sqrt{2^2 - 2 \cdot 10 \cdot (-5)}}{10}$$

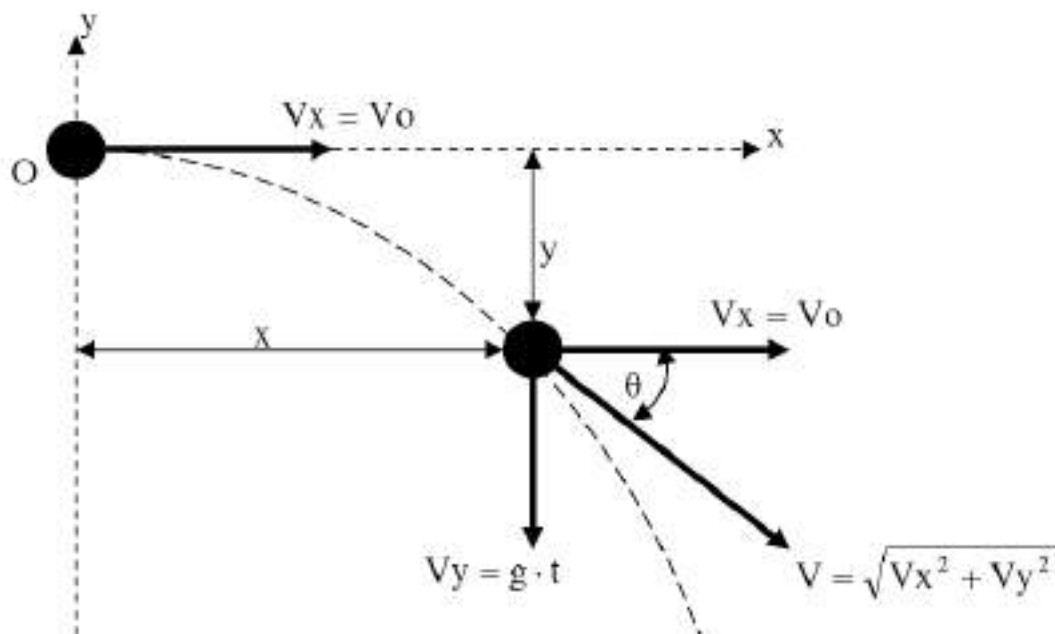
$$t_1 = 0.82 \text{ sec} ; t_2 = -1.22 \text{ sec}$$

10. תנועה של נקודה חומרית באוויר במסלול עקום

תנועת הקלע מתבצעת במישור, בציר x ובציר y . הנתיב בו נע הקלע נקרא 'מסלול'. הכוח ביחיד הפועל על הקלע הוא משקלו mg . נוכל לתאר את תנועת הגוף כצירוף של שתי תנועות: **אופקית** במהירות קבועה, ותנועה אנכית בתאוצה קבועה g (נפילה חופשית).

זריקה אופקית

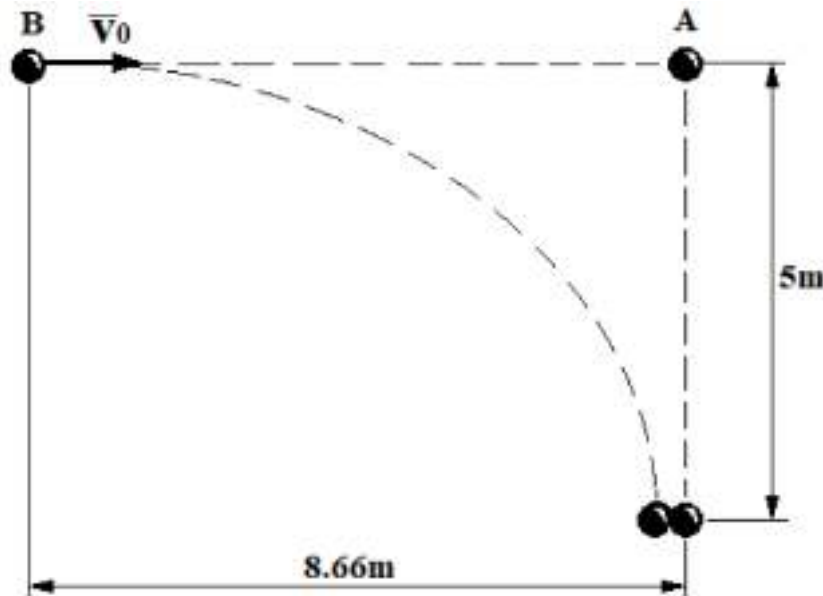
תנועת קלע במהירות אופקית V_x , מהירות זו **אינה משתנה** ונשארת קבועה במשך כל תנועת הקלע $V_0 = V_x$. לעומת זאת בכיוון האנכי פועלת תאוצת הכובד ולכן המהירות האנכית V_y תלך ותגבר עם הזמן.



ציר y	ציר x	
$V_y = -g \cdot t = \pm \sqrt{-2 \cdot g \cdot y}$	$V_0 = V_x$	מהירות לאחר זמן t
$V_y^2 = -2 \cdot g \cdot t$	$V_0^2 = V_x^2$	
$y_t = -\frac{g \cdot t^2}{2} = \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot V_0^2}$	$x_t = V_0 \cdot t$	מרחק לאחר זמן t
	$x = V_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot y}{g}}$	מרחק אופקי כתלות בגובה ההטלה
$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}; \theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_y}{V_x} \right)$		מהירות כללית וכיוונה
$t = \sqrt{\frac{2 \cdot y}{g}} = \frac{x}{V_0}$		זמן נפילה מגובה y
$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right)$		זווית ראיית מטרה

דוגמה 20

שני גופים מתחילים את תנועתם בו זמנית באותו גובה כאשר המרחק האופקי ביניהם הוא 8.66 m . הגוף האחד A נופל חופשי. הגוף האחר B נזרק אופקית במטרה לפגוע בגוף הראשון ופוגע במרחק אנכי של 5 m מנקודת זריקתו.



דרוש:

- זמן תנועת הגופים עד לפגישתם.
- מהירות הזריקה של גוף B.
- כאשר הגוף הראשון A ייזרק אנכית כלפי מטה במהירות התחלתית השווה למהירות הזריקה של הגוף השני B, מתי יש לזרוק אותו כדי שהוא יפגע בגוף השני B?

פתרון דוגמה 20

א. זמן תנועת הגופים עד לפגישתם.

$$y_t = V_0 \cdot t + \frac{g \cdot t^2}{2}$$

$$5 = 0 + \frac{10 \cdot t^2}{2}$$

$$t_1 = 1 \text{ sec} ; t_2 = -1 \text{ sec}$$

ב. מהירות הזריקה של גוף B.

$$x = V_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot y}{g}}$$

$$8.66 = V_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 5}{10}}$$

$$V_0 = 8.66 \frac{m}{sec}$$

ג. כאשר הגוף הראשון A ייזרק אנכית כלפי מטה במהירות התחלתית השווה למהירות הזריקה של הגוף השני B, מתי יש לזרוק אותו כדי שהוא יפגע בגוף השני B ?

$$t_{1,2} = \frac{-V_0 \pm \sqrt{V_0^2 - 2 \cdot g \cdot y_t}}{g} = \frac{-8.66 \pm \sqrt{8.66^2 - 2 \cdot 10 \cdot 5}}{10}$$

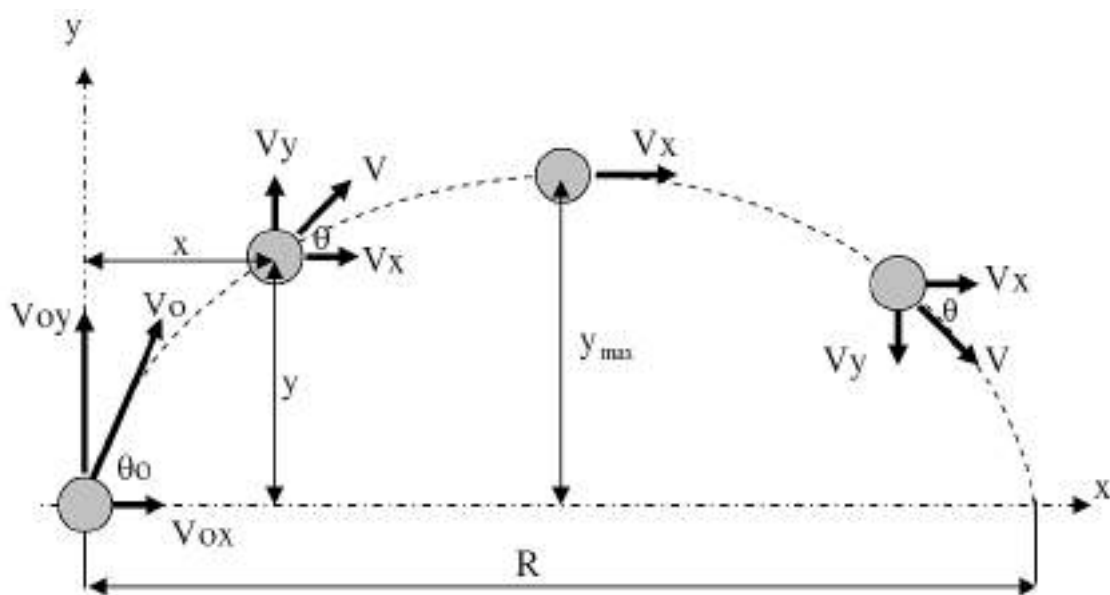
$$t_1 = 0.433 \text{ sec} ; t_2 = -0.433 \text{ sec}$$

יש לזרוק את כדור A לאחר $1 - 0.433 = 0.567 \text{ sec}$ לאחר זריקת גוף B.

זריקה משופעת

תנועת קלע הנורה בשיפוע מסוים כלפי מעלה וכלפי האופק. זווית השיפוע נקראת זווית השיגור θ_0 .

מצבו של הקלע תלוי בנקודה בה הוא נמצא לאורך המסלול. בשלב העלייה זווית הקלע עם האופק היא חיובית והולכת וקטנה עד שהקלע מגיע לשיא הגובה, שם הזווית מקבילה לקו האופקי. בנקודה זו משתנה מעוף הקלע והוא מתחיל לנוע כלפי מטה, הזווית עם הציר האופקי הופכת שלילית ומהירות הקלע הולכת וקטנה (סימן המהירות שלילי) כלפי מטה.

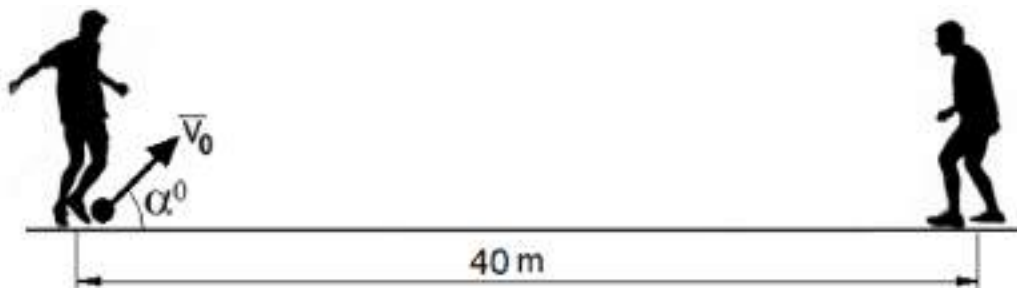


את מהירות השיגור ניתן לפרק לשני רכיבי מהירות: בציר x ובציר y. המהירות בציר x נשארת קבועה ואינה משתנה לאורך המסלול. המהירות האנכית משתנה והמהירות השקולה משנה את כיוונה בכל נקודה ונקודה. בשיא הגובה המהירות האנכית של הקלע אפס (0) ומשם מתחיל הקלע את תנועתו מטה. במשך תנועת הקלע הוא יעבור כל גובה פעמיים: פעם בעליה ופעם בירידה פרט לשיא הגובה אליו יגיע הקלע פעם אחת בלבד. באותו גובה, המהירות וזווית המעוף תהיה שוות אך הפוכות בכיוונם.

ציר y	ציר x	
$V_y = V_0 \cdot \sin(\theta_0) \cdot g \cdot t$	$V_x = V_0 \cdot \cos(\theta_0)$	מהירות לאחר זמן t
	$V_0 = \sqrt{-\frac{R \cdot g}{\sin(2 \cdot \theta_0)}}$	מהירות שיגור
	$V_0 = \sqrt{-\frac{y_{max} \cdot 2 \cdot g}{\sin^2(2 \cdot \theta_0)}}$	
	$V_0 = \frac{y - 0.5 \cdot g \cdot t^2}{\sin(\theta_0) \cdot t}$	
$y_t = V_0 \cdot \sin(\theta_0) + \frac{g \cdot t^2}{2}$	$x_t = V_0 \cdot \cos(\theta_0) \cdot t$	מרחק לאחר זמן t
$y_t = x \cdot \tan(\theta_0) + \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot V_0^2 \cdot \cos^2(\theta_0)}$	$x = V_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot y}{g}}$	מרחק אנכי כתלות במרחק אופקי
$y_{max} = -\frac{V_0^2 \cdot \sin^2(\theta_0)}{2 \cdot g}$		גובה שיא המסלול
$R = -\frac{V_0^2 \cdot \sin(2 \cdot \theta_0)}{g}$		טווח מקסימלי (חזרה לגובה ירי)
$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$		מהירות כללית
$t = -\frac{V_0 \cdot \sin(\theta_0)}{g}$		זמן לשיא גובה מסלול
$t = -\frac{2 \cdot V_0 \cdot \sin(\theta_0)}{g}$		זמן לטווח מרבי R
$t_{1,2} = \frac{-V_0 \cdot \sin(\theta_0) \pm \sqrt{V_0^2 \cdot \sin^2(\theta_0) + 2 \cdot g \cdot y}}{g}$		זמן הגעה לגובה y
$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_y}{V_x}\right)$		זווית מעוף

דוגמה 21

באיור לשאלה מתואר שחקן כדורגל הבועט כדור במהירות $V_0 = 20 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ ובזווית של α° יחסית לאופק במטרה למסור את הכדור לשחקן אחר הנמצא במרחק 40 m ממנו. מהירות הכדור בשיא גובהו קטנה פי 2 ממהירותו ההתחלתית.



דרוש:

- א. זווית α° בו נבעט הכדור.
- ב. הגובה המרבי של הכדור במסלול תנועתו.
- ג. זמן החזרת הכדור לקרקע מרגע הבעיטה.
- ד. האם הכדור יגיע לרגליו של השחקן השני? אם לא, מהי המהירות ההתחלתית הנדרשת לשם כך, כאשר זווית הבעיטה לא משתנה?

פתרון דוגמה 21

א. זווית α° בו נבעט הכדור.

בשיא הגובה

$$V_y = 0 \frac{m}{sec}$$

$$V_x = V_0 \cdot \cos(\theta_0)$$

$$0.5 \cdot V_0 = V_0 \cdot \cos(\theta_0)$$

$$\theta_0 = 60^\circ$$

ב. הגובה המרבי של הכדור במסלול תנועתו.

$$y_{max} = \frac{V_0^2 \cdot \sin^2(\theta_0)}{2 \cdot g} = \frac{20^2 \cdot \sin^2(60^\circ)}{2 \cdot -10} = 15 \text{ m}$$

ג. זמן החזרת הכדור לקרקע מרגע הבעיטה.

$$t = -\frac{2 \cdot V_0 \cdot \sin(\theta_0)}{g} = -\frac{2 \cdot 20 \cdot \sin(60)}{10} = 3.465 \text{ sec}$$

ד. האם הכדור יגיע לרגליו של השחקן השני? אם לא, מהי המהירות ההתחלתית הנדרשת לשם כך, כאשר זווית הבעיטה לא משתנה?

$$R = -\frac{V_0^2 \cdot \sin(2 \cdot \theta_0)}{g} = -\frac{20^2 \cdot \sin(2 \cdot 60)}{10} = 34.64 \text{ m} < 40 \text{ m}$$

הכדור לא יגיע לרגליו של השחקן השני.

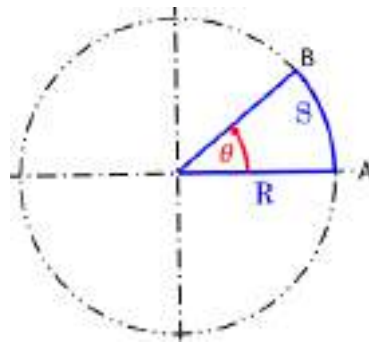
$$40 = -\frac{V_0^2 \cdot \sin(2 \cdot 60)}{10}$$

$$V_0 = 21.5 \frac{m}{sec}$$

11. תנועה סיבובית של נקודה חומרית

תנועה סיבובית – תנועת גוף במסלול מעגלי סביב נקודה מסוימת המכונה "ציר סיבוב". ציר הסיבוב עצמו אינו מסתובב.

נסתכל על גוף המבצע תנועה מעגלית. הגוף נע מנקודה A לנקודה B.



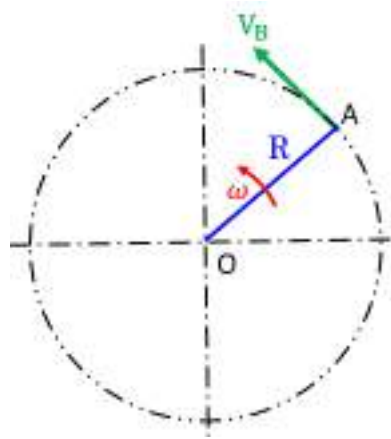
S דרך – אורך המסלול (אורך הקשת) שהגוף עבר m
 R רדיוס – המרחק בין הגוף לציר הסיבוב סביבו הוא נע m
 θ זווית מרכזית הנשענת על הקשת °

כל גוף הסובב בתנועה מעגלית משנה את מיקומו ביחס למקום בו הוא שהה בפרק הזמן הקודם, אולם מרחקו מציר הסיבוב נשאר קבוע – הרדיוס R .

$$\Delta S = \Delta \theta \cdot R$$

מהירות משיקית, מהירות זוויתית

כאשר גוף מבצע תנועה מעגלית בכל רגע נתון יש לו שני סוגי מהירויות:



$$\frac{m}{sec}$$

V מהירות משיקית – מהירות המשיקה למעגל בכל רגע,

תמיד ב- 90° לרדיוס הסיבוב עם כיוון הסיבוב

$$\frac{rad}{sec}$$

ω מהירות זוויתית – מהירות המודדת את הזווית שעובר הגוף בשנייה

מייצגת את כיוון הסיבוב (עם כיוון השעון או נגד כיוון השעון)

m

R רדיוס – המרחק בין הגוף לציר הסיבוב סביבו הוא נע

rad

θ זווית מרכזית הנשענת על הקשת

sec

t זמן

rpm

n מספר סיבובים

rps

f תדירות סיבוב (Hertz)

$$V = \omega \cdot R$$

מהירות זוויתית

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\pi \cdot n}{30} = 2 \cdot \pi \cdot f$$

תדר סיבוב לשנייה

$$f = \frac{n}{60} = \frac{1}{T}$$

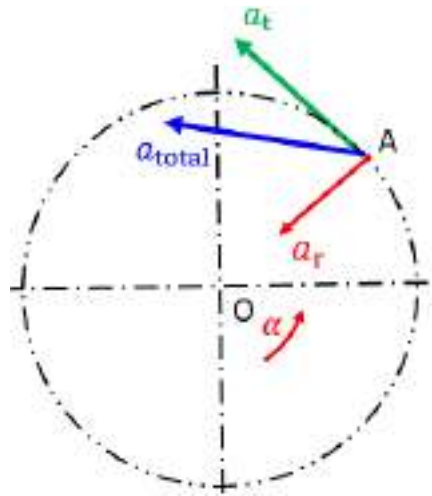
זמן מחזור של סיבוב שלם

$$T = \frac{1}{f}$$

זווית הסיבוב

$$\theta = \omega \cdot t$$

תאוצה בתנועה מעגלית



קיימים 4 סוגי תאוצה:

$\frac{rad}{sec^2}$	α	תאוצה זוויתית, תאוצה עם כיוון הסיבוב
$\frac{rad}{sec^2}$	a_t	תאוצה משיקית, תמיד ב-90° לרדיוס הסיבוב
$\frac{rad}{sec^2}$	a_r	תאוצה רדיאלית, תמיד מהגוף למרכז הסיבוב
$\frac{rad}{sec^2}$	a_{total}	תאוצה כללית, תאוצה שקולה של תאוצה משיקית ותאוצה זוויתית

$$a_t = \alpha \cdot R$$

$$a_r = \frac{V^2}{R} = \omega^2 \cdot R$$

$$a_{total} = \sqrt{a_t^2 + a_r^2}; \theta = \tan^{-1} \left(\frac{a_r}{a_t} \right)$$

גרפיקה הנדסית

12. חתכים

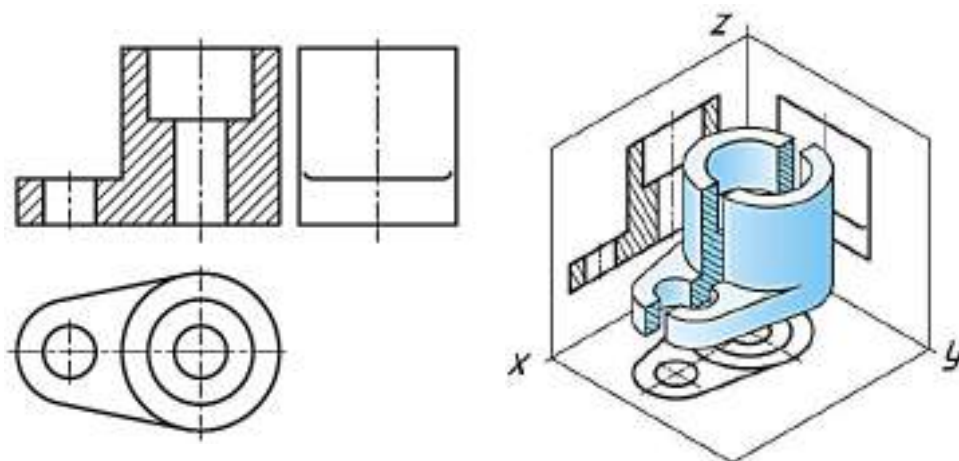
פעולה דמיונית שמטרה הבנת הפרטים הנסתרים בגוף.

בחתך **לא מופיעים** קווים מרוסקים. השטח המקווקו מראה שקיים חומר בשטח החתך.

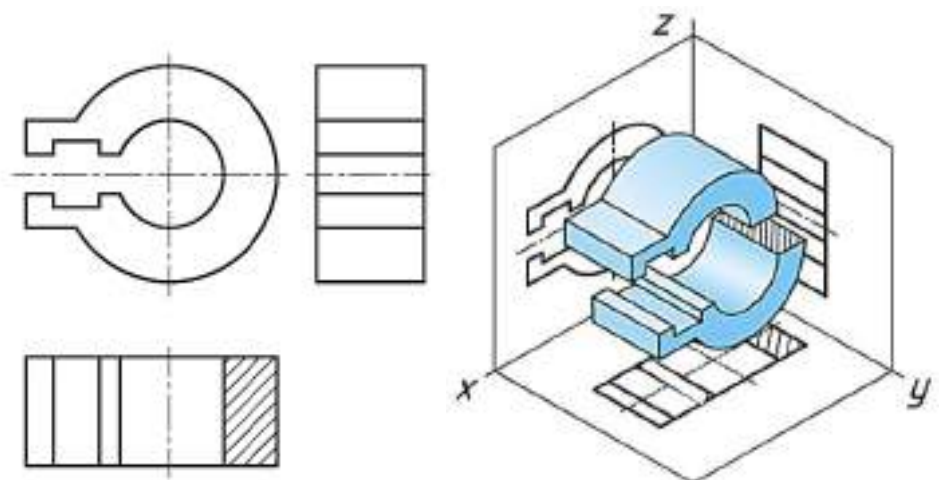
השטח המקווקו (הלבן) מראה שקיים שקע או נקב במקום שהחלק נחתך.

חתך מישורי

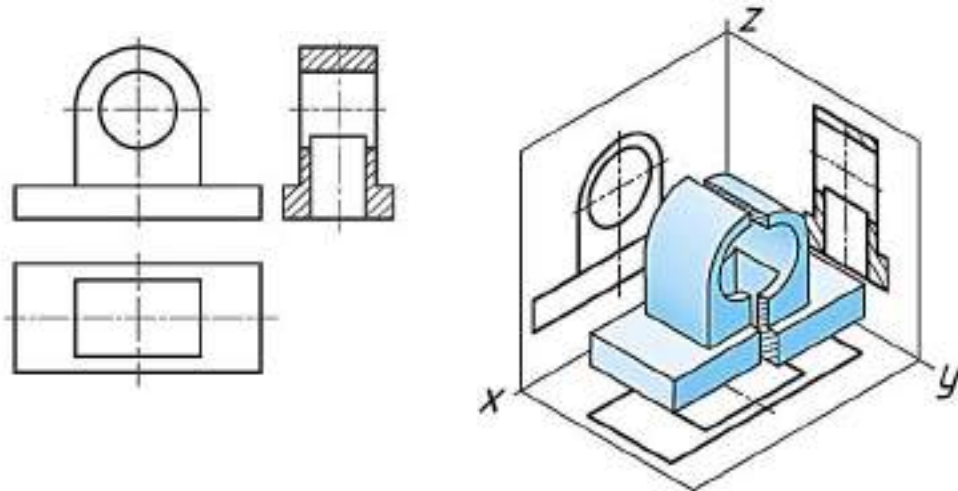
חתך בהיטל פנים



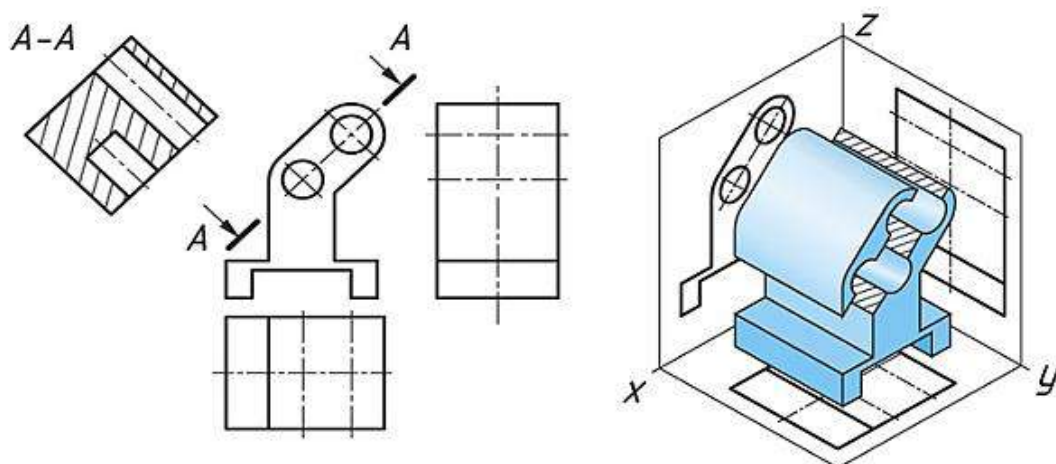
חתך בהיטל על



חתך בהיטל צד



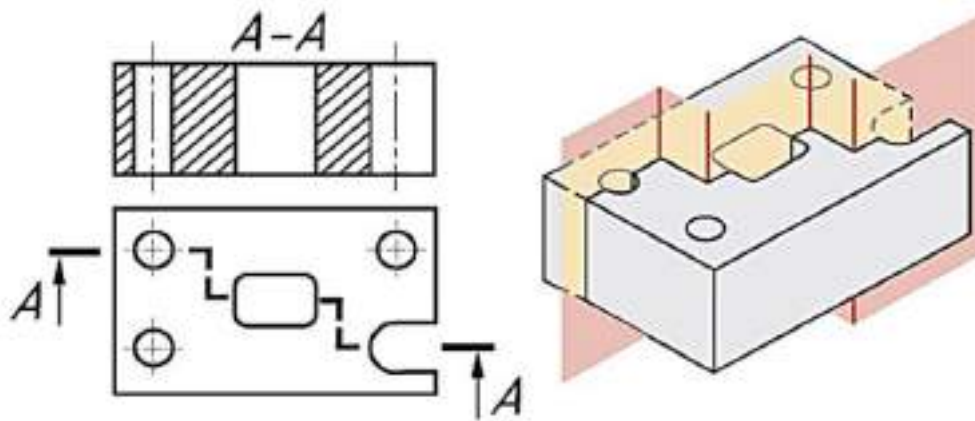
חתך במישור משופע



חתך מדורג

מאפשר גילוי פריטים של חלק לא סימטרי.

שים לב ! למרות שנוצרים פניות עקב החתך המודרג = מתעלמים מהן. מסרטטים את החתך, כאילו הפניות אינן קיימות. אם נשרטט את קו הפינה של החתך המודרג, יחשב הקו כפינה אמיתית ואין זה נכון, כי היא אינה קיימת בחלק.

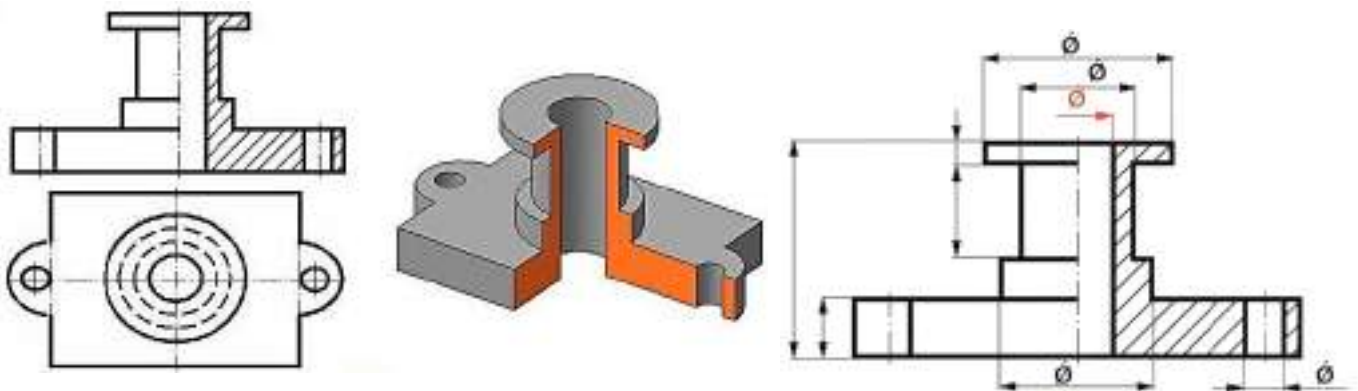


חצי חתך חצי מבט

בגופים סימטריים ניתן לחתוך באופן דמיוני רבע מהגוף. בחצי חתך חצי מבט נשתמש כאשר חשוב להראות פרטים במעטפת החיצונית של החלק ופרטים הנמצאים בתוך בחלק המוסתרים בהיטל רגיל. הוצאת רבע מהגוף תגלה מחצית חתך ותשאיר מחצית מבט.

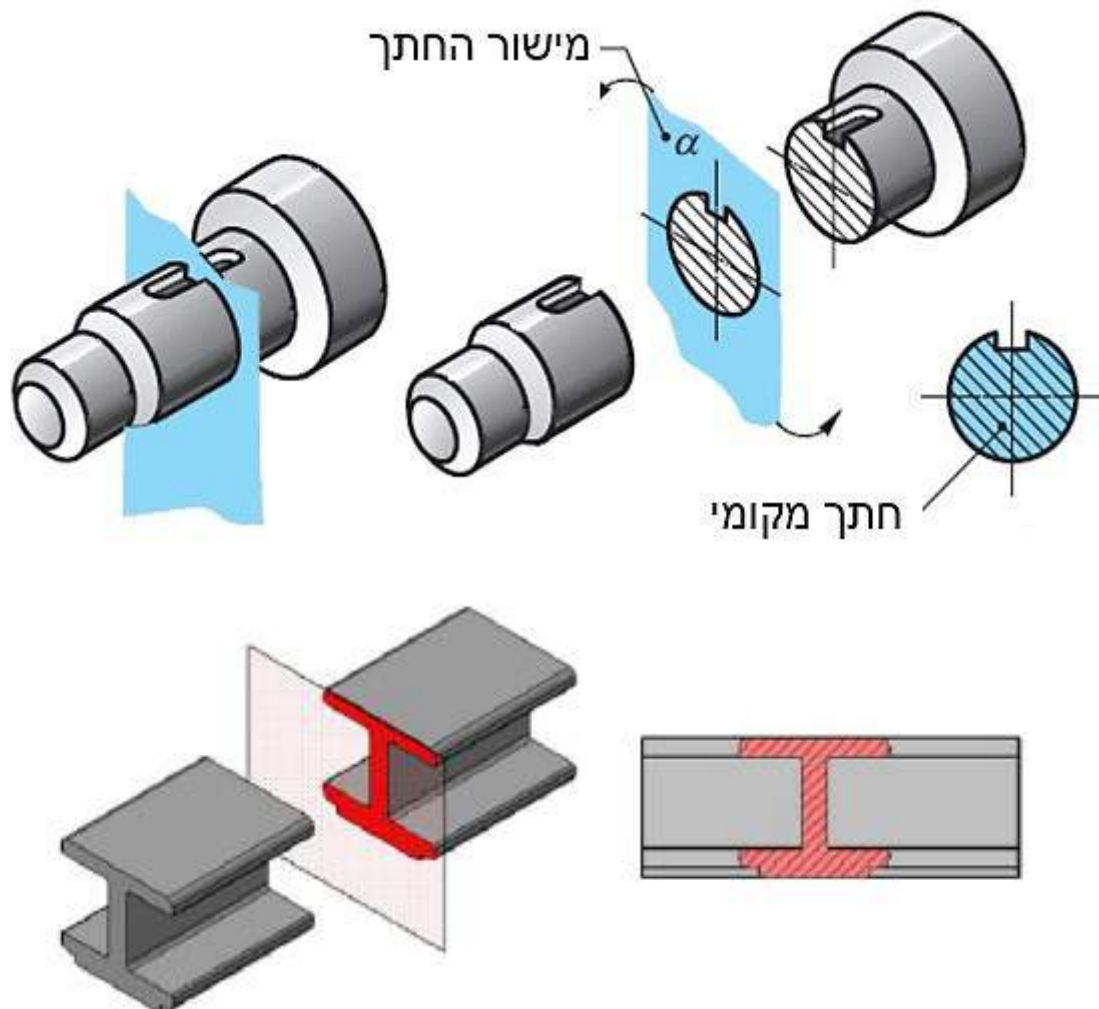
שים לב ! אין קווים מרוסקים לא בחצי החתך ולא בחצי המבט.

הקו הפריד בין חצי המבט וחצי החתך הוא קו הציר (הסימטריה).



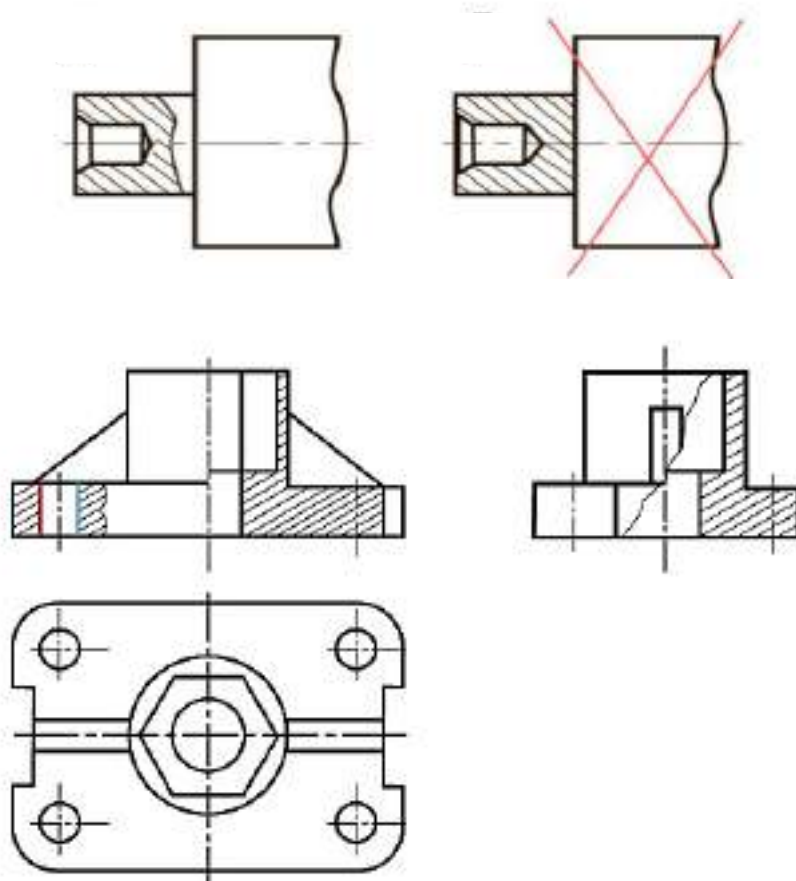
חתך מקומי מסובב

חתך מקומי מאפשר לצמצם את מספר ההיטלים ומראה את השטח המצוי במשור החתך בלבד.



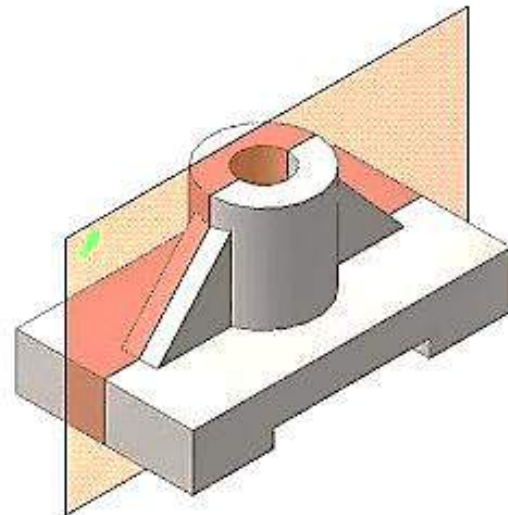
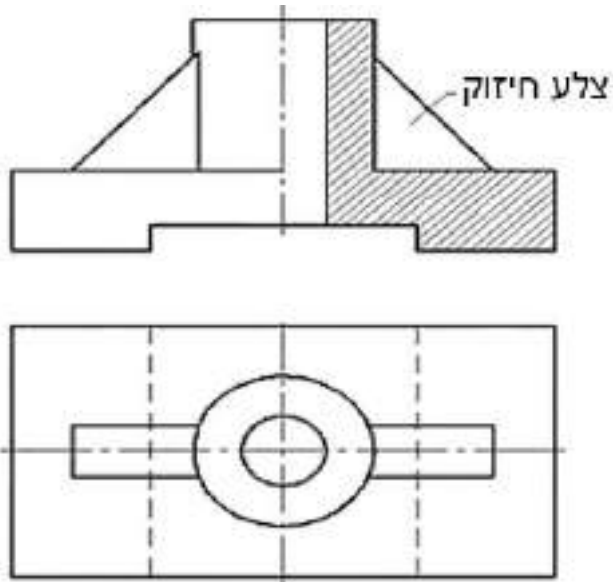
חתך חלקי (גילוף, שבר)

מטרתו לחשוף פריטים פנימיים על מנת לאפשר לתת להם מידות.



תמיכות במישור חתך

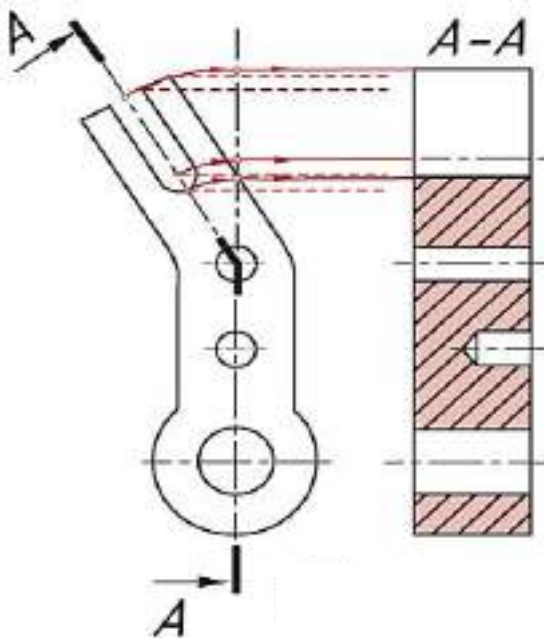
לא מקווקים תמיכות במישור חתך (העובר לאורכן).



חתך מישור

החתך מיועד בעיקר לחלקים בעלי ציר סיבוב מרכזי שבהם פרטים שנמצאים במישורים שונים ונטויים כלפי ציר הראשי.

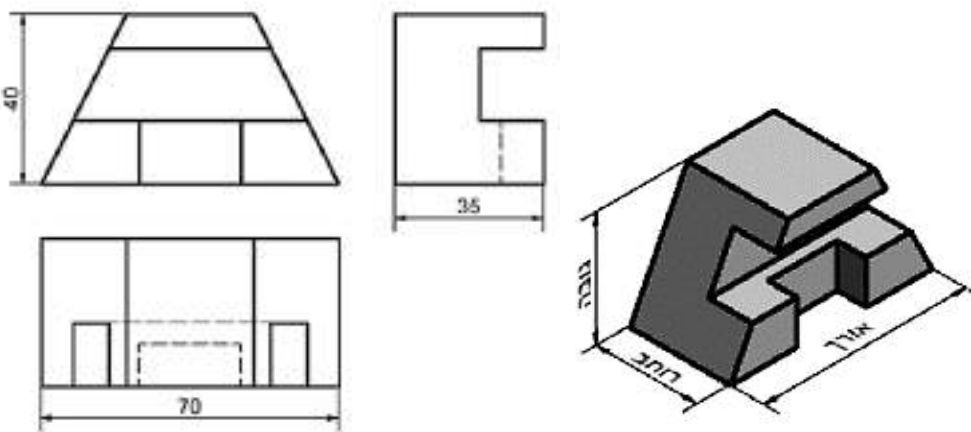
הפריטים "נחתכים" במישור או במישורי חתך המכוונים כלפי מרכז ציר הסיבוב של החלק. סרטוט היטל החתך יבוצע לאחר 'יישור' הפריטים הנמצאים על מישור החתך.



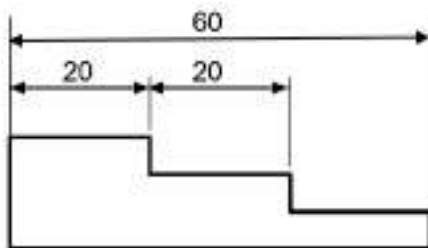
13. מידות

רישום המידות הוא ביטוי גרפי-סמלי מוסכם וחד משמעי המגדיר את ממדיו וצורתו המושלמת של המוצר, על כל פרטיו.

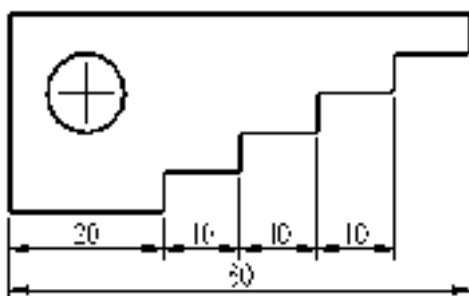
1. המידות יופיעו תמיד ביחידות מילימטר בלבד ואין צורך לרשום כל סימן על כך ליד המידה.
2. המידות בסרטוט מציגות את האורך האמיתי ללא תלות בקנה מידה בו החלק משורטט.
3. כל מידה תופיע פעם אחת בלבד, במקום המובן ביותר.
4. אין לרשום מידות לקווים נסתרים.
5. יש לרשום תמיד מידות מרביות (מידות קופסה) – אורך, רוחב, גובה.



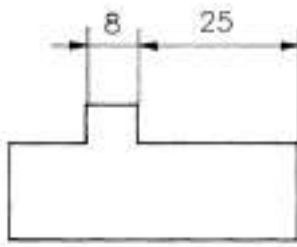
6. עבור אותו רכיב של חלק, יש לרשום מידה פעם אחת בלבד וזאת בהיטל בו רואים את הרכיב בצורה הברורה ביותר.



7. רצוי לא לרשום מידות בתוך ההיטלים ולא בין ההיטלים.
8. אסור לרשום מידה משותפת לשני היטלים.
9. אל תרשום מידות מיותרות!
10. יש להשתדל לתת את המידות מנקודת יחוס אחת כך שומרים על דיוק מידות החלק. מתן מידות מנקודות יחוס שונות גורם ל-אי דיוקים.

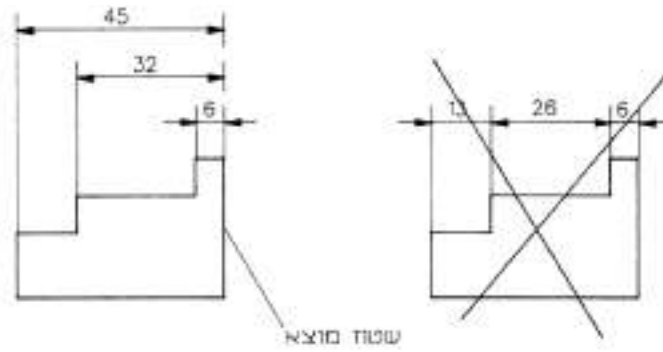


11. מידות חלקיות מותר לסדר בקו אחד בצורת שרשרת. בסרטוט נתונה מידת האורך ומידות חלקיות בשרשרת. מידה חלקית אחת נשארת פתוחה, על מנת שמידת האורך תהיה מידה מסכמת. בוחרים כמידה פתוחה זו שפחות חשובה בתפקיד החלק.



12. מותר להשתמש בהמשך אותו קו עזר כדי לרשום שתי מידות.

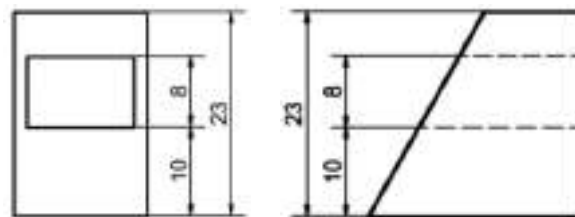
13. אין לרשום מידות שרשרת (מידות הרשומות זו לאחר זו).



14. אסור לתת מידות לקו נסתר.

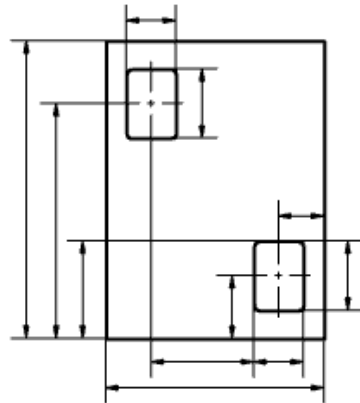
נכון

אסור

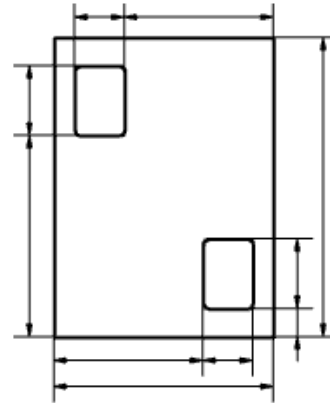


15. יש לרשום מידות כך שהקורא אותן לא יצטרך לבזבז זמן עבור חישובים מתמטיים.

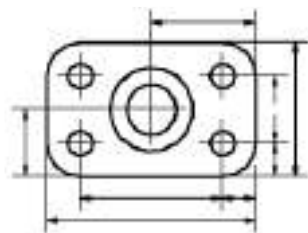
לא נכון



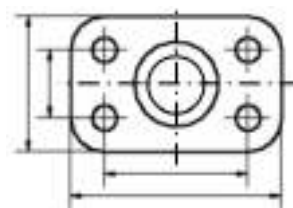
נכון



לא רצוי

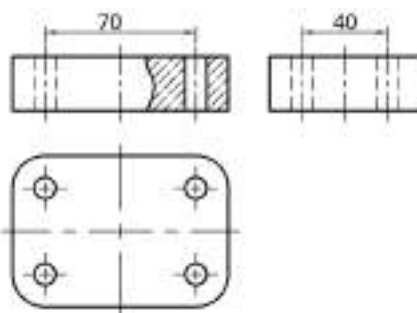


רצוי

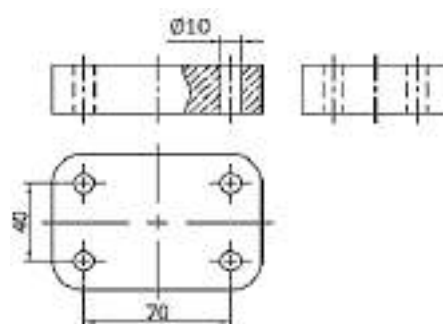


16. רצוי לרשום מרחקים בין צירי הקדחים בהיטל בו הקדחים מופיעים בצורת מעגל.

פחות רצוי



רצוי

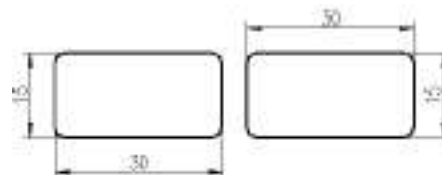


17. מיקום ספרות המידה הינו תמיד מעל לקו המידה, כאשר מסתכלים מלמטה או מצד ימין.

לא נכון



נכון



18. אסור להצליב קווי מידה בניהם.

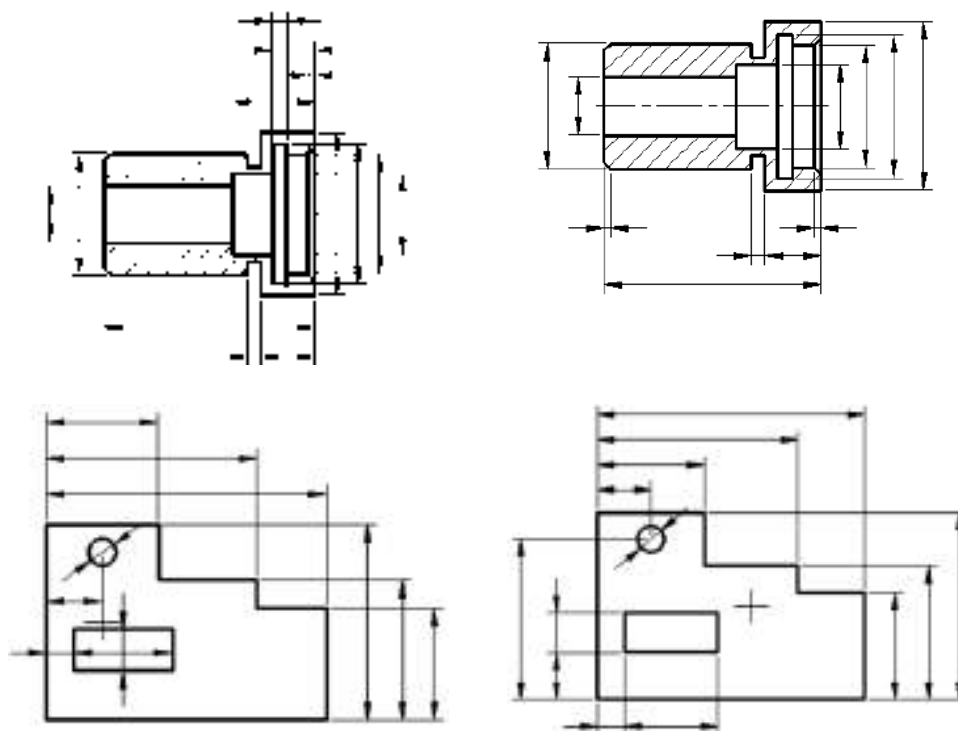
אסור להצליב קווי מידה עם עזר למידה (פרט למרכזי מעגלים).

רצוי לא להצליב קווי עזר למידה ביניהם, אך אין איסור על כך.

רשום את המידות הקטנות בקרבת הגוף והגדולות מרוחקות ממנו.

לא נכון

נכון

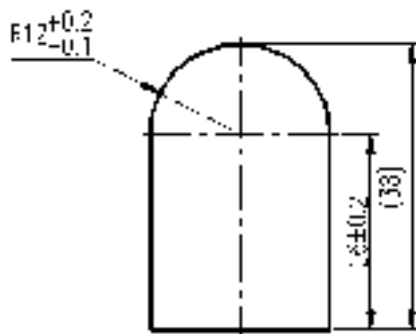
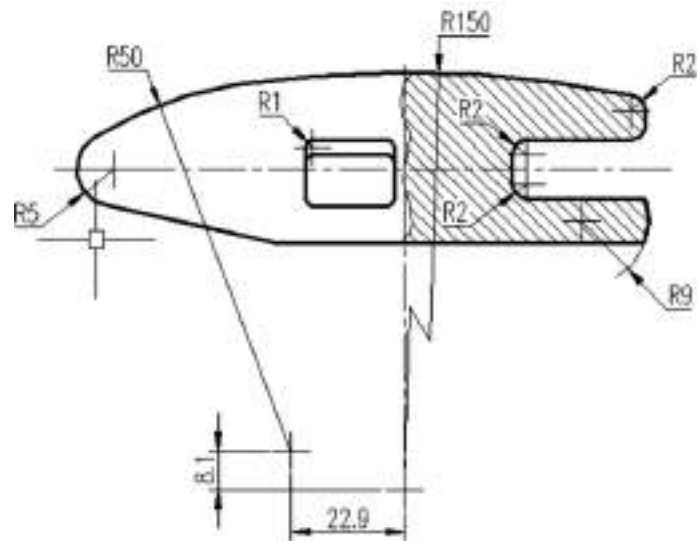


19. קו מידה לקשת מעגלית יש להעביר בין הקשת או המשכה, לבין מרכז הקשת.

לקו מידה זה יש חץ איד המכוון כלפי הקשת.

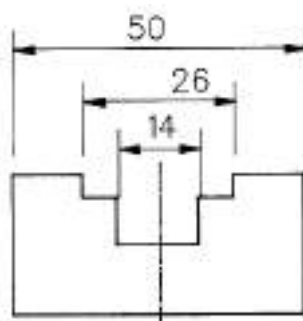
לקשתות רוסמים מידה רק בהיטל בו נראית העקום של הקשתי.

לפני ערך הקשת רוסמים את האות R.



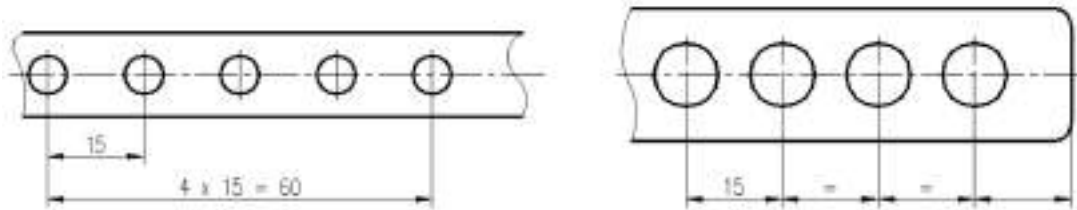
20. אסור שקווי המידה יחתכו זה את זה.

21. אם נחוץ מותר לרשום את המידה המסכמת של השרשרת בתוך סוגריים וללא סבולת. הקיצור (REF) איננו נכלל בהמלצות תקן הישראלי.

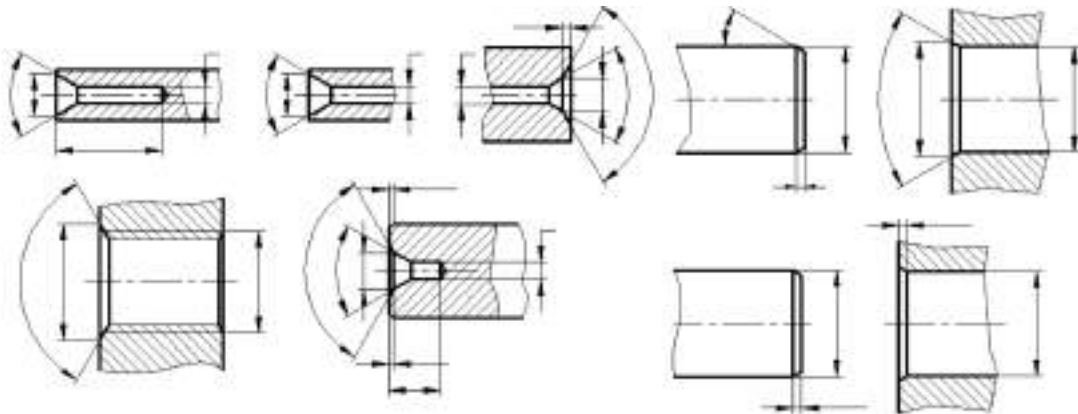


22. קו סימטריה מציין שהגוף משני צידי הקו זהה בצורתו ובמידותיו. מתן המידות יתבצע סביב קו הציר.

23. רישום מידות למרחקים זהים מותר לפי אחת משתי השיטות המתוארות.



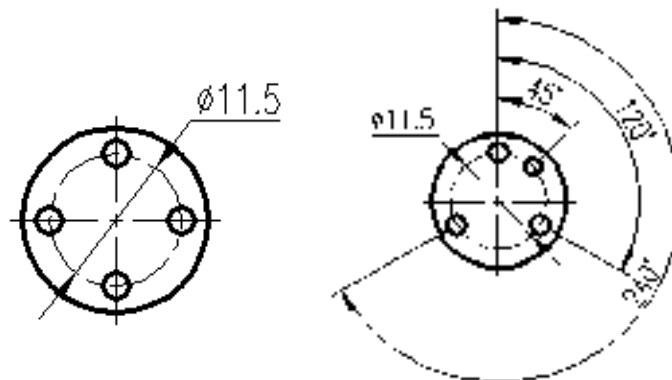
24. מידות של מדרים (פאזות), תעלות שחרור ועוד יש לרשום בלי להכליל אותן בשרשרת המידות. אפשר לראות דוגמאות לרישום מידות לקידוחי מרכז וקיטועים.



25. אין צורך לרשום מידה זוויתית בין קדחים מחולקים לאורך מעגל חלוקה שווה (סימטרית), יש לרשום מידה זוויתית בין קדחים שאינם מחולקים בצורה סימטרית לאורך מעגל חלוקה.

חלוקה סימטרית

חלוקה לא סימטרית

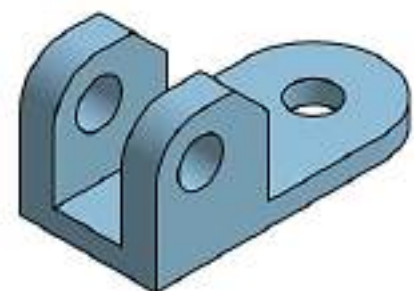
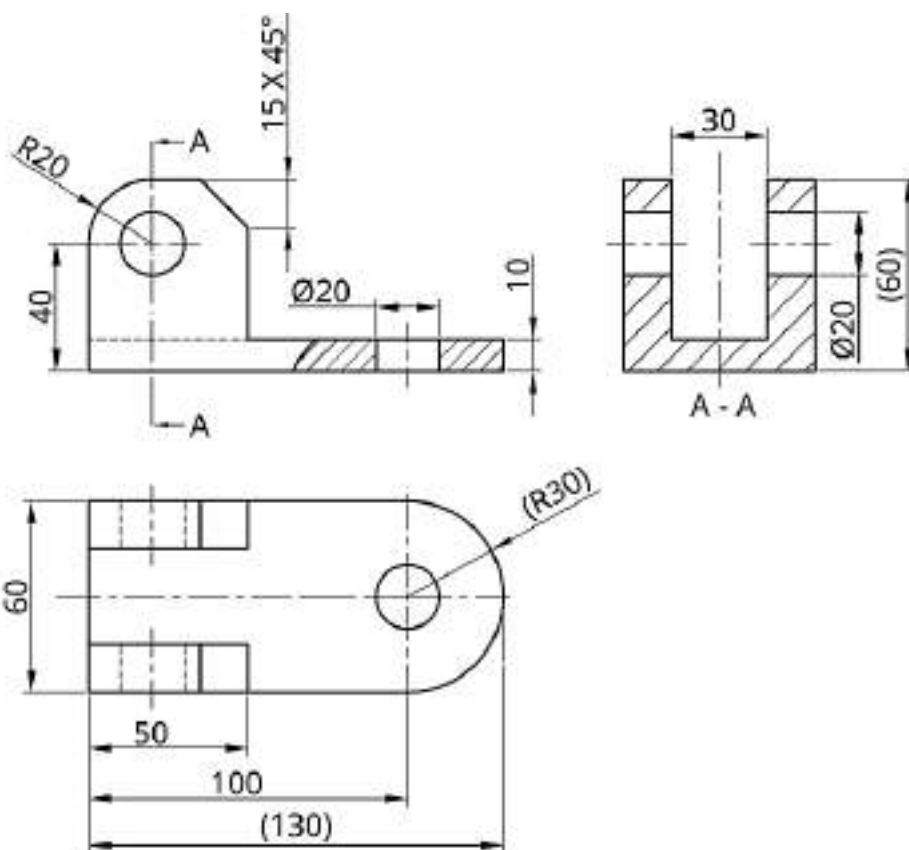


26. רישום מידות לפרופילים

דוגמת הרישום	חתיך הפרופיל
 20	מוט צורתי Z
עובי 10	לוח פלדה
$\varnothing 10$	מוט עגול
 40	מוט משושה
 40	מוט ריבועי

דוגמת הרישום	חתיך הפרופיל
— 60x10	פרופיל שטוח
 60x60x6	זוויתן, שווה צלעות
 65x100x7	זוויתן, צלעות שונות
 5	מוט צורתי T
 5	מוט צורתי U
 20	מוט צורתי I כפול

דוגמה למתן מידות בסרטוט



14. סמלים לתעשייה

טיב העיבוד (מרקם המשטח)

בסרטוט החלק לייצור מופיעים סימני טיב העיבוד המציינים את טיב המשטחים לאחר עיבודם.

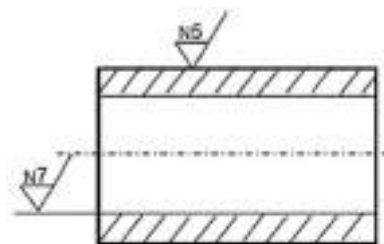
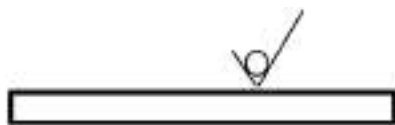


"הבליטות" וה-"שקעים" על קו משטח המוצר קובעים את מידת החספוס – דרגת מרקם השטח.

קיימים מספר תקנים (ת"י 780, ISO 1302, DIN 3141) לסימון טיב העיבוד בסרטוט. התקנים מבוססים על גבהי החספוס של פני השטח במיקרונים ($1\mu = 0.001mm$) ועל ידי חישוב מתקבל מקדם ההשוואה למדידה המסומן ב- R_A .

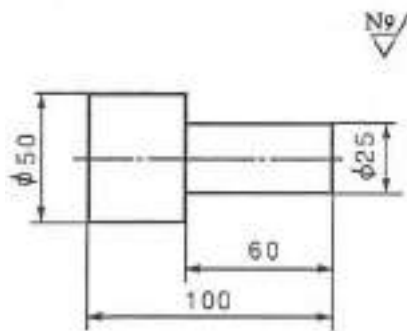
	גס			בינוני			עדין			עדין מאוד		
תקן ISO	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1
תקן גרמני	~	▽		▽▽			▽▽▽			▽▽▽▽		
$R_a [\mu m]$	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025
$R_a [\mu in]$	2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2	1

בכל שרטוט ייצור יש להגדיר את טיב השטח, ובלעדיו **לא ניתן** לייצר את המוצר. התקן הישראלי לטיב פני השטח קובע כי שטח בעל טיב מסוים מסומן על ידי, N_x במקום X יש לשים מספר בין 1 ל-12.

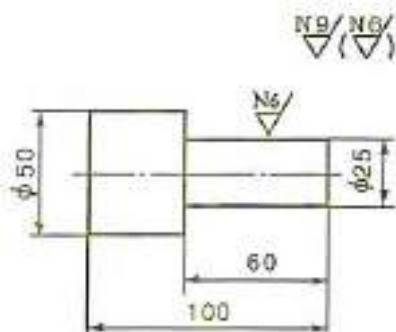


טיב שטח עבור משטח מעובד (קודקוד המשולש מסמן את השטח המעובד)
אין צורך בעיבוד והחומר

דוגמאות



כל המשטחים יעובדו בעיבוד שבבי למרקם פנים המוגדר בתקן הישראלי N9, כלומר מרקם בעל חספוס בגובה ממוצע של 6.3 מיקרונים (0.0063 מ"מ).



כל המשטחים יעובדו בעיבוד שבבי למרקם N9 ורק המשטח הגלילי Ø25 יעובד למרקם פנים חלק יותר N6 (גובה ממוצע של 0.8 מיקרונים).

טיב שטח המושג בעיבוד שבבי

גס			בינוני			עדין			עדין מאוד			דרגת טיב	שיטת עיבוד
N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1		
			■	■								עד Ø15	קידוח (Drilling)
		■	■									מעל Ø15	
	■	■	■	■	■	■	■						חריטה (Turning)
	■	■	■	■	■	■	■						כרסום (Milling)
■	■	■	■										הקצעה (Shaping)
					■	■	■						שיפוד (Broaching)
							■	■	■	■			השחזה (Grinding)
	■	■	■	■	■	■							שיוף (Filing)
								■	■	■	■		בירוק (Polishing)
							■	■	■	■			ליטוש (Lapping)
								■	■	■			מירוק פנימי (Honing)
										■	■		מירוק חיצוני

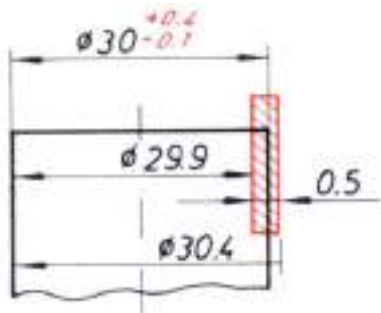
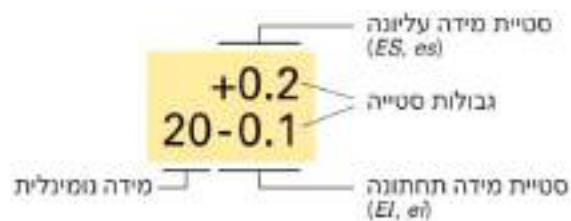
טיב פני שטח המושג בהכנת חומר גלם

N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1	דרגת טיב	
■												חום	יציקת חול
■	■												יציקת דפוס - מתכת
	■	■	■										יציקת דפונות
	■	■	■	■									יציקת לחץ
■													חישול חופשי
■													חישול בטבעים
	■	■	■	■									כבישה במבלט
			■	■									ערגול
■	■												תפרי ריתוך
				■	■	■						קור	כבישה במבלט
				■	■	■	■						ערגול ראשוני
							■	■					ערגול צורתי (גמר)
				■	■	■	■						משיכה רגילה
								■	■				משיכה עדינה

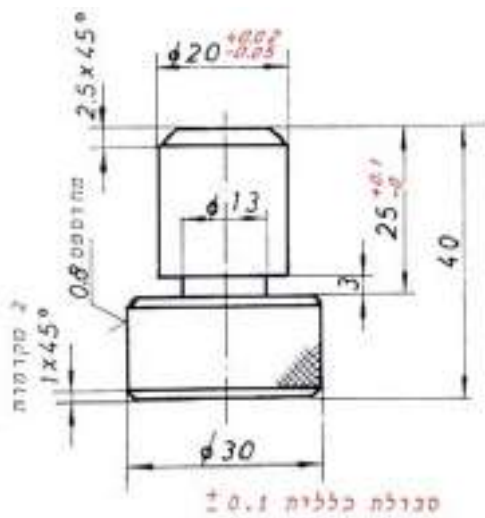
סבולת מידה (טולרנס)

רכיבי מכונות חייבים להיות ברי הרכבה והחלפה ללא עיבוד חוזר ותלות יצרן. לקבלת חליפיות מלאה, יש צורך לייצר מוצרים זהים במידותיהם. במציאות אין אפשרות לייצר חלקים שמידותיהם מדויקים באופן מוחלט. כדי לאפשר חליפיות חלקים זה בזה בלי עיבוד נוסף, קובעים את מידות הדיוק בעזרת סבולות.

מושגים:



מידת נקובה (נומינלית)	מידה נתונה בשרטוט ואליה מתייחסת הסיבולת
מידה ממשית	מידה שהתקבלה בייצור שאת ערכה אפשר למדוד
גבול עליון	המידה ה מוותרת הגדולה ביותר
גבול תחתון	המידה ה מוותרת הקטנה ביותר
סבולת T (טולרנס)	הפרש בין גבול עליון לגבול תחתון
תחום הסבולת	גודל הסטייה המותרת מהמידה הנקובה



30	מידת נקובה (נומינלית)
30.4	מידה מותרת גדולה ביותר
29.9	מידה מותרת קטנה ביותר
$30.4 - 29.9 = 0.5$	סבולת T (טולרנס)

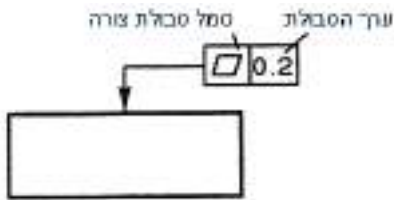
בדרך כלל אין דרישת דיוק גבוהה לכל מידות החלק. לכן, רושמים רק את הסבולות המיוחדות בתוך השרטוט. לשאר המידות רושמים **סבולת כללית** משותפת סמוך לשרטוט.

סבולות גיאומטריות (סבולת צורה ותנוחה)

סבולות צורה (Geometric Tolerance) – ת"י 1010

בשם סבולת צורה מכנים את **הסטייה המותרת** מהצורה הגיאומטרית התאורטית של החלק.

ההתייחסות היא לצורת הגיאומטרית של המשטח **ללא ייחוס למשטח אחר**.

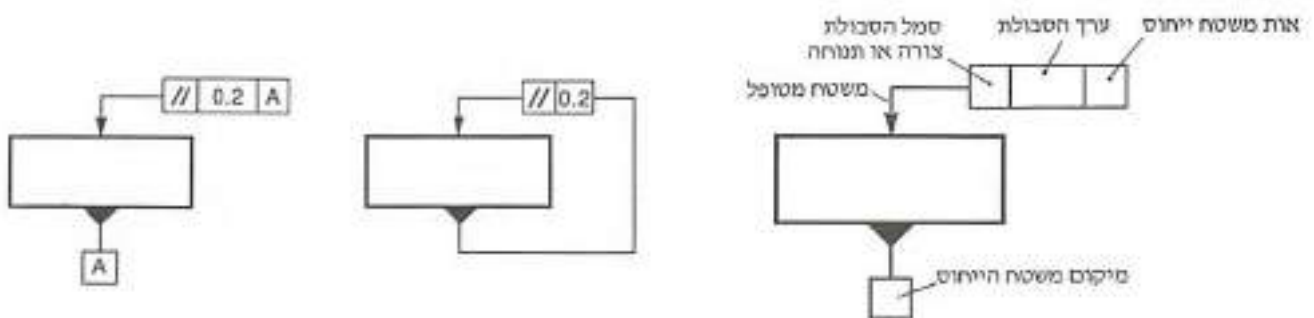


הצורות הגיאומטריות	ישרות	מישוריות	עיגוליות	גליליות
הסימן	—	▭	○	⌀

סבולות תנוחה (צורה ומצב הדדי) – ת"י 1010

בשם סבולת תנוחה מכנים את הסטייה המותרת בין שתי גיאומטריות או יותר. בסבולת תנוחה ההתייחסות היא למצב הדדי בין המשטח למשטח ייחוס.

התנוחה	מקביליות	ניצבות	סימטריות	מרכזיות	חריגות	מיקום
הסימן	//	⊥	≡	◎	↗	⊕

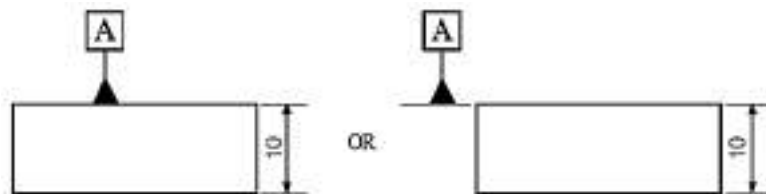


משטח ייחוס (Datum)

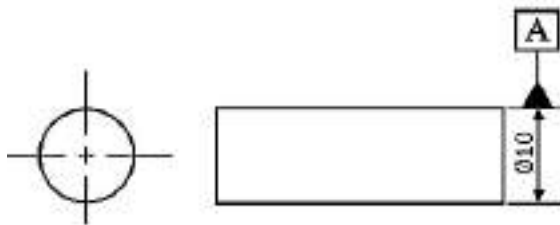


לכל סבולת תנוחה יש להגדיר משטח ייחוס – משטח הייחוס עליו תתבצע הדפינה.

סימון על גבי המשטחים:



פירוש: צד זה יש להניח על המשטח המסומן על גבי המכונה והוא ישמש כבסיס המדידה.



סימון על גבי ציר:

פירוש: יש לדפון במכונה את המשטח הגלילי המסומן.

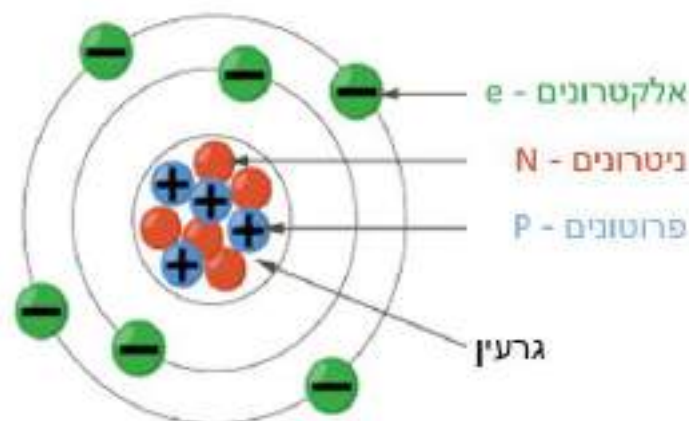
תורת החומרים

15. מבוא ומושגי יסוד

בפיתוח ובייצור של כל המוצרים שאנו מכירים - מטוסים, גורדי שחקים, גשרים, פלאפונים, שתלים רפואיים ועוד הביצועים ואמינות המוצר יקבעו על ידי תכונות החומרים מהם המוצר עשוי.

בין אם החומר נבחר בשל חוזקו המכני, יכולתו להוליך או לבודד חשמל או חום, ו/או עמידותו בתנאי הסביבה – תמיד השיקול ייגזר מתכונות החומר. תכונות אלו נקבעות על ידי ההרכב הכימי, והאופן בו האטומים מסודרים בחומר.

מבנה החומר



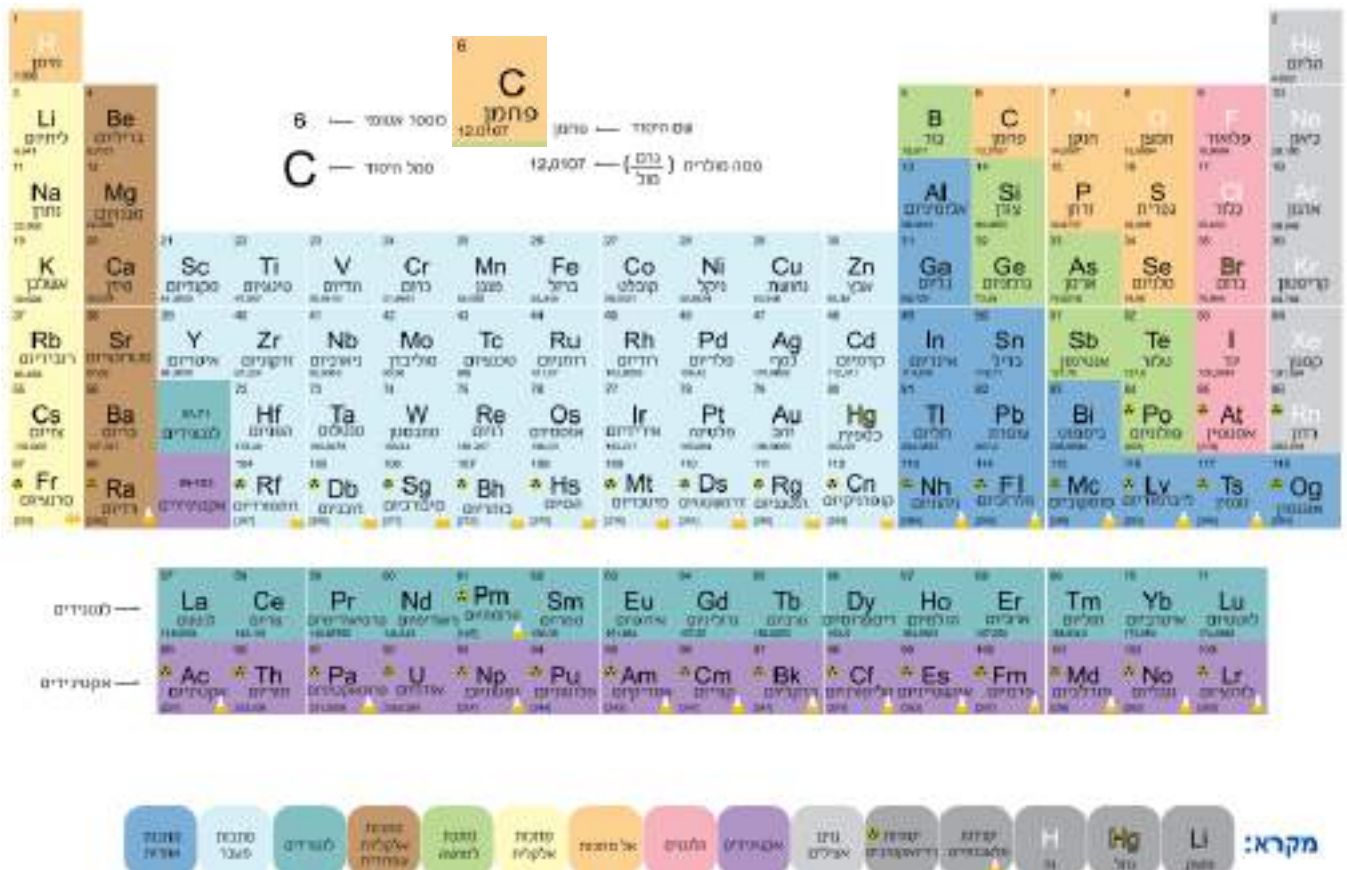
אלקטרונים – חלקיקים עם מטען חשמלי שלילי.

פרוטונים – חלקיקים עם מטען חשמלי חיובי.

ניטרונים – חלקיקים ללא מטען חשמלי.

טבלה מחזורית

היסודות השונים מסודרים ב**טבלה מחזורית** (טבלת מנדלייב, 1869) בסדר עולה לפי מספרם האטומי (מספר הפרוטונים בגרעין האטום).



הערות:

- מספר שורה בטבלה (Period) = מספר מסלולי האלקטרונים (**מספר מחזורי**).
- מספר טור/עמודה (Group) = מספר האלקטרונים במסלול החיצוני ביותר (בקליפה החיצונית).

טור	משפחה כימית
1	מתכות אלקליות
2	מתכות אלקליות אפורות
17	הלוגנים
18	גזים אצילים ⁴

⁴ משפחת יסודות יציבים, שאינם נוטים ליצור קשרים כימיים (בעלי 8 אלקטרונים בקליפה החיצונית).

מיון חומרים

יסוד – חומר הבנוי מאטומים מסוג אחד בלבד. **לא ניתן** לפרקו ולקבל חומר אחר.

חומר טהור (טבעי) – חומר בעל הרכב כימי **קבוע** המוגדר באמצעות תכונות פיזיקליות וכימיות, כגון: צבע, ריח, מצב צבירה בטמפרטורת החדר, נקודות היתוך ורתיחה ועוד. דוגמאות: ברזל, נחושת, בדיל, אלומיניום, זהב, גופרית, פחם, נפט ועוד.

תערובת – ערבוב של שני חומרים טהורים לפחות משני סוגים שונים, היחס בין החומרים יכול להשתנות מתערובת לתערובת. לתערובת אין נקודת רתיחה והתכה קבועות כי הרכב החומר לא קבוע.

תערובת הומוגנית – תערובת אחידה, לא ניתן להבחין בחומרים היוצרים אותה.

תערובת הטרוגנית – תערובת לא אחידה, ניתן להבחין בחומרים היוצרים אותה. דוגמאות: מים ובוצ, מים וחול, פלדה.

תרכובת (Compound) – חומר הבנוי משני סוגי יסודות או יותר, הקשורים ביניהם בקשר כימי כלשהו וביחס קבוע של כמויותיהם. לתרכובת תכונות כימיות משל עצמה, **השונות מתכונות מרכיביה**.

תמיסה (Solution) – תערובת הומוגנית, בדרך כלל, בצורת נוזל, המורכבת משני חומרים שונים או יותר. דוגמה, תמיסה מימית היא תערובת של מים עם חומר אחר. המים מכונים ממס והחומר האחר מכונה מומס.

תמיסה מוצקה – תערובת הומוגנית בין ממס וממס הנמצאת בפאזה מוצקה. התערובת נחשבת תמיסה ולא תרכובת כאשר המבנה הגבישי של הממס אינו משתנה וגם יש פאזה הומוגנית משותפת לתערובת.

חומר מלאכותי (סינתטי) – חומר המיוצר בתהליכים כימיים ופיזיקליים. דוגמאות: סגסוגת (נתך), פולימרים⁵, חומרים מרוכבים⁶.

סגסוגת (מסג או נתך) – חומר בסיס המעורבב עם חומרי מסג (חומרים שמוסיפים למתכות בזמן הפקתן, כאשר הן במצב מותך) כדי לשפר את תכונותיו. הסגסוגת "יורשת" חלק מתכונות היסודות המרכיבים אותה, בדרך כלל תכונות פיזיקליות כגון: צפיפות. לעומת זאת, תכונות הנדסיות כגון מאמץ מתיחה, מודול יאנג וכוח גזירה עשויות להיות שונות בתכלית מתכונות החומרים המרכיבים את הסגסוגת.

⁵ שם כולל למגוון רחב מאוד של תרכובות סינתטיות או חצי-סינתטיות.

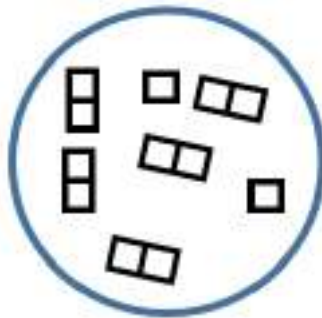
⁶ חומרים המורכבים משני מרכיבים או יותר, השונים זה מזה בצורתם, בהרכבם הכימי ובתכונותיהם והם לא מסיסים זה בזה (ראה פרק חומרים מרוכבים).

התמצקות (התגבשות) החומר

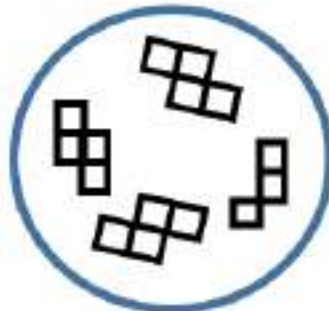
התמצקות – תופעה שבה מצב החומר משתנה מצורתו הנוזלית או הגזית אל צורה יציבה וקשה יותר.

תהליך המעבר מנוזל למוצק אינו קורה בבת אחת, הוא מתרחש במספר שלבים:

1. **נוקלאציה** (התגבשות ראשונית) – תהליך זה מתחיל בירידת טמפרטורת המתכת הנוזלית, מתחילים להיווצר מרכזי התגבשות ראשוניים הקרויים גם "עוברים" באזורים שונים של הנוזל (מתחילה התקרשות בו-זמנית במקומות רבים בנוזל), סביבם יגדל בהמשך הגביש.



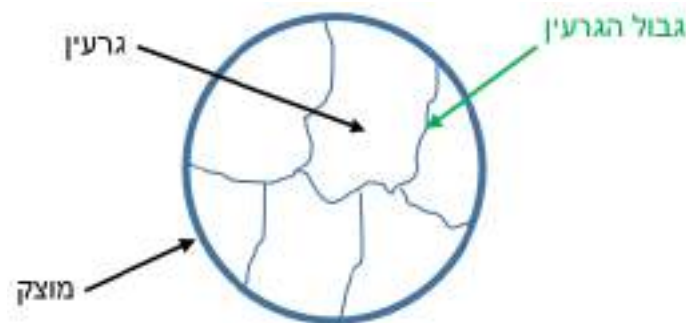
2. מרכזי הנוקלאציה הללו משמשים כעת כמרכזים להתגבשות נוספת. ככל שהתהליך נמשך כך יותר אטומים נצמדים לאזורי הנוקלאציה הקיימים, תוך שהם יוצרים גרעיני חומר גבישי.



3. **גידול** – כל גרעין גדל בכיוון משלו, כך שכאשר נפגשים שני גרעינים נוצר ביניהם אזור הנקרא **גבול גרעין**. בתוך הגרעין יש מבנה אטומי מסוגר (BCC, FCC, HCP). גבולות הגרעין הם אזור לא מסודר, כלומר, הסדר אשר מצוי בגרעין (מרווחים בין האטומים, צורה נכונה של הגביש) **אינו** מתקיים בגבול.



4. לקראת סיום ההתגבשות ככל שהמרכזים גדלים, החלל בניהם מתמלא. סוף ההתגבשות התמצקות מלאה (המבנה הגרעיני של המתכת-מבנה גבישי).



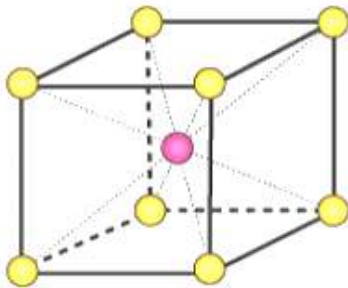
ככל שמבנה הגרעין עדין יותר, כך ייווצרו יותר גבולות גרעין. זוהי שכבה המשמש אזור מעבר בין גרעינים. גבולות הגרעינים עוטפים את הגרעינים וגורמים לבידודו של הגרעין מהסביבה. גבולות אלה הם משטחים פריכים השוברים את רצף המבנה הגבישי.

תכונות החומר תלויות במידה ניכרת בגודל ובצורת הגרעינים (גביש שאיבד את צורתו המסודרת עקב התנגשות עם גרעינים אחרים תוך תהליך ההתמצקות). בגבול הגרעינים קיים אי סדר.

סוגי מבנים סריג גבישי

אטומים של חומרים מוצקים הנמצאים בשיווי משקל יוצרים **גביש** במבנה מרחבי מסודר.

קובייה מרוכזת גוף (BCC – Body Centred Cubic)



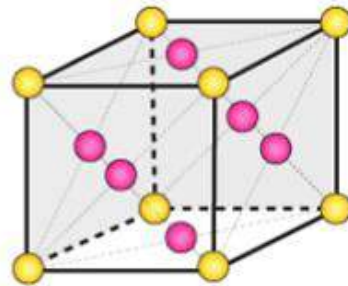
בכל פינה של הקובייה מצוי אטום אחד, שמונת האטומים **אינם** נוגעים זה בזה. במרכז הקובייה מצוי אטום נוסף שכל האטומים הפינתיים נוגעים בו.

סה"כ מכיל הגביש 9 אטומים.

דוגמאות לחומרים במבנה זה: Li, Na, K, V, Cr, Mn, Fe, Rb, Nb, Mo,

Cs, Ba, Eu, Ta, W, Ra

קובייה ממורכזת פאה (FCC – Face Centred Cubic)

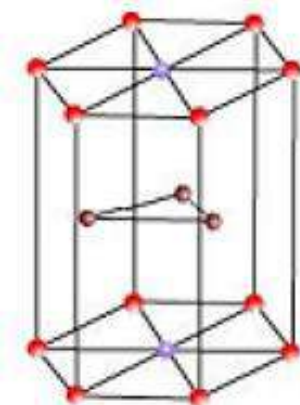


בכל פאה מצויים ארבע אטומים, ארבעת האטומים **אינם** נוגעים זה בזה. במרכז כל פאה מצוי אטום חמישי שכל ארבעת האטומים נוגעים בו.

סה"כ מכיל הגביש 14 אטומים

דוגמאות לחומרים במבנה זה: Al, Ca, Ni, Cu, Sr, Rh, Pd, Ag, Yb, Ir, Pt, Au, Pb

קְשׁוּשָׁה צפוף אריזה (HCP – Hexagonal Closed Pack)



מבנה גבישי משושה צפוף, שבו כל אטום נוגע ב-12 אטומים: 6 אטומים סובבים סביבו, 3 מצויים מעליו, 3 מתחתיו. סה"כ מכיל הגביש 17 אטומים.

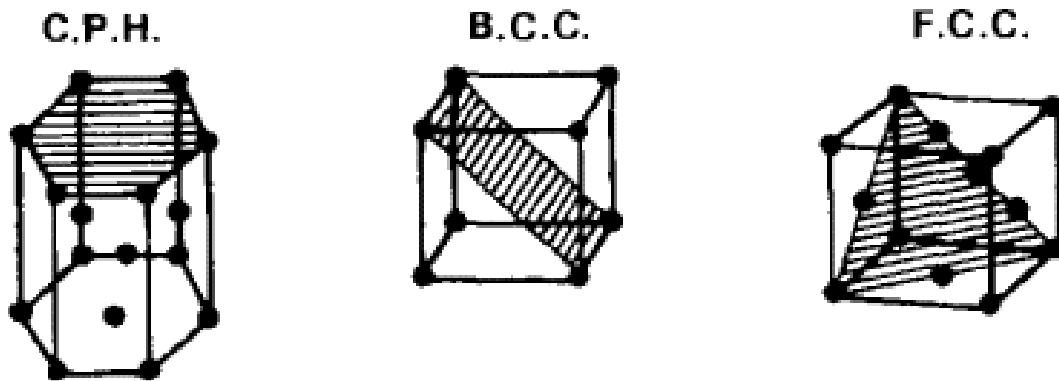
דוגמאות לחומרים במבנה זה:

Be, Mg, Sc, Ti, Co, Zn, Y, Zr, Tc, Ru, Cd, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm,

Lu, Hf, Re, Os, Tl

השפעת סוג המבנה על התכונות הפלסטיות של המתכות

פלסטיות פירושה היכולת של המתכת לשנות את צורתה החיצונית בעקבות כוחות חיצוניים מבלי שהחומר ייהרס או יישבר. למבנה הגבישי תפקיד מכריע בפלסטיות של החומר. את דרגת הפלסטיות קובעים מספר מישורי ההחלקה בסריג הגבישי המאפשרים תזוזה.



שטחי החלקה במבנים השונים

תכונות חומרים

עמידות החומר במצבים ותנאים שונים, כגון: הולכת חום, הולכת חשמל, מגנטיות, שקיפות, עמידות בפני כוחות חיצוניים, אגירת אנרגיה, שיטות שונות לעיצוב החומר. אנו נחלק את התכונות למספר משפחות הניתנות למדידת בעזרת מכשירי מדידה.

תכונות פיסיקליות – תכונות הנובעות מהמבנה הפנימי של החומר אשר אינן משתנות בהשפעת גורמים חיצוניים.

מסה – גודל פיזיקלי המתאר "כמות חומר" הנמצאת בגוף מסוים. כמות זו נותרת קבועה כל עוד לא מוסיפים או גורעים חומר.

צפיפות – יחס בין מסת החומר ליחידת נפח שלו.

מגנטיות – כושר החומר להפעיל כוח דוחה או מושך על עצם אחר המפיק שדה מגנטי.

טמפרטורת היתוך – נקודה בה החומר הופך ממצב צבירה מוצק למצב צבירה נוזל לאחר חימומו

הולכת חשמל – כושר החומר להעביר זרם חשמלי דרכו.

הולכת חום – כושר החומר להעביר דרכו אנרגיית חום ממקום בעל טמפרטורה גבוהה למקום בעל טמפרטורה נמוכה.

אופטיות – כושר החומר להעביר קרינה אלקטרומגנטית

אקוסטיות – כושר החומר לקלוט ולהעביר קולות וצלילים.

תכונות כימיות – תגובת המתארות את תגובת החומר לסביבה תוך שינויים בהרכבו.

מסיסות – כושר החומר להתמוסס בחומר אחר עד לקבלת חומר אחיד בעל תכונות חדשות.

קורוזיביות (שיתוך) – כושר החומר להתנגד לתהליכי הרס בהשפעת הסביבה.

תכונות מכניות – התנהגות חומר עקב הפעלת כוחות חיצוניים עליו.

קשיות – כושר פני החומר להתנגד לחדירת גוף אחר לתוכו.

צפידות – כושר החומר לעמוד בפני כוחות דינמיים, הלם וזעזועים בלי להרס.

אלסטיות (גמישות) – כושר החומר לשנות את צורתו בהשפעת כוחות חיצוניים במשך זמן קצר, ולשוב לצורתו המקורית לאחר שהכוח פסק.

פלסטיות – כושר החומר לשנות את צורתו בהשפעת כוחות חיצוניים, ולשמור על השינוי בצורה קבועה גם לאחר הפסקת פעולת הכוח החיצוני.

חוזק – כושר החומר להתנגד לפעולת כוחות חיצוניים.

חסינות שבר – כושר החומר להתנגד לשבירה בנוכחות חריץ.

התעייפות (מכנית) – כוח החומר לעמוד בכוח מחזורי.

זחילה – כושר החומר לשינוי צורה בטמפרטורה גבוהה.

תכונות טכנולוגיות – כושר החומר לשנות צורה למוצר על ידי עיבוד בתהליך טכנולוגי.

שביבות – כושר החומר לעיצוב באמצעות הורדת שבבים.

יציקות (דלילות) – כושר החומר למלא חלל בצורת מוצר כאשר הוא במצב נוזלי.

ערגול – כושר החומר לעבור עיבוד פלסטי באמצעות מנגנונים של תנועת נקעים⁷ במתכת.

רתיכות – כושר החומר להתחבר עם חלק מתכתי אחר בהיתוך מקום החיבור והוספת חומר מתכתי נוסף.

חשילות – כושר החומר לשינוי צורה בהקשה או בכוחות לחיצה הפועלים על המתכת (לרוב במצב חם).

רקיעות – כושר החומר לעבור עיבוד פלסטי על ידי הקשה (לרוב במצב קר).

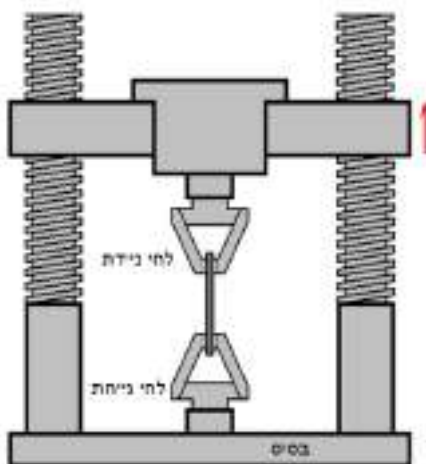
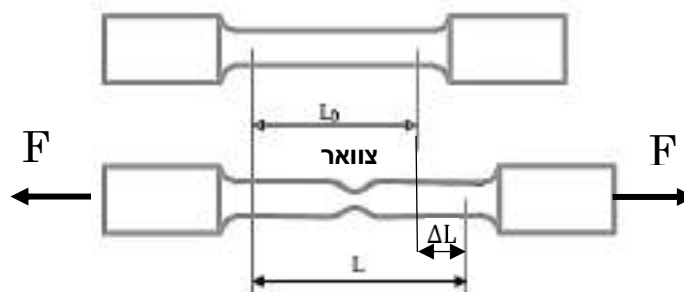
⁷ פגם במבנה הגבישי של החומר. תנועת נקעים מציינת תופעה שה"נקע" מתקדם לאורך החומר בעקבות הפעלת כוח חיצוני על החומר.

16. תכונות מכניות של חומרים

מבחן מתיחה (משיכה)

קביעת ערכים מכניים אופייניים של חומר תחת עומס מתיחה. זהו אחד המבחנים הבסיסיים ביותר המשמשים בהנדסת חומרים על מנת לקבוע את תכונותיו המכניות של חומר בתנאי העמסה שונים.

המבחן מבוצע על דגם מתיחה שטוח או עגול (ראה תמונה מטה) ותוצאותיו מספקות מידע כמותי אודות חוזק מתיחה של החומר, ועל תחום האלסטיות והפלסטיות של החומר הנבדק.

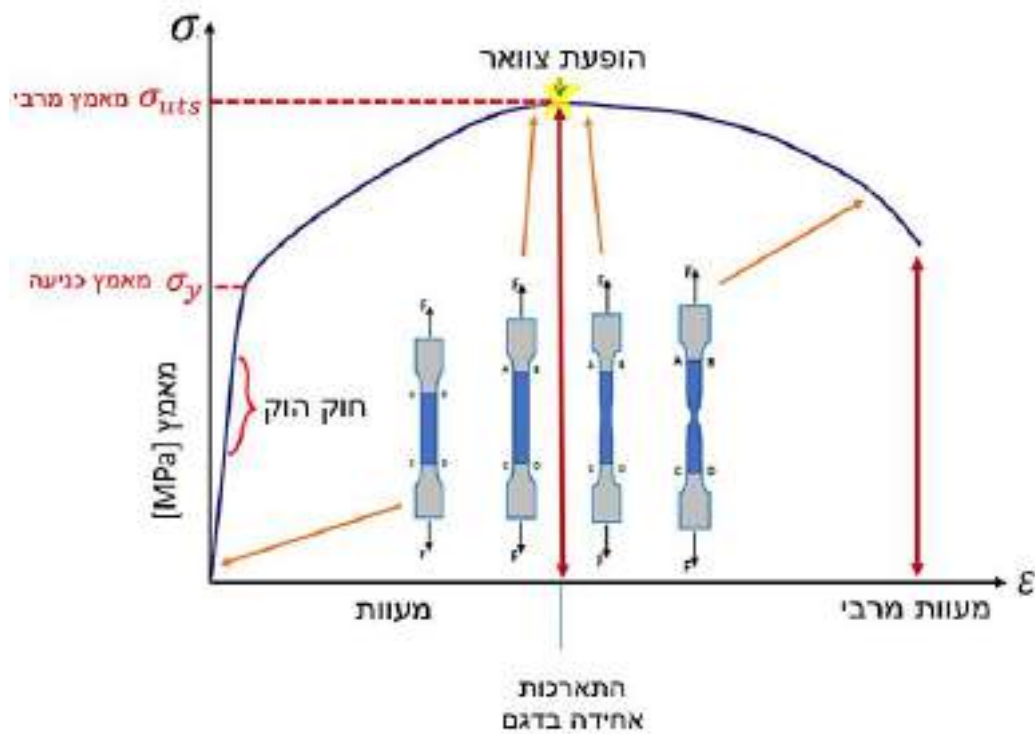


דגם המבחן מותקן במכונת הבדיקה בין הלחי הנייחת והלחי הניידת. במהלך הבדיקה נלקחות מדידות שונות: הכוח המופעל (עומס המתיחה) והדפורמציה (שינוי האורך) המקבילה של החומר המשורטטים על גרף. מפעילים את הלחי הניידת וגורמים לתנועתה כלפי מעלה תחת כוח מתיחה **קבוע**. דגם המתיחה **מתנגד** לכוח ומתחיל להתארך.

החומר עובר מספר שלבים של דפורמציה: תחילה, הוא מתנהג בצורה אלסטית, כלומר הוא חוזר לצורתו המקורית לאחר הסרת הכוח. ככל שהעומס גדל, הוא עלול להגיע לנקודה שבה הוא מתחיל לעבור דפורמציה פלסטית קבועה. בסופו של דבר, הוא מגיע לנקודת צוואר, שבה חתך החומר מתחיל לרדת באופן דרמטי. הניסוי נמשך עד לשבירת הדגם הנבדק. משטח השבר נבדק כדי להבין את סוג הכשל, משיך (מתיחה וצוואר) או פריך (פתאומי, ללא עיוות רב).

גרף מאמץ – מעוות

בזמן ביצוע המבחן מסורטטים על גבי גרף מאמץ המתיחה המתפתח והמעוות המתפתחים בדגם. מכשיר מדידה מודד באופן רצוף את כוח המתיחה F המופעל על הדגם ואת התארכות הדגם ΔL . יחידת עיבוד הנתונים של המכונה מחשבת את מאמץ המתיחה σ_t , מדיעת מידת החתך הרוחבי A_0 ואת המעוות (עיבור) ε באמצעות מדידת שינוי האורך.



גרף מאמץ מעוות עבור פלדה S235JR

מהנתונים שנאספו במהלך הבדיקה, ניתן לקבוע מספר מאפיינים מכניים מרכזיים:

• **מאמץ כניעה – σ_y**

עד לנקודה זו הדגם מתארך ביחס ישר בין מאמץ המתיחה σ_t והמעוות ϵ (חוק הוק). בתחום זה הגדיר המדען **תומאס יאנג** מודול אלסטיות – E (התנגדות החומר לשינוי קטן בצורתו עקב כוח המופעל עליו, בתחום האלסטי).

הסרת פעולת הכוח לפני נקודה זו תגרום לחזרת העיבור לערכו ההתחלתי. לאחר נקודת הכניעה ההתארכות היא **פלסטית** (התחום הפלסטי של החומר), החומר לא חוזר למצבו ההתחלתי עם הפסקת העומס.

• **מאמץ מרבי – σ_{uts}**

זהו המאמץ המכסימלי המתפתח בדגם לפני שבירתו, לאחריו מופיע צוואר המקטין את שטח החתך המתנגד לכוח המתיחה עד שהדגם נקרע. העיבור שנשאר בדגם לאחר קריעתו מכונה **עיבור השבר**.

• **התארכות – יכולת החומר לשנות את אורכו בהשפעת כוח.**

• **מודול יאנג – התנגדות החומר לשינוי קטן בצורתו עקב כוח המופעל עליו, בתחום האלסטי.**

• **קשיחות השבר – מדד לעמידת החומר בפני התפשטות סדקים.**

• **נקודת קריעה – מאפשרת לבחון את כמות האנרגיה שיש להשקיע עד להרס החומר.**

מבחני מתיחה חיוניים לתכנון וייצור חומרים, ומבטיחים שהם עומדים בדרישות ביצועים ספציפיות עבור יישומים שונים. הם משמשים בתחומים החל ממטלורגיה למדעי הפולימרים ומעבר לכך.

חישובים

התארכות הדגם ברגע נתון

$$\Delta L = L_1 - L_0$$

ΔL	התארכות הדגם ברגע נתון	mm
L_1	אורך דגם ברגע נתון	mm
L_0	אורך התחלתי של הדגם	mm

התארכות יחסית של הדגם ברגע נתון

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} ; \varepsilon(\%) = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100$$

ε	התארכות יחסית	
ΔL	התארכות הדגם ברגע נתון	mm
L_0	אורך התחלתי של הדגם	mm

מאמץ מתיחה ברגע נתון

$$\sigma_t = \frac{F}{A}$$

σ_t	מאמץ מתיחה	$\text{MPa} = \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
F	כוח מופעל	N
A	שטח חתך הניצב להפעלת הכוח	mm^2

תחום מאמץ הנמוך ממאמץ הכניעה של החומר המבטיח עבודה בטווח הרחוק ממאמץ הכניעה. היחס בין מאמץ הכניעה למאמץ המותר נקרא **מקדם בטיחות** (Safety Factor).

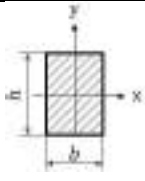
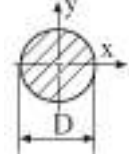
$$S = \frac{\sigma_y}{[\sigma]}$$

$$\frac{N}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \quad \sigma_y \quad \text{מאמץ כניעה במתיחה}$$

$$\frac{N}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \quad [\sigma] \quad \text{מאמץ מותר לחומר המתקן}$$

$$S \quad \text{מקדם בטחון (Safety factor)}$$

שטח חתך מתנגד למתיחה

שטח $A [\text{mm}^2]$	
$b \cdot h$	
$\frac{\pi}{4} \cdot D^2$	

רדוקציה של שטח

$$R_A = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \cdot 100 = \frac{d_0^2 - d_f^2}{d_0^2} \cdot 100$$

R_A	רדוקציה של שטח	%
A_0	שטח התחלתי של הדגם	mm^2
A_f	שטח סופי של הדגם	mm^2
d_0	קוטר התחלתי של הדגם	mm
d_f	קוטר סופי של הדגם	mm

מודול אלסטיות

$$E = \frac{\sigma_t}{\varepsilon} = \frac{F \cdot L}{A \cdot \Delta L} = \tan \alpha$$

$$\text{MPa} = \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

σ_t מאמץ מתיחה

ε התארכות יחסית

F כוח מופעל

L אורך דגם ברגע נתון

A שטח חתך הניצב להפעלת הכוח

ΔL התארכות הדגם ברגע נתון

N

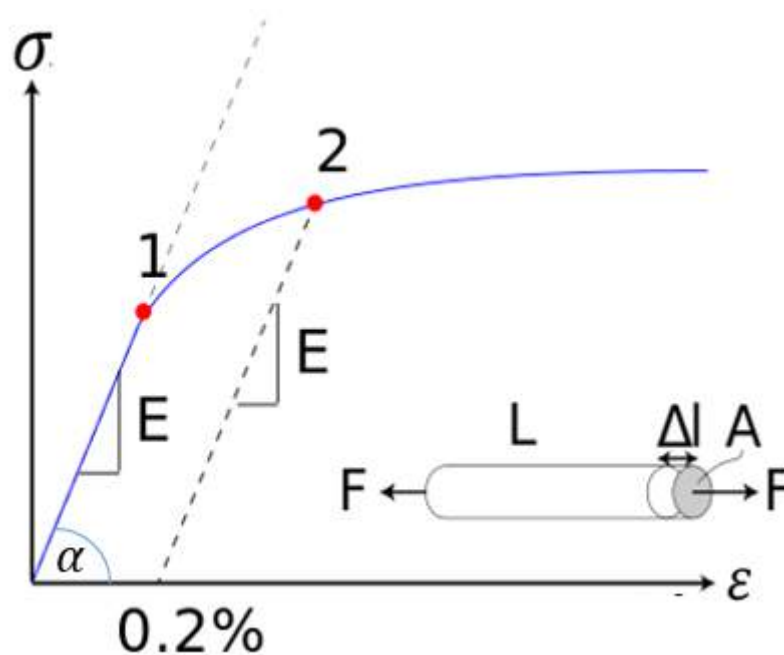
mm

mm²

mm

מציאת נקודת כניעה מוסכמת

בסגסוגות רבות חסרה נקודה ברורה של מעבר מאזור אלסטיות לאזור פלסטיות. אחת הדרכים לקביעת מאמץ הכניעה היא הנקודה בה ישנו מעוות של מעל 0.2%, קביעה זו אינה מוחלטת אך מתאימה מספר רב של מתכות.



נקודה 1 – גבול פרופורציונליות

נקודה 2 – נקודת כניעה מוסכמת

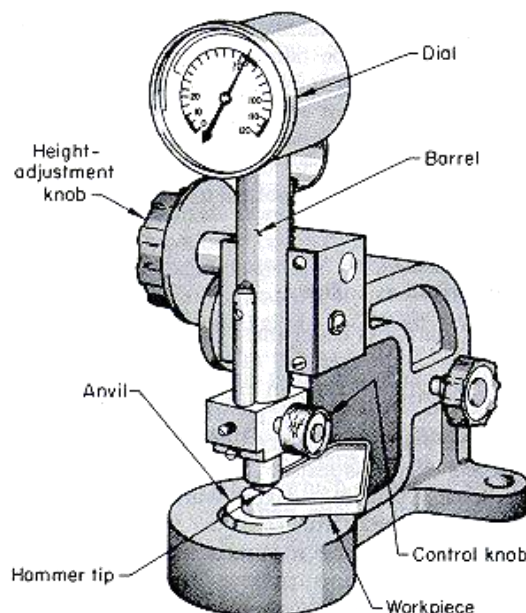
מבחן קשיות

קשיות – כושר פני החומר להתנגד לחדירת גוף אחר לתוכו.

מבחן הקשיות הוא המבחן השכיח ביותר בתעשייה, מאחר והוא מאפשר לקבוע תכונות מכניות וטכנולוגיות של החומר ללא צורך בציוד בדיקה יקר.

בדיקה בהפלה – שיטת שור (Shore Scleroscope)

בשיטת בדיקה זו מפילים מגובה נתון H (10") פטיש בעל חוד יהלום אל פני שטח מתכת נבדקת. הפטיש נתקל במתכת וקופץ חזרה. לפי הגובה h אליו הוא חזר נקבעת קשיות החומר. ככל שהקפיצה חזרה גבוהה יותר המתכת קשה יותר.



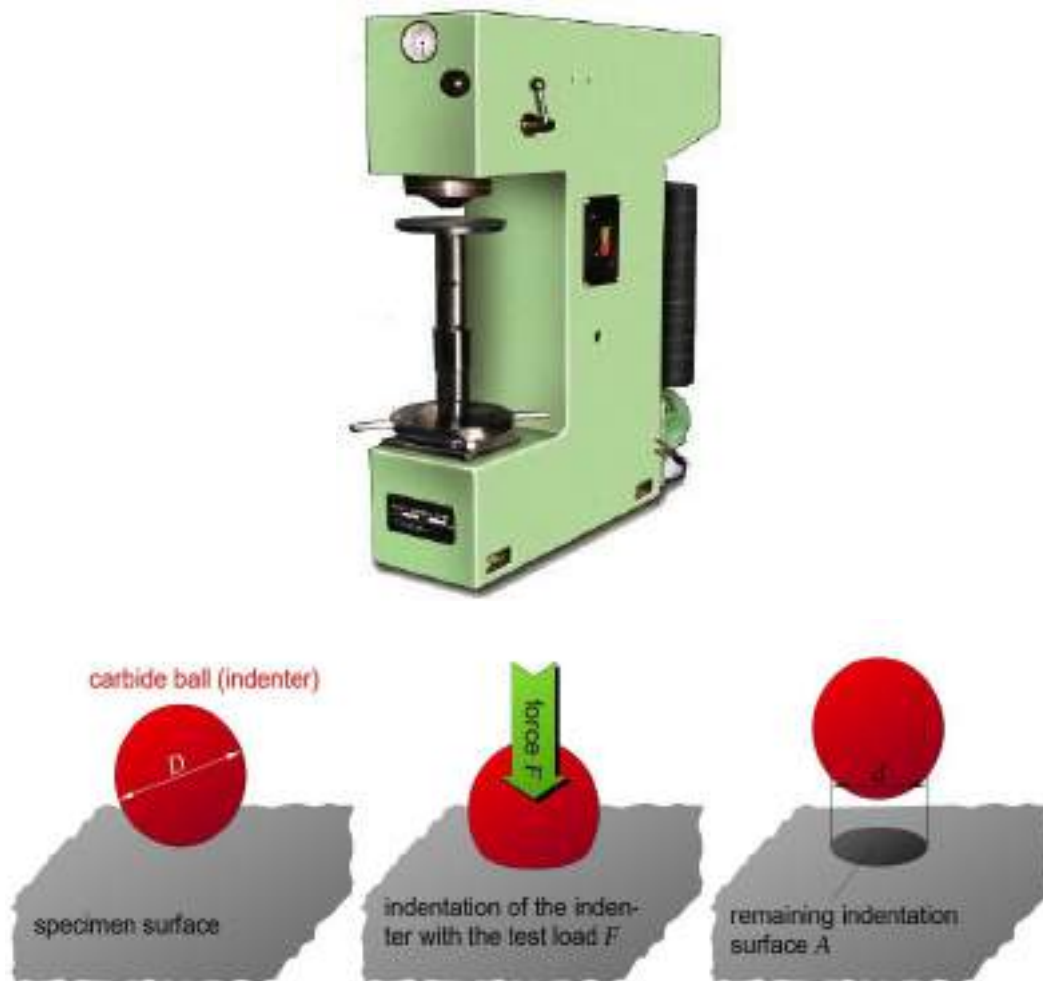
ערך הקשיות נקבע על סמך היחס בין גובה החזרה – h לגובה הנפילה הראשוני – H , המבוטא באחוזים. ערך זה ידוע כמספר קשיות שור.

- אינה פוגעת במוצר הנבדק, מאחר ואינה משאירה עקבה.
- המשקל הנמוך של מכשיר הבדיקה מאפשר לנייד אותו.
- שימושי במיוחד כאשר בדיקת קשיות רגילה אינה מתאפשרת.
- מחייבת שטח פנים מלוטש
- המשטח הנבדק חייב להיות ניצב לפטיש המופל.



בדיקה בחדירה – שיטת ברינל (Brinell)

עיקרון הבדיקה החדרת גוף קשה בעל צורת גדור פלדה הקרוי **חודרן** אל תוך חומר נבדק באמצעות הפעלת עומס על החודרן בקצב איטי לזמן מוגדר. ככל שהחומר רך יותר, העקבה (השקע הנשאר לאחר חדירת החודרן) המתקבלת גדולה יותר.



בדיקת קשיות בשיטת ברינל היא שיטה שכיחה לקביעת קשיות החומר, המודדת את ההתנגדות של חומר לעיוות תחת עומס מוגדר ומרוכז לפרק זמן מוגדר. הבדיקה מתבצעת באמצעות לחיצת כדורית פלדה שקוטרה נתון בכוח ידוע. קושי המתכת נקבע לפי מדידת קוטר הגומה (העקבה) בשלוש מקומות וקביעת קוטר ממוצע שהכדורית יוצרת בעזרת מיקרוסקופ המכויל בהתאם.

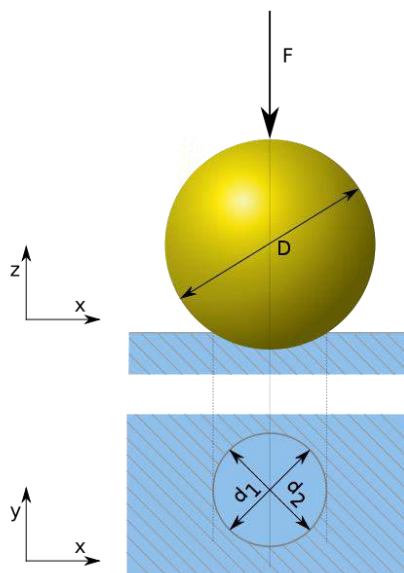
- זו השיטה היחידה שנותנת תוצאות אמינות בחומרים בעלי גרעינים גדולים וביחוד ביצקת ברזל אפורה.
- מידעת קשיות ברינל ניתן לקבוע חישובית תכונות מכניות נוספות כגון: חוזק, אחוז פחמן ועוד.
- השיטה מתאימה למגוון רחב של חומרים, מתכתיים ואל מתכתיים.
- מספקת מדידה אמינה ומדויקת של קשיות.
- יש צורך בהכנת דגימה קטנה ושטוחה של החומר הנבדק.
- טיב פני שטח לקוי גורם לאי דיוק בבדיקה, לכן יש צורך בהכנת שטח נקי וחלק.
- הבדיקה מוגבלת לקשיות מקסימלית של החומר עד 450 HBN, ולכן לא ניתן לבדוק פלדות מחוסמות שהקושי שלהן מתקרב לקושי של הכדור.
- יש קושי במדידת המידה של העקבה (קוטר ההטבעה לא תמיד מדויק מכיוון שעקב נוצרים זרימה פלסטית שוליים המגדילים את השקע).
- המדידה משאירה עקבה גדולה יחסית על פני השטח (כגודל השקע) דבר שיכול לפסול חלק.
- לא ניתן לבדוק חומרים דקים וקטנים (הכדור הורס אותם).



חישוב קשיות ברינל

$$HBN = \frac{F}{A} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$



HBN	קשיות לפי ברינל	MPa
F	כוח הפועל על החודרן	N
A	שטח העקבה	mm ²
D	קוטר כדורית	mm
d	קוטר עקבה ממוצע	mm
d ₁	קוטר עקבה מדוד	mm
d ₂	קוטר עקבה מדוד (ניצב לקוטר הראשון)	mm

תכונות מכניות מקורבות של פלדה פחמנית רפויה

מאמץ מקסימלי למשיכה

$$\sigma_{uts} = \frac{HBN}{3}$$

$$\frac{N}{mm^2} = MPa \quad \sigma_{uts} \quad \text{מאמץ מרבי למתיחה}$$

$$MPa \quad HBN \quad \text{קשיות לפי ברינל}$$

מאמץ התעייפות

$$\sigma = \frac{HBN}{6}$$

$$\frac{N}{mm^2} = MPa \quad \sigma \quad \text{מאמץ התעייפות}$$

$$MPa \quad HBN \quad \text{קשיות לפי ברינל}$$

מאמץ כניעה

$$\sigma_y = \sigma_{uts} \cdot \frac{2}{3}$$

$$\frac{N}{mm^2} = MPa \quad \sigma_y \quad \text{מאמץ כניעה במתיחה}$$

$$\frac{N}{mm^2} = MPa \quad \sigma_{uts} \quad \text{מאמץ מרבי למתיחה}$$

אחוז פחמן

$$C = \frac{\sigma_{uts} - 28}{65}$$

$$\% \quad C \quad \text{אחוז פחמן בפלדה}$$

$$\frac{N}{mm^2} = MPa \quad \sigma_{uts} \quad \text{מאמץ מרבי למתיחה}$$

מאמץ משיכה מרבי

$$\sigma_{uts} = k \cdot \text{HBN}$$

$$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \quad \sigma_{uts} \quad \text{מאמץ מרבי למתיחה}$$

k מקדם ניסיוני

$k = 0.26$ יציקות אלומיניום

$k = 0.34$ פלדות מסג

$k = 0.36$ פלדות פחמניות

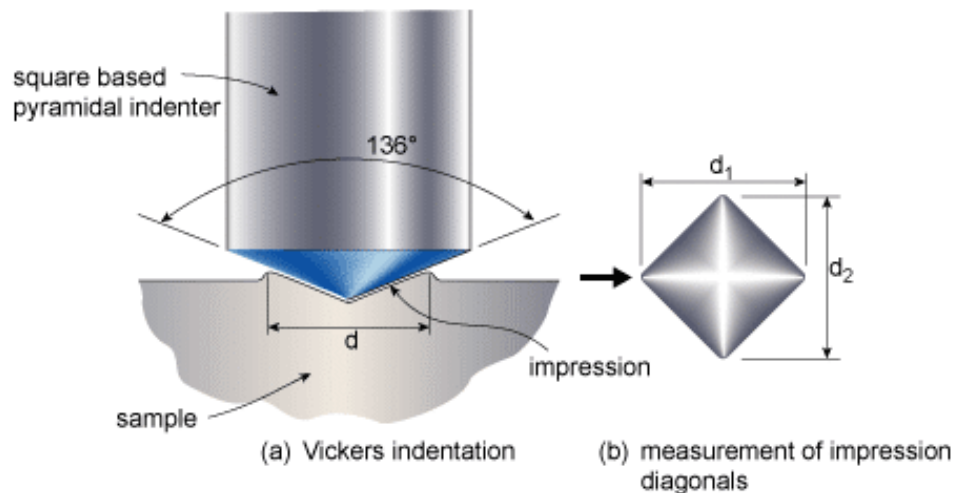
$k = 0.40$ ארז ופליז משוכים

$k = 0.55$ ארד ופליז מורפים

MPa HBN קשיות לפי ברינל

בדיקה בחדירה – שיטת ויקרס (Vickers)

החודרן בבדיקה זו הוא פירמידת יהלום מרובעת בעלת זווית חוד 136° בין הפאות המנוגדות. עומס הבדיקה יכול להשתנות בין 1 kg ל-120 kg למשך כ-15 שניות. קושי המתכת נקבע לפי מדידת ממוצע אלכסוני העקבה המרובעת שהפירמידה יוצרת. מדידת הגומה נעשית באמצעות מיקרוסקופ המכיל בהתאם.



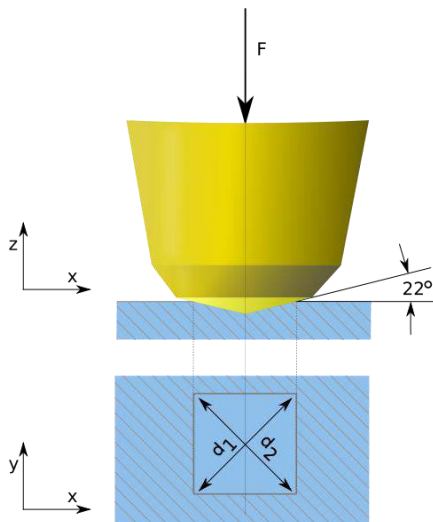
- תוצאה מדויקת ביותר בגלל הפינות החדות (שקע חד).
- שיטת הבדיקה מתאימה למתכות קשות ורכות.
- הבדיקה משאירה סימן קטן בלבד (לא הורס את הפרט הנבדק).
- ניתן לבדוק חומרים דקים מאוד (השיטה נותנת תוצאה בעומס 1 kg).
- ניתן לבדוק שטחים מוקשים בעובי מאיות בודדות.
- יש צורך בהכנת דגימה קטנה ושטוחה של החומר הנבדק.
- בדיקה מסובכת שדורשת מיקרוסקופ וניסיון לאור שבירות החודרן יהלום.
- לא מתאימה לחומרים נקבוביים וחומרים עם פתיתי גרפיט (מגדיל את העקבה).
- על החלק הנבדק להיות בעל טיב פני שטח טוב ומישורי.



$$HV = \frac{F}{A} \approx \frac{1.8544 \cdot F}{d^2}$$

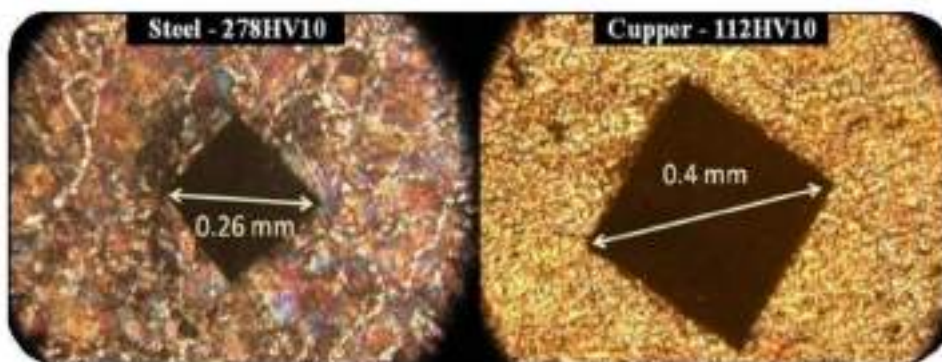
$$A = \frac{d^2}{2 \cdot \sin\left(\frac{136}{2}\right)} = \frac{d^2}{1.8544}$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$



MPa	HV	קשיות לפי ויקרס
N	F	כוח הפועל על החודרן
mm ²	A	שטח העקבה
mm	D	קוטר כדורית
mm	d	ממוצע אורכי אלכסונים
mm	d ₁	אורך אלכסון עקבה מרובעת
mm	d ₂	אורך אלכסון עקבה מרובעת (ניצב לראשון)

בדיקת מיקרו-קושי – מיועדת לבדיקת חלקים עדינים ביותר או פאזות שונות בחומר, שניתן להבחין בהן רק במיקרוסקופ. עקרון הבדיקה הוא יצירת עקבה על ידי חודרן יהלום פירמידלי מעוין בעומס נמוך מאוד (עד 13 ק"ג). העקבה קטנה מאוד ונותנת למדידה רק באמצעות מיקרוסקופ הנמצא במכשיר



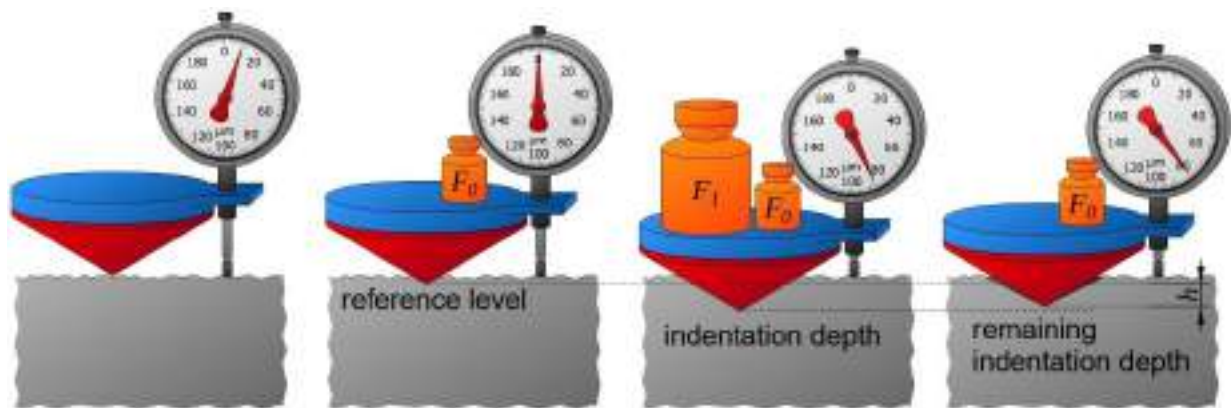
בדיקה בחדירה – שיטת רוקוול (Rockwell)

בבדיקת ויקרס וברינל נמדדת הקשיות לפי שטח העקבה. בשיטת בדיקה זו נמדדת הקשיות על-פי עומק העקבה ביחידות שרירותיות.

שלבי הבדיקה

1. **עומס ראשוני** – בתחילת הבדיקה מוצמד החודרן אל פני השטח הנבדק בכוח התחלתי 100 N בלבד. כוח זה מופעל כדי לעבור את שכבות התחמוצות והזהומים שעל פני השטח ולספק לכל הבדיקות באותו חומר תנאי בדיקה **אחידים** שאינם מושפעים מפני השטח.
2. **עומס ראשי** – לאחר הטעינה המוקדמת, מופעל עומס גדול נוסף. עומק החדירה (הגידול בעומק עקב העומס העיקרי) נמדד.
3. **פריקה** – העומס הראשי מוסר, אך העומס הקטן נשמר. זה מאפשר למדוד את עומק החדירה הנותר. נרשמים על השעון מספרי הקשיות המתאימים חסרי יחידות.

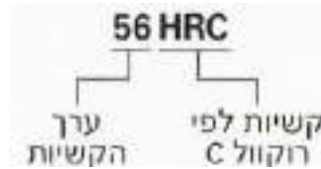
בשל מהירות וקלות השימוש השיטה הפכה לבחירה פופולרית עבור בקרת איכות בתהליכי ייצור.



- בדיקה מהירה, ערך הקשיות מתקבל באופן ישיר.
- מתאימה לחומרים רכים וקשים כאחד.
- משאירה עקבה קטנה בחומר הנבדק.
- אין צורך בשטח בדיקה מישורי וחלק.
- ניתן לבדוק שטחים עליונים דקים של מתכות שעברו הקשייה חיצונית.
- מספקת מדידות קשיות הניתנות לחזרה ואמינות.
- מדויקת פחות משיטת ברינל או ויקרס



בשיטת רוקוול יש כמה מדדים המבוססים על שילוב חודרים וסוגי עומס והם מסומנים HR (או בקיצור R) בשילוב הסימן של סולם המדידה A – F.



סולמות מדידת קשיות רוקוול (רשימה חלקית):

סימון	עומס [ק"ג]	חודרן	סולם מדידה
R _A	60	קונוס יהלום בזווית 120°	A
R _B	100	כדור פלדה קשה או מתק"ש בקוטר 1/16" (1.5875 מ"מ)	B
R _C	150	קונוס יהלום בזווית 120°	C
R _F	60	כדור פלדה קשה או מתק"ש בקוטר 1/16" (1.5875 מ"מ)	F

הערות:

סולם מדידה A מיועד למדידת קשיות מתק"ש וקרבידים.

סולם מדידה B מיועד למדידת קשיות פלדות רכות, סגסוגות אלומיניום, סגסוגות נחושת.

סולם מדידה C מיועד למדידת קשיות פלדות (כולל כלאה שעברו חיסום)

קשיות לפי סולם מדידה B – HRB

$$R_B = 130 - \frac{h - h_0}{0.002}$$

קשיות לפי סולם מדידה C – HRC

$$R_C = 100 - \frac{h - h_0}{0.002}$$

R_B	קשיות לפי רוקוול B
R_C	קשיות לפי רוקוול C
h	עומק חדירת החודרן לאחר הורדת עומס עיקרי
h_0	עומק חדירה ראשוני של החודרן
mm	
mm	

טבלת המרה בין קשיות בריןל, ויקרס, ורקול

בריןל	ויקרס	רוקול
HB	HV	R _B
143	143	80
140	140	79
137	138	78
134	134	77
131	131	76
128	129	75
126	127	74
123	123	73
121	121	72
118	118	71
116	116	70
114	115	68
111	113	67
110	110	66
109	109	65
107	108	64

בריןל	ויקרס	רוקול	
HB	HV	R _C	R _B
285	285	29	
277	278	28	
269	270	27	
262	261	26	
255	255	25	
248	249	24	
241	240	23	102
235	235	21	101
229	228	20	100
223	222	19	99
217	217	17	98
212	213	15	97
207	208	14	95
201	201	13	94
197	197	12	93
192	192	11	92
187	186	9	91
183	183	8	90
179	178	7	90
174	174	6	89
170	171	4	88
167	166	3	87
163	162	2	86
159	159	1	85
156	155	0	84
152	152		83
149	149		82
146	148		81

בריןל	ויקרס	רוקול
HB	HV	R _C
780	1224	72
745	1116	70
712	1022	68
682	941	66
653	868	64
627	804	62
601	746	60
578	694	58
555	650	56
534	606	54
514	587	52
495	551	50
477	534	49
461	502	48
444	474	46
429	460	45
415	435	43
401	423	42
388	401	41
375	390	40
363	380	39
352	361	38
341	344	36
331	334	35
321	320	33
311	311	32
302	303	31
293	292	30

מבחן נגיפה (Impact Test)

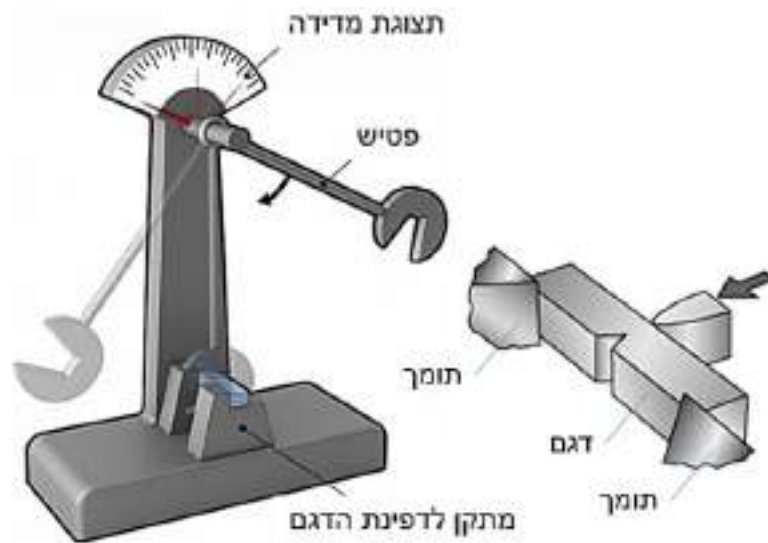
מבחן נגיפה (בדיקת פגיעה) זהו תהליך מבחן המשמש לקביעת התנהגותם של חומרים כאשר הם נתונים לכוח או פגיעה פתאומית. המבחן מאפשר להעריך את הקשיחות, החוזק והעמידות של חומרים, בתרחישים שבהם הם עלולים לחוות תנאי עומס פתאומיים או דינמיים (צפידות). זה עוזר לבחירת חומרים שיפעלו בצורה מהימנה ובטוחה בסביבות ספציפיות או בתנאים תפעוליים מסוימים.

במבחן הנגיפה אנו בודקים את האנרגיה הדרושה לשבירת מתכות. על פי בדיקה זו נקבעת עמידותה של המתכת בפני זעזועים (הלם) ולחבטות פתאומיות, וכמו כן רגישותה לחריצים וחבטות פתאומיות.

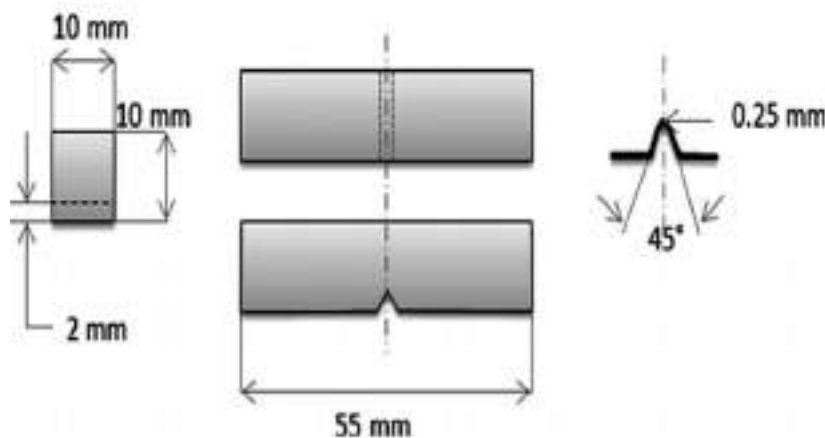
חומר משיך – חומר הסופג אנרגיה רבה עד הגעה לשבר = דפורמציה פלסטית רבה יותר עד לשבירה.

חומר פריך – חומר שאינו סופג אנרגיה עד הגעה לשבר = דפורמציה פלסטית נמוכה מאוד עד שבירה.

מבחן הנגיפה של צ'רפי (Charpy Impact Test)



(1) ממקמים בחלק התחתון של המכשיר דגם נבדק במידות $10 \times 10 \times 55$ המונח בין שני סמכים שמרחקם 40 mm. הפטיש חובט בדגם בצד המנוגד לחריץ.



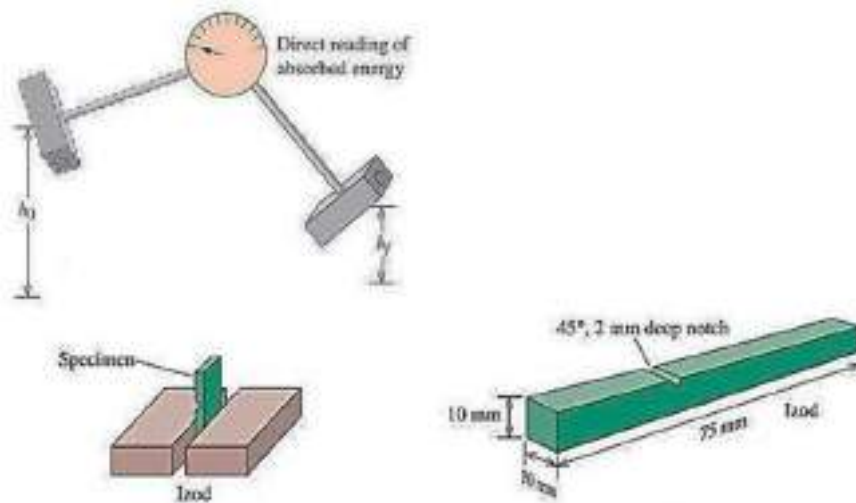
(2) משחררים מטולטלת מגובה התחלתי ידוע בו למטולטלת אנרגיה פוטנציאלית התחלתית, ידועה.

(3) לאחר שחרורה מתחילה המטולטלת לצבור אנרגיה קינטית עד הגעה למהירות מרבית 4 עד 7 מטר לשנייה בעת המכה בדגם המבחן.

(4) לאחר הפגיעה ממשיכה המטולטלת ועולה עד הגעה לגובה מרבי בו היא נעצרת וחוזרת חזרה לאחור.

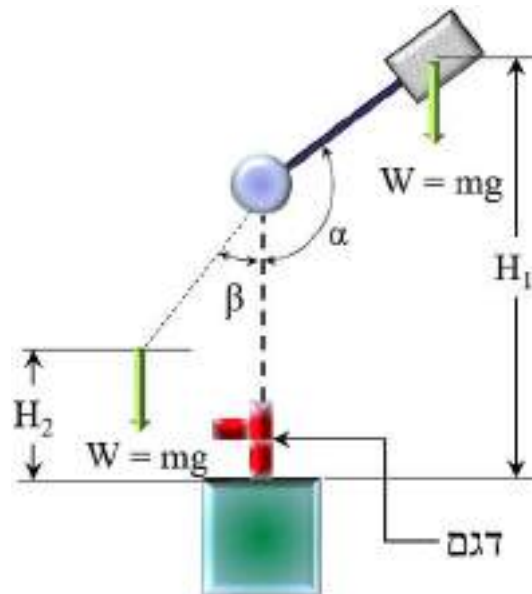
(5) הפרש בין הגובה ההתחלתי לגובה העצירה הסופי מומר לאנרגיה הנקראת "אנרגיית השבר".

מבחן הנגיפה של איזוד (Izod Impact)



- (1) ממקמים בחלק התחתון של המכשיר דגם נבדק במידות $10 \times 10 \times 75$ המונח אנכית ומקובע בתוך מלחציים המורכבים משני לוחות עבים, לוח אחד ניח, לוח השני נייד. החריץ בולט 22 מ"מ מעל המלחציים. הפטיש חובט בדגם בצד של חריץ. מרחק בין הלוח של תופסן עד מיקום המגע בדגם 22 מ"מ.
- (2) משחררים מטולטלת מגובה התחלתי ידוע בו למטולטלת אנרגיה פוטנציאלית התחלתית, ידועה.
- (3) לאחר שחרורה מתחילה המטולטלת לצבור אנרגיה קינטית עד הגעה למהירות מרבית 4 עד 7 מטר לשנייה בעת המכה בדגם המבחן.
- (4) לאחר הפגיעה ממשיכה המטולטלת ועולה עד הגעה לגובה מרבי בו היא נעצרת וחוזרת חזרה לאחור.
- (5) ההפרש בין הגובה ההתחלתי לגובה העצירה הסופי מומר לאנרגיה הנקראת "אנרגיית השבר".

חישוב אנרגיה השבר

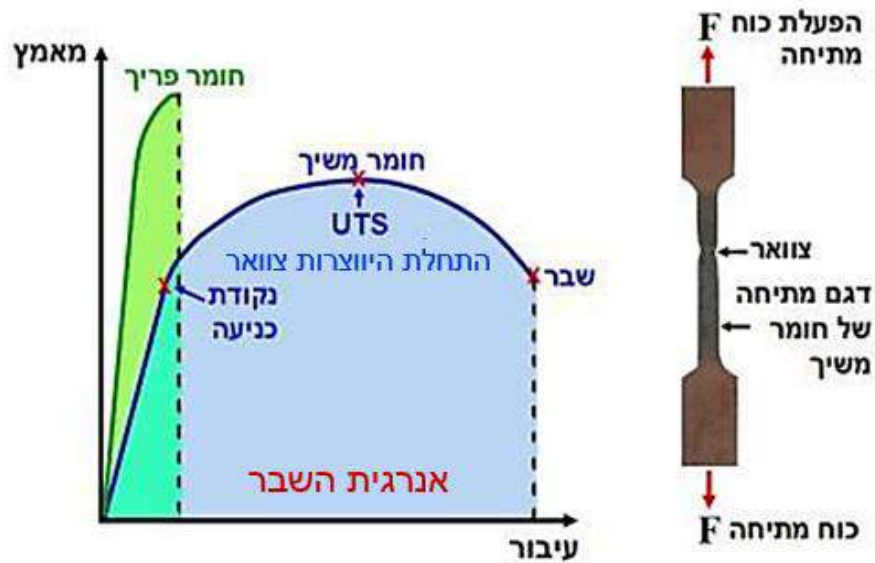


$$E = m \cdot g \cdot (H_1 - H_2)$$

J	אנרגיית נגיפה	E
kg	מסת הפטיש	m
$\frac{m}{sec^2}$	תאוצת הכובד	g
m	גובה התחלתי	H ₁
m	גובה סופי	H ₂

הערה: כל עוד לא צוין אחרת, השתמש בערכה של תאוצת הכובד $g = 10 \frac{m}{sec^2}$

הקשר בין ניסוי מתיחה לנגיפה (בין דיאגרמת משיכה לבין אנרגיית השבירה)



הקשר בין הפרשי הגבהים, האנרגיה לנגיפה וקשיות החומר

סוג החומר	E	ΔH	H ₂	קשיות
משיך	גדול	גדול	קטן	נמוכה
פריך	קטן	קטן	גדול	גבוהה

השפעת הטמפרטורה על החוזק לנגיפה

עליית טמפרטורה = עליית אנרגיית הנגיפה

ירידת טמפרטורה = גורמת לירידת אנרגיית הנגיפה, כלומר בטמפרטורות נמוכות החומר הופך לפריך.



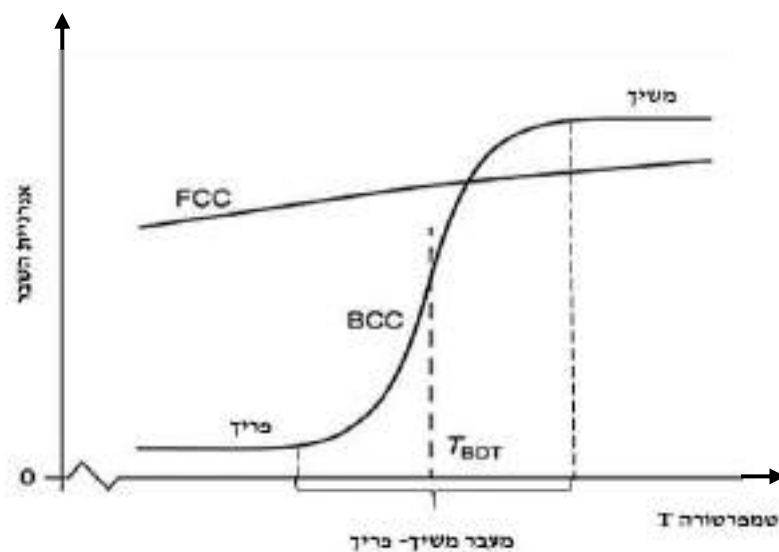
שבר פריך



שבר משיך



שבר משיך שבר פריך



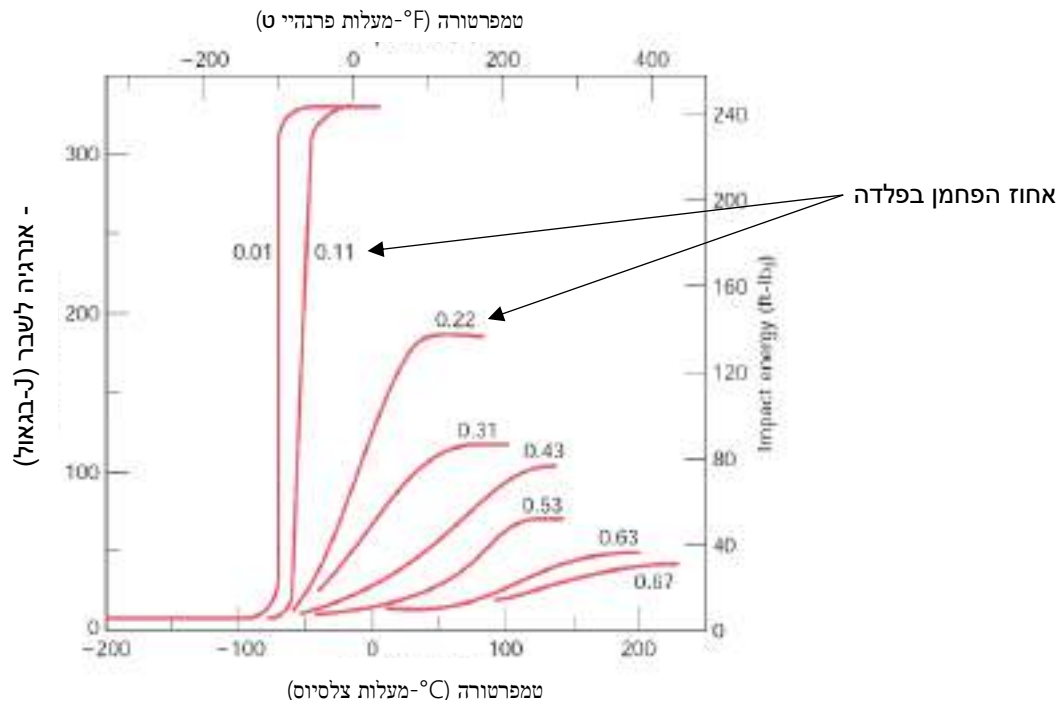
מתכות במבנה BCC – קיימת אי-רציפות (תחום משיך פריך) בשינוי אנרגיית השבר בתחום טמפרטורת המעבר. מעל טמפרטורת המעבר החומר משיך ואנרגיית השבר גבוהה. מתחת לטמפרטורת המעבר החומר פריך ואנרגיית השבר נמוכה מאוד.

מתכות במבנה FCC – אנרגיית השבר משתנה באופן רציף לינארי.

מתכות במבנה HCP – אלו מתכות פריכות, הקריסטלים שלהן יציגו אנרגיה נמוכה לשבר בתחום רחב של טמפרטורות.

השפעת יסודות כימיים בהרכב החומר על החוזק לנגיפה

אחוז הפחמן – מוריד חוזק לנגיפה, מעלה חוזק למתיחה, מגדיל טמפרטורת מעבר משיך-פריך, מהווה מוקד פריכות בפלדות.



חומרים שמורידים חוזק לנגיפה במסגים שונים:

סגסוגות	יסודות
פלדות פחמניות	פחמן, זרחן
פלדות סגסוגת בינוניות	ניקל, כרום, מנגן
פלדות סגסוגת עשירות	זרחן, חנקן, ארסן, אנטימון

חומרים שמעלים חוזק לנגיפה: אלומיניום, נחושת.

השפעת פגמים במבנה מטלגרפי על חוזק נגיפה במבחן הנגיפה

יש לצפות שבחומר פגום תהיה השפעה על מבחן הנגיפה ולכן חשוב להסתכל על מקום השבר ולא רק על תוצאת אנרגיית הנגיפה. חומר בעל בועיות אוויר יספוג אנרגיה וייתן תוצאה של חומר משיך בהיותו חומר פריך.

השפעת גודל הגרעינים במבנה מטלגרפי על חוזק נגיפה

התנגדותה לנגיפה של מתכת בעלת גרעינים גדולים קטנה יותר מהתנגדותה של מתכת בעלת גרעינים עדינים.

השפעת כיוון הסיבים בחומר מעורגל על חוזק נגיפה

דגם שבו סיבי הערגול הם לאורך הציר הראשי, זקוק לאנרגיה רבה יותר לשם היווצרות הסדק, מאשר דגם שבו הסיבים בניצבים לציר זה.

שלושת הסוגים הנפוצים של חריצים בדגם בבדיקת נגיפה

- בבדיקת הנגיפה נמדדת רגישות החומר לחריץ (למאמצים תלת ציריים).
- תפקיד החריץ בדגם לייצר מאמצים תלת ציריים, בכדי שהדגם יישבר באזור החריץ, כך שהחריץ מדמה סדק בחומר.
- ערכה של האנרגיה לשבר תלויה בסוג החריץ בדגם,
- מכיוון שמבחן הנגיפה הוא השוואתי בין הדגמים, כאשר אנו מבצעים מבחן נגיפה חשוב שבכל הדגמים שנשתמש יהיה חריץ זהה כי השימוש בצורות שונות עלול להביא לתוצאות שונות.
- קיימים צורות שונות של חריצים בדגמים במבחן הנגיפה, החריצים היותר מקובלים הם:



חריץ – חור מנעול

חריץ U – לחומרים קשים

חריץ V – לחומרים רכים

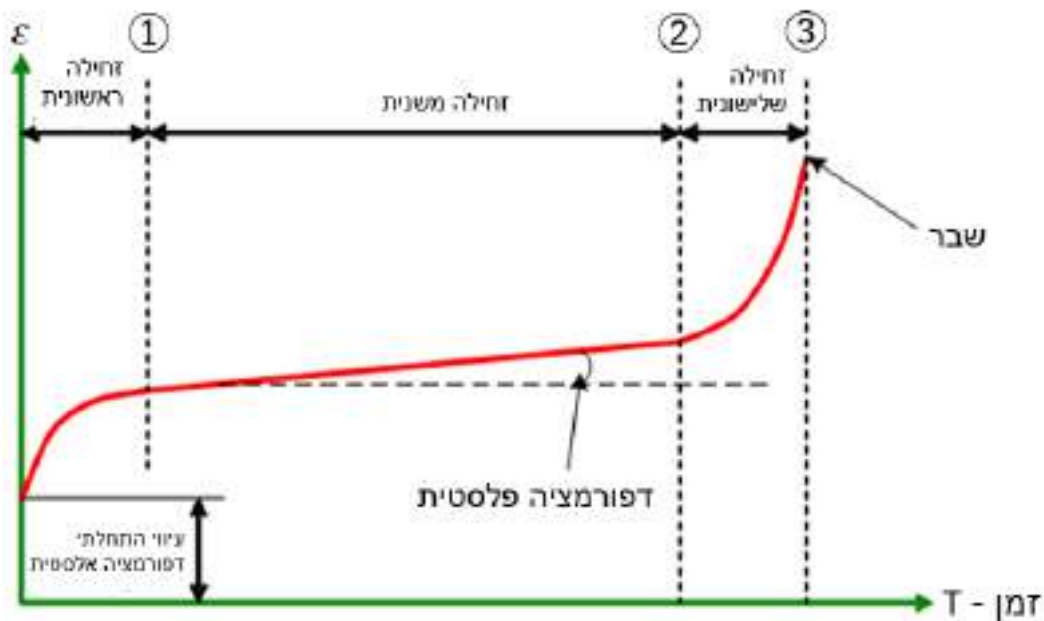
- תוצאות הניסוי תלויות ברדיוס החריץ – ככל שרדיוס החריץ קטן יותר, כך ריכוז המאמצים בחומר גבוה יותר, לכן האנרגיה לשבירת הדגם קטנה יותר.

זחילה

בדיקת התארכות החומר במאמץ קבוע. תופעה זו הינה תופעה תרמו-מכנית בחומרים הנדסיים. זוהי נטייתם של חומרים מוצקים לנוע לאט ולעבור שינוי צורה איטית (זמן ממושך) תחת השפעה של מאמץ חיצוני ושל טמפרטורה.

עקומת זחילה – עקומה המתארת את השינוי באורך (מעוות) כתלות בזמן.

מותחים את הדגם במאמץ קבוע בטמפרטורה גבוה יחסית ורושמים את ההתארכות כתלות בזמן.



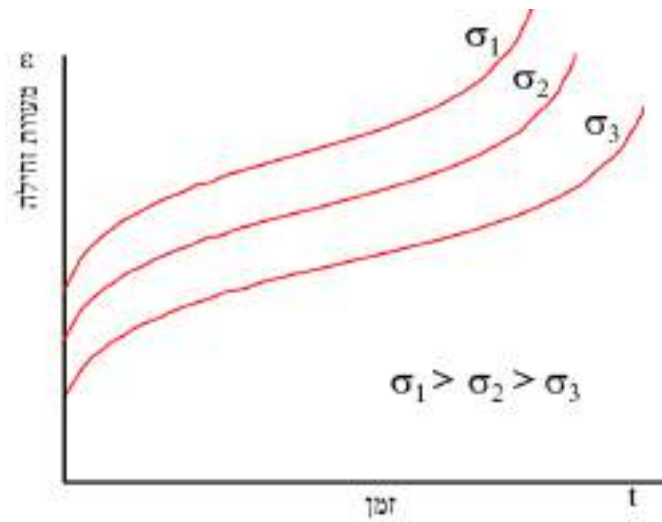
זחילה ראשונית (1 - 2) – מעוות פלסטי ראשוני הגדל במהירות ולבסוף מתייצב בקצב השינוי שלו.

זחילה משנית (2 - 3) – מעוות פלסטי בקצב קבוע.

זחילה שלישונית (3 - 4) – קצב מעוות גבוהה, עלייה חדה בדפורמציה הפלסטית ולבסוף שבירה.

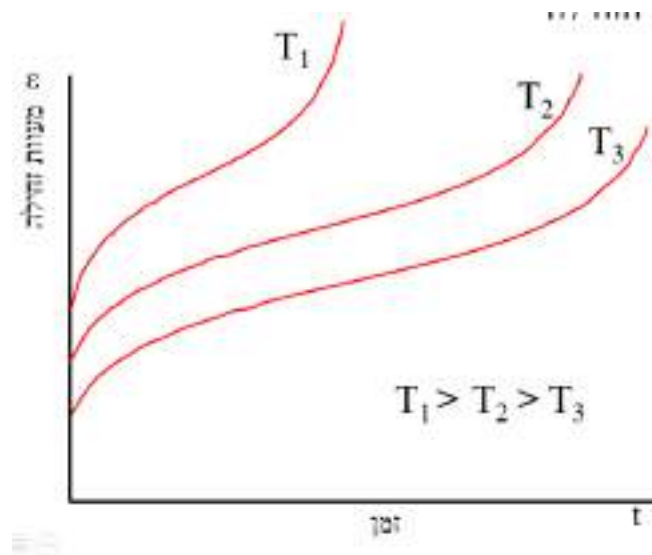
השפעת המאמץ על הזחילה:

במאמץ גדול יותר – זחילה מהירה יותר.

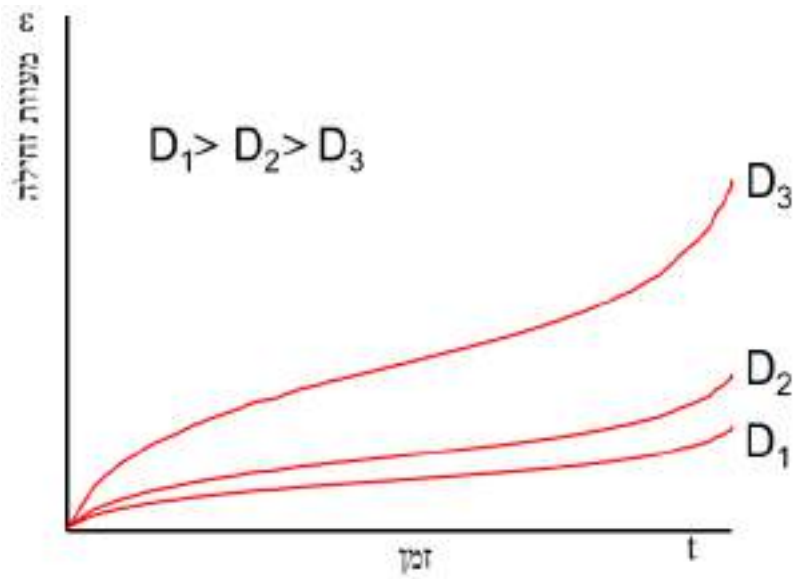


השפעת הטמפרטורה על הזחילה:

בטמפרטורה גדולה יותר – זחילה מהירה יותר

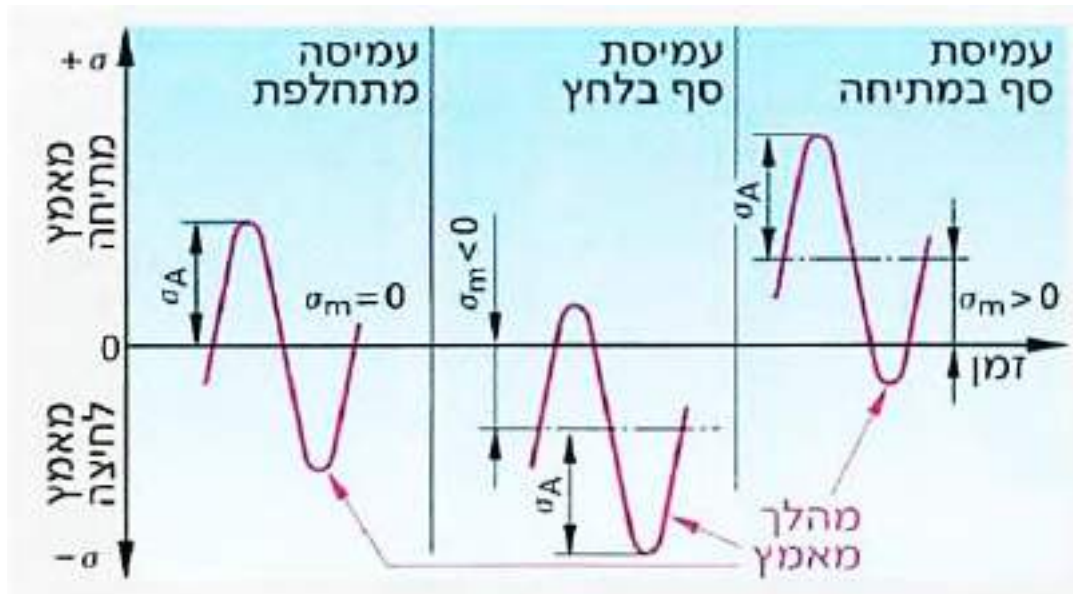


השפעת גודל הגרעינים על הזחילה: גודל הגרעינים קטן יותר - זחילה מהירה יותר



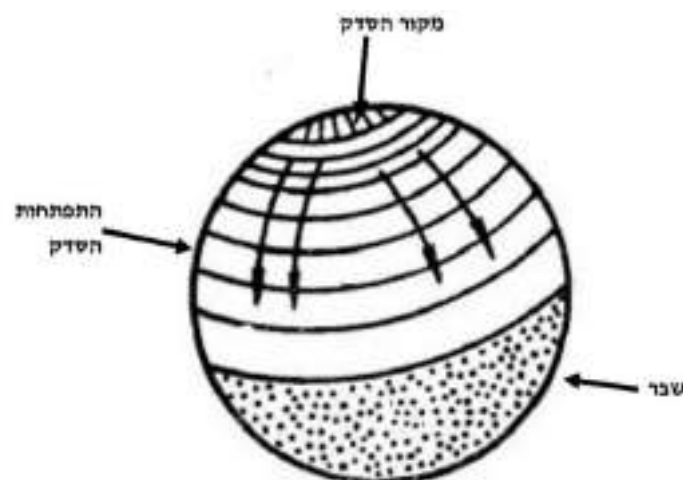
התעייפות החומר

רכיבי מכונות חשופים לעומסים חוזרים ונשנים לפרקי זמן ארוכים. תופעה זו חלה במיוחד על ברגים, צירים וגלים העלולים להישבר, כאשר העומס המופעל עליהם קטן בהרבה מחוזק המתיחה של החומר. חוזק החומר להתעייפות נבדק בניסוי דינמי בו מועמס דגם בעומס מתיחה-לחיצה מתחלף מהיר.

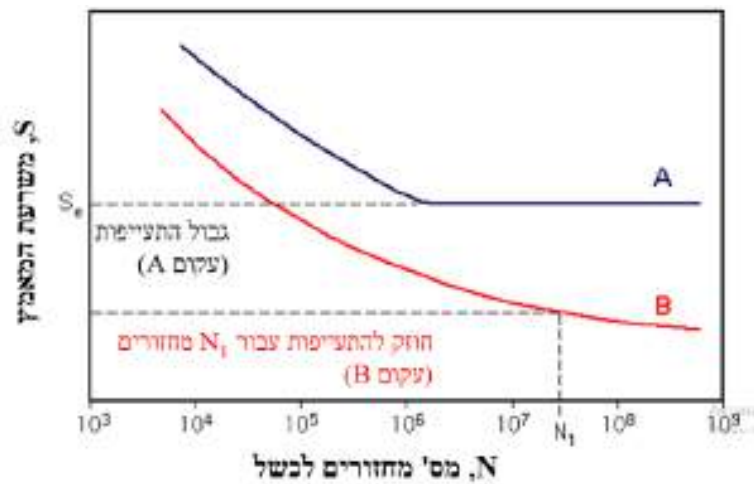


ניסוי התעייפות דינמי בודד נמשך עד שבירת הדגם או עד השלמת 10^7 מחזורי שינוי עומס. בזמן השבר נמדד מספר מחזורי התנודות N שעבר מחילת הניסוי.

תרשים עקרוני של שבר התעייפות



עקום S-N - מתאר את אורך החיים של חלק במספר מחזורים עד לשבר (N), כתלות במשרעת (אמפליטודה) המאמץ (S , [MPa]).



גבול התעיפות – המאמץ המינימלי הגורם להתעיפות החומר.

כללים למניעת התעיפות החומר:

- הקפדה על מרקם המשטח של חלקי מכוונות העובדים במאמץ משתנה. טיב פני שטח המומלץ הוא N6 וחלק יותר.
- הימנעות מפינות חדות
- סגסוג עם חומרים המעלים את העמידות בהתעיפות.
- הימנעות מקורוזיה גימום
- תכנון נכון, כך שהמאמצים המתפתחים יהיו נמוכים מגבול ההתעיפות.

17. פלדות

סגסוגת המורכבת **ממס** עיקרי ברזל ו**ממומס** עיקרי פחמן בתוספת חומרים מסס נוספים כמו מנגן, ניקל, צורן ועוד.

ברזל – יסוד כימי שמספרו האטומי 26, בעל טמפרטורת התכה 1537°C . זו המתכת השכיחה ביותר בתעשייה ובחיי היום יום. על מנת להפיק את הברזל יש להתיר את עפרות הברזל בתנור רם במטרה להפרידן מהחומרים הנלווים. התוצר המתקבל ברזל טהור הינו חומר 'רך' ⁸ יחסית. על מנת שנוכל לעשות שימוש בברזל טהור לצרכי התעשייה עלינו לשפר את תכונותיו המכניות בתהליך טכנולוגי הנקרא **סגסוג** בו מוסיפים לברזל פחמן ומספר חומרים נוספים בריכוזים קטנים המקנים שיפור בתכונות מכניות וטכנולוגיות שונות.

פחמן – יסוד כימי שמספרו האטומי 6 בעל טמפרטורת התכה 4827°C , בעל שתי צורות גבישיות גרפיט (חומר שחור ורך); פחם שחור; יהלום (פחמן כמעט טהור).

אחוז הפחמן בפלדה משפיע בצורה מהותית על תכונותיה המכניות והטכנולוגיות:

- ✧ **קשיות** ⁹ – **עולה** ככל שאחוז הפחמן גדל. הדבר חשוב במיוחד בייצור כלי שיבוב (אזמלים, שופינים, מקדחים, מקדדים), מוצרים אלה צריכים להיות קשים כדי שיוכלו לחדור ולחתוך בחומר אחר.
- ✧ **צפיפות** ¹⁰ – **יורדת** עם הגדלת אחוז הפחמן. פלדה בעלת אחוז פחמן נמוך עמידה במכות וזעזועים ואינה נהרסת (סדן צריך לעמוד במכות פטיש מבלי לההרס ולכן הוא יהיה עשוי מפלדה בעלת אחוז פחמן נמוך).
- ✧ **אלסטיות** (גמישות) ¹¹ – **עולה** ככל שאחוז הפחמן גדל. לייצור קפיצים משתמשים בפלדת כליים עשירת פחמן בעלת תוספים נוספים הנקראות פלדות מסג.
- ✧ **פלסטיות** ¹² – **יורדת** עם הגדלת אחוז הפחמן. דודים, פרופילים ועוד המעובדים לצורתם בכיפוף או בערגול נבחר ליצורם מפלדת מבנים המכילה מעט פחמן.

⁸ חומר המתעוות בקלות תחת הפעלה כוח חיצוני.

⁹ כושר פני החומר להתנגד לחדירת גוף אחר לתוכו.

¹⁰ כושר החומר לעמוד בפני כוחות דינמיים, הים וזעזועים בלי לההרס.

¹¹ כושר החומר לשנות את צורתו בהשפעת כוחות חיצוניים במשך זמן קצר, ולשוב לצורתו המקורית לאחר שהכוח פסק.

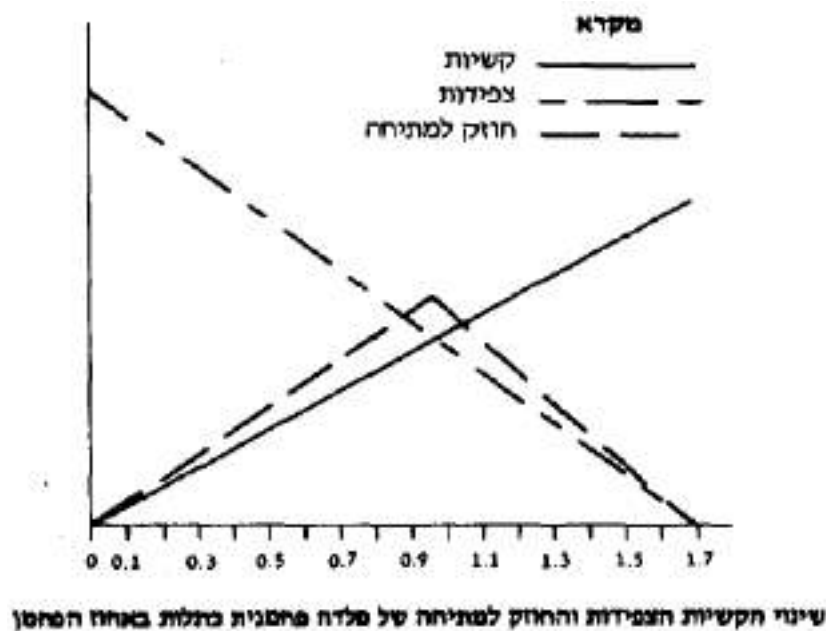
¹² כושר החומר לשנות את צורתו בהשפעת כוחות חיצוניים, ולשמור על השינוי בצורה קבועה גם לאחר הפסקת פעולת הכוח החיצוני.

✧ **חוזק**¹³ – **עולה** ככל שאחוז הפחמן גדל. הפלדה הפחמנית חזקה במיוחד כאשר היא מכילה 1% פחמן בקירוב והיא משמשת לייצור שרשראות, כבלים ועוד הנושאים עומס רב.

✧ **חשילות**¹⁴ – **יורדת** עם הגדלת אחוז הפחמן. פלדה המכילה הרבה פחמן היא קשה ופריכה ואינה ניתנת לחישול. פלדת המבנים – המכילה מעט פחמן – היא צפידה ופלסטית: לכן ניתן לחשל אותם בחום ובקור והיא אינה נהרסת.

✧ **שביבות** – **יורדת** עם הגדלת אחוז הפחמן. פלדה פחמנית המכילה אחוז נמוך של פחמן ניתנת לשיבוב בקלות, בעוד שפלדות במכילות אחוז פחמן גבוה אינן נוחות לשיבוב.

✧ **רתיכות**¹⁵ – **יורדת** עם הגדלת אחוז הפחמן. פלדה פחמנית המכילה אחוז נמוך של פחמן ניתנת לשיבוב בקלות.



¹³ כושר החומר להתנגד לפעולת כוחות חיצוניים.

¹⁴ כושר החומר לשינוי צורה בהקשה או בכוחות לחיצה הפועלים על המתכת (לרוב במצב חם)

¹⁵ כושר החומר להתחבר עם חלק מתכתי אחר בהיתוך מקום החיבור והוספת חומר מתכתי נוסף

סוגי פלדות

פלדות פחמניות

סגסוגת ברזל פחמן שחומר הסגסוג העיקרי הוא פחמן ומאט מאוד חומרי סגסוג נוספים.

1. פלדות דלות פחמן (Low Carbon Steels) – מכילות 0.09% עד 0.3% פחמן.

תכונות מכניות: צפידות גבוהה, חוזק נמוך, ניתנת לעיצוב בקור ובחום, נוחה לריתוך, אינן ניתנות לחיסום. דוגמאות שימוש: מסמרות ברגים, פרופילים, חלקי מכוניות שונים ועוד.

2. פלדות בינוניות פחמן (Medium Carbon Steels) – מכילות 0.3% עד 0.6% פחמן.

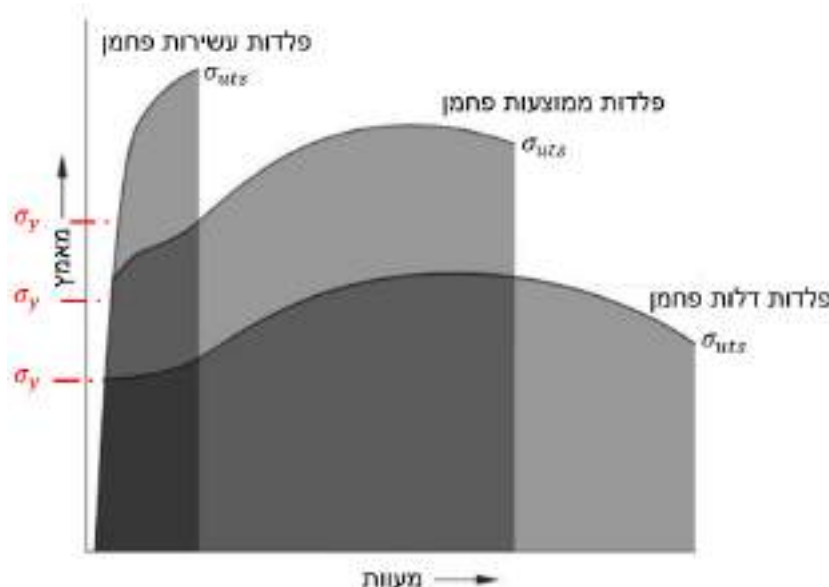
תכונות מכניות: קשיות גבוהה, צפידות נמוכה, חוזק גבוה, ניתנות לחיסום, לא ניתנות לעיצוב בקור. דוגמאות שימוש: כבלים ורתמות, כלי עבודה ידניים (מברג), צנרת הידראולית, גלים, גלגלי שיניים ועוד.

3. פלדות עשירות פחמן (High Carbon Steels) – מכילות מעל 0.6% פחמן.

תכונות מכניות: קשיות גבוהה, עמידות בשחיקה, פריכות, חוזק גבוה, ניתנות לחיסום, לא ניתנות לעיצוב בקור.

דוגמאות שימוש: כלי שיבוב, קפיצים, מסבים, כלים רפואיים ועוד.

השוואה בין גרף מאמץ מעוות (ממבחן המתיחה) של פלדות שונות:



יש לשים לב שקשיחות החומר זהה בכולם (מודול האלסטיות) השיפוע של כולם זהה !

פלדות מסג (Alloy steel)

פלדות אלה מלבד הפחמן מכילות יסודות סגסוג נוספים.

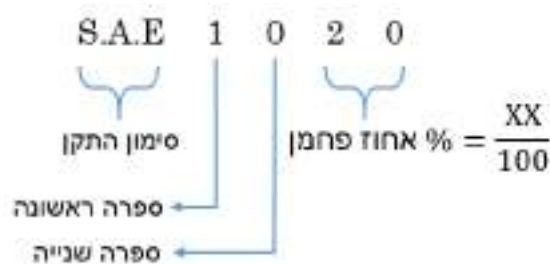
דוגמאות לשימוש	השפעה על תכונות המסג		סמל	שם התוספת
	מוריד	מעלה		
סכס דרוזים, שסתומים למנועי שריפה פנימית, כפות לטורבינות גז, פולרים לצורכים שונים	כנסר לקיטוב פלסטי, כוסר לעיבוד שבבי	חוזק, קשיחות, עמידות בפני קורוזיה, עמידות בפני שחיקה, עמידות בפני קרידזיה, עמידות בפני חומצות, עמידות בפני חמצון בטמפרטורות גבוהות	Cr	כרום
גלילי שרירים, שסתומים למנועי שריפה פנימית, כפות לטורבינות גז, פולרים לצורכים שונים, סגסוגת "אינבר" המסמיקת בהתפשטות חומצית אפסית בחום, מגנטים קבועים	מגנטיות	חוזק, אלסטיות, עמידות בפני קורוזיה, עמידות בפני חמצון בטמפרטורות גבוהות	Ni	ניקל
קפיצים		אלסטיות	Si	צורן
פטי רכבת, שרשראות לסרקמארים	כנסר לעיבוד פלסטי, כוסר לעיבוד שבבי	קשיחות, עמידות בפני שחיקה	Mn	מנגן
מברגים, מפתחות לברגים, נש, נחיריות, מסמרים, פלדות מהדירות, חיתוך ללחץ שיכוב, מכללים לחיטוי בחום	אלסטיות	קשיחות, התמדות לפיזור, עמידות בפני חום, עמידות בפני חמצון	Mo	מוליבדן
תוספת לפלדות מהדירות - פלדות חיתוך, מכללים וטובות לזימאל בחום, נפות בטורבינות, לא מאבד קשיחות וחוזק בטמפרטורות גבוהות, מלססית מאוד		עמידות בחום, עמידות בפני חמצון, עמידות בפני חומצות, עמידות בפני קרידזיה, עמידות בפני חומצות, עמידות בפני חומצות	W	וולפרם טונגסטן
תוספת לפלדות קפיצים, פלדות לנחיר, מפתחות לברגים		חוזק, אלסטיות, התמדות לפיזור, עמידות בפני חומצות, עמידות בפני חומצות	V	וריום
תוספת לפלדות מהדירות, חיתוך, מכללים, חיתוך, כרסומים, מגנטים קבועים	כנסר לעיבוד שבבי	קשיחות, מגנטיות	Co	קובלט
תוספת לפלדות קפיצים		קשיחות, אלסטיות, עמידות בפני עייפות	Be	בריליום

תקני פלדות

תקן (SAE) AISI

Society Automotive Engineers

American Iron & Steel Institute



ספרה ראשונה משמאל מייצגת את הסגסוגת

- | | |
|---|-------------------------|
| 1 | פלדה פחמנית |
| 2 | פלדת ניקל |
| 3 | פלדת כרום ניקל |
| 4 | פלדת מוליבדן |
| 5 | פלדת כרום |
| 6 | פלדת כרום ונדיום |
| 7 | פלדת וולפרם |
| 8 | פלדת ניקל כרום ומוליבדן |
| 9 | פלדת צורן או צורן ומנגן |

ספרה שנייה משמאל מייצגת את אחוז הסגסוגת העיקרית

שתי הספרות האחרונות מייצגות את אחוז הפחמן חלקי 100

לאחר הספרות באות אותיות המציינות את סוג הטיפול התרמי או עיבוד קר שהפלדה עברה.

- | | |
|----|-------------|
| CD | משוך בקור |
| CR | מעורגל בקור |
| HR | מעורגל בחום |
| F | מחושל |
| HT | מחוסם |
| S | מרוכך |

פלדות לשימוש כללי לפי תקן SAE

[illegible]

[illegible]

תקן גרמני – DIN

פלדות דלות מסג מסומנות בשלושה סימונים צמודים:



P, S, N, C	V, Ti, Mo, Cu, AL	W, Ni, Mn, Co, Cr	יסוד
100	10	4	גורם חלוקה

דוגמאות:

$$37\text{Mn}5 - \text{פלדה המכילה } 1.25\% \text{ מנגן (Mn)} = \frac{5}{4} + \frac{37}{100} = 0.37\%$$

$$50\text{V}10 - \text{פלדה המכילה } 1\% \text{ וולפרם (V)} = \frac{10}{10} + \frac{50}{100} = 0.5\%$$

$$50\text{Cr}4 - \text{פלדה המכילה } 1\% \text{ כרום (Cr)} = \frac{4}{4} + \frac{50}{100} = 0.5\%$$

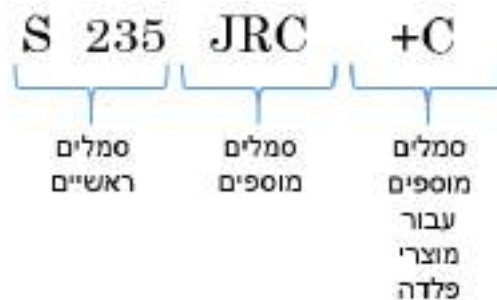
$$13\text{Cr}4\text{Mo}2 - \text{פלדה המכילה } 0.2\% \text{ מוליבדן (Mo)} = \frac{2}{10} + \frac{4}{4} + \frac{13}{100} = 0.13\%$$

פלדות עשירות מסג מסומנות באות X לפני הסימון. לאחר הסימון באים אחוזי הפחמן, סימוני יסודות המסוג והספרות המציינות את אחוזי המסוג.

$$\text{X } 10 \text{ Cr Ni } 18.8 - \text{פלדה המכילה } 8\% \text{ ניקל (Ni)} + 18\% \text{ כרום (Cr)} + \frac{10}{100} = 0.1\%$$

תקן DIN EN 10027

שיטת מערכת סימון פלדות באירופה נקבעת על-ידי תקני DIN EN 10027. השמות מורכבים מסמלים ראשיים המורכבים מאותיות המסמנות את מטרת השימוש, מספר או אות ומספר נוספים מסמנים תכונות מכניות או פיזיקליות.



סמלים ראשיים עבור שמות קצרים של פלדות על-פי מטרת השימוש

שימוש	סמלים ראשיים	שימוש	סמלים ראשיים
פלדות לחיזוק בטון	B 16 500	פלדה לבניית דודי קיטור	P 265
מוצרים שטוחים לעיצוב קר	D X52 17	פלדות עבור מסילות ברזל	R 18 260
פלדות לבניית מכונות	E 360	פלדות עבור מבני פלדה	S 235
מוצרים שטוחים מפלדות בחוזק גבוה יותר	H C400	סרטי ופחי אריזה	T S550
פלדות עבור צינורות	L 360	פלדות מתיחה	Y 1770 19

¹⁶ גבול כניעה עבור המוצר הכי קטן

¹⁷ מצב ערגול C, D, X ושני סמלים בהקשר לגבול כניעה מינימלי

¹⁸ קשיות מינימלית לפי ברינל HBW

¹⁹ ערך נומינלי עבור חוזק מתיחה מינימלי

סמלים מוספים עבור שמות קצרים של פלדות למבני פלדה

קבוצה 2		קבוצה 1						
				טמפרטורת בדיקה [°C]	עבודת נגיפה [J]			
טוב מאוד לעיצוב קר	C	ניתן לחיסום זיקון	A		60J	40J	27J	
טבילה בציפויים מותכים	D	מעורגל תרמו-מכנית	M	+20	LR	KR	JR	
עבור טמפרטורת נמוכות	L	עבר ריפוי נרמול או ערגול נרמול	N	0	LO	KO	JO	
עבור צינורות	T	עבר השבחה	Q					
עמיד במזג אוויר	W	מאפיינים אחרים, חלקית עם ספרה 1 או 2 ספרות	G					

דוגמה

S 235 JRC

סמלים ראשיים		סמלים מוספים			
פלדות עבור מבנים	S	קבוצה 1		קבוצה 2	
גבול מתיחה מינימלי	235	20°C-ב-27J	J2	כוח עיצוב קר במיוחד	C

יציקת ברזל

יציקה מתקבלת מהיתוך הברזל. היא אינה אלסטית ואינה חשילה אך עומדת יפה בכוחות לחיצה.

ככל שהיציקה נוזלית יותר, כך כושר היציקה שלה גבוה יותר.

ההבדל בין פלדה ליציקת ברזל הוא אחוז הפחמן.

פלדה – סגסוגת ברזל-פחמן (עד 2% פחמן)

יציקת ברזל – סגסוגת ברזל פחמן (המכילה 2-4.3% פחמן)

יציקת ברזל אפורה – יציקה זו נקראת לפי צבע השבר, מצטיינת בכושר יציקה

מעולה ונפוצה ביותר בתעשייה. הפחמן הנמצא בה נראה בצורת פסים שחורים (גרפיט).

ככל שפתיית הגרפיט קטנים יותר תכונות היציקת טובות יותר.

בתנאי חיכוך מצטיינת יציקת הברזל האפורה בשימון עצמי עקב הגרפיט

ליציקת אפורה חוזק למשיכה נמוך לעומת חוזק לחיצה וקשיות גבוהים.

יציקת ברזל לבנה – יציקה זו נקראת לפי צבע השבר, הפחמן הנמצא בה

נראה בצורת צמנטיט ולכן היא מאוד שבירה. משתמשים בה לייצור פלדות

ולקבלת יציקת ברזל חשילה.

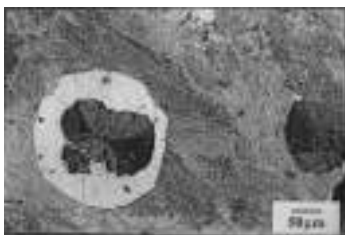
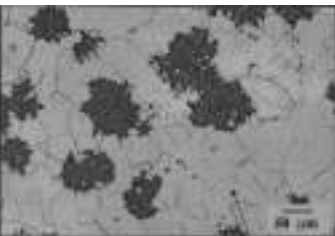
יציקת ברזל חשילה – מצטיינת בגמישות וחוזק משופרים, ניתנת אך לא נוחה

לחישול. הפחמן הנמצא בה נראה בצורה גרפיט (כתמים). מקבלים אותה

מיציקת ברזל לבנה דרך טיפול תרמי מיוחד הנקרא ריפוי.

יציקת ברזל כדורית – מצטיינת בחוזק משופר ומתקבלת מיציקת ברזל לבנה דרך הוספת חומרים כימיים

מסוימים תוך תהליך הפקת הסגסוגת. הפחמן הנמצא בה בצורת גרפיט (כדורים).



פלדות בלתי מחלידות (פלב"מ)

אינן פלדות במובן הקלאסי של סגסוגת ברזל-פחמן, מכיוון שהן מכילות מעט פחמן, ולמעשה הפחמן מהווה בהן זיהום. העמידות המוגברת כנגד קורוזיה מתקבלת ע"י סגסוג ביסודות נוספים, במיוחד כרום, ניקל ומנגן.

כרום – יסוד המסג החשוב ביותר על מנת לקבל עמידות טובה כנגד קורוזיה יש להוסיף לפחות 12% כרום.

הכרום יוצר שכבת תחמוצת הדוקה ורציפה על פני שטח החומר המונעת חדירת חמצן אל תוכו, ובכך מגנה על החומר.

ניקל – יסוד מסג חשוב נוסף הוא. הניקל מחזק את הסגסוגת.

כאשר מוסיפים לברזל מעל 8% ניקל מבנה הסריג שלו נשמר כ- FCC (אוסטניט) גם בטמפרטורת החדר, לפלדות כאלה יש חוזק ועמידות טובה כנגד קורוזיה גם בטמפרטורות גבוהות.

נהוג לסווג את הפלדות הבלתי מחלידות לפי מבנה הגביש שלהם:

פלב"מ אוסטניטי עם תא יחידה FCC – מכילה 15-20% כרום, ו-5-15% ניקל, שמגביר התנגדות לקורוזיה. פלדות אילו אינן מגנטיות, בעלות תכונות טכנולוגיות גבוהות (כושר עיבוד פלסטי, כושר שיבוב וכושר ריתוך). פלדות אוסטניות הכי נפוצות בתעשייה לייצור חלקי מכונות שונות.

פלב"מ מרטינזיטי עם תא יחידה מרטינזיטי – מכילה כ- 14% כרום, 0.1-0.4% פחמן, יכולות להיות מגנטיות. הודות לכושר החיסום הפלדות האלה חזקות יותר, אבל פלסטיטיות שלהם נמוכה יחסית לפלב"מ אחר. גם חשופות יותר מפני קורוזיה, בגלל נוכחות הפחמן. דוגמאות שימוש: כלים שונים, שיני דלי מחפר.

פלב"מ פריטי עם תא יחידה BCC – מכילה מעל 16% כרום – הרבה יותר רכות מפלדות מרטינזיטיות וגם מפלדות אוסטניטיות. אבל עמידות יותר לקורוזיה, כולל העמידות בסביבות תוקפניות (חומצות). משתמשים בפלב"מ פריטי בתעשיית מזון, תעשיית כימית וכו'.

פלדות אל חלד דופלקס (Duplex Stainless Steels) – פלדות אל חלד בעלות מיקרו מבנה מעורב של אוסטניט ופריט. לרוב המטרה היא לייצר תערובת של 50/50, אם כי בסגסוגות מסחריות היחס עשוי להיות 40/60. לפלדות אל חלד דופלקס יש חוזק כפול בערך בהשוואה לפלדות אל חלד אוסטניטיות וגם שיפור התנגדות לקורוזיה מקומית, במיוחד לקורוזיה גימון, קורוזיה נקיקים וקורוזיה מאמצים. פלב"מ דופלקס מאופיינות בכרום גבוה (19-32%) ומוליבדן (עד 5%) ותוכן ניקל נמוך יותר מבפלדות אל - חלד אוסטניטיות.

דיאגרמת פאזות – ברזל פחמן

הברזל הטהור הוא חומר רך. כדי שיהיה לו שימוש מסחרי עלינו להקשותו במיסוג עם פחמן. החומר החדש המתקבל נקרא פלדה. כדי לדעת את התנהגות הפלדה בטמפרטורות גבוהות כתלות באחוז הפחמן נבנה דיאגרמת ברזל-פחמן, זו מפה המסייעת לנו בטיפולים התרמיים בפלדות פחמניות.

הגדרות

פאזה – רכיב הומוגני המתאפיין בתכונות כימיות ופיסיקליות. לחומר במצב מוצק יכולות להיות מספר פאזות שונות בהתאם לטמפרטורה לחץ והרכב כימי.

דיאגרמת פאזות – דיאגרמה המתארת את מבנה החומר כתלות בריכוז היסודות השונים במערכת, וכתלות בטמפרטורה ולחץ. דיאגרמת פאזות זו מתארת את מצבה המיקרוסקופי של מערכת מבחינת המבנה בתנאים של שיווי-משקל תרמודינמי, כלומר מבחינה טכנית הדבר אפשרי רק כאשר מדובר בתהליכים איטיים מאוד. לכן דיאגרמת פאזות שיווי-משקלית מתארת תהליכים הפיכים.

תמיסה מוצקה – תערובת הומוגנית בין מומס וממס הנמצאים בפאזה מוצקה

מבנים כדאגרמה

פְּרִיט (מבנה אוטקטואידי)

תמיסה מוצקה של ברזל פחמן בעלת גרעינים מעוגלים בצבע אחיד, במבנה B.C.C, יציבה עד 910°C , כושר המסה עד 0.022% פחמן.



אוסְטֵיט

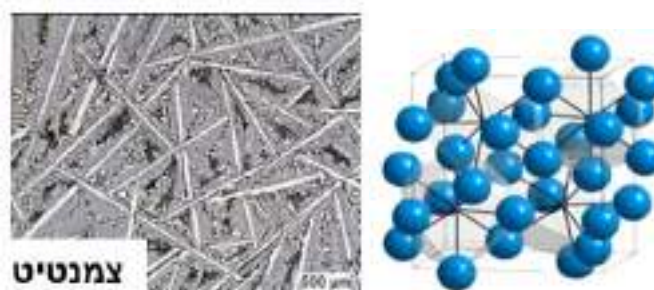
תמיסה מוצקה של ברזל ופחמן הנוצרת בטמפרטורה בין 910°C ל- 1395°C , בעלת גרעינים חדי פינות, כושר המסה עד 2.11% פחמן.



אוסטניט

צְמֶנְטִיט

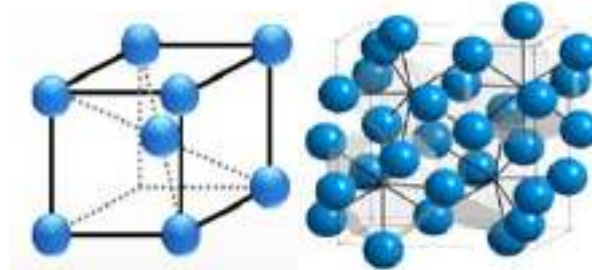
תמיסה מוצקה של ברזל פחמן, כושר המסה עד 6.67% פחמן, בעל סריג גבישי מורכב, קשיות ניכרת ופריכות.



צמנטיט

פְּרָלִיט

מבנה שכבתי הבנוי שכבות פריט וצמנטיט המכיל 0.78% פחמן בדיוק.



תכונות הפרליט תלויות במידה ניכרת ברמת העדינות של התערובת.

ככל שרמת העדינות גבוהה כך הקשיות והחוזק עולים.



לדבוריט

פרליט

ביניט

לדבוריט – מבנה אוטקטי של אוסטניט וצמנטיט המכיל 4.3% הנוצר בטמפרטורה 1147°C .

מֶרְטֶנְסִיט

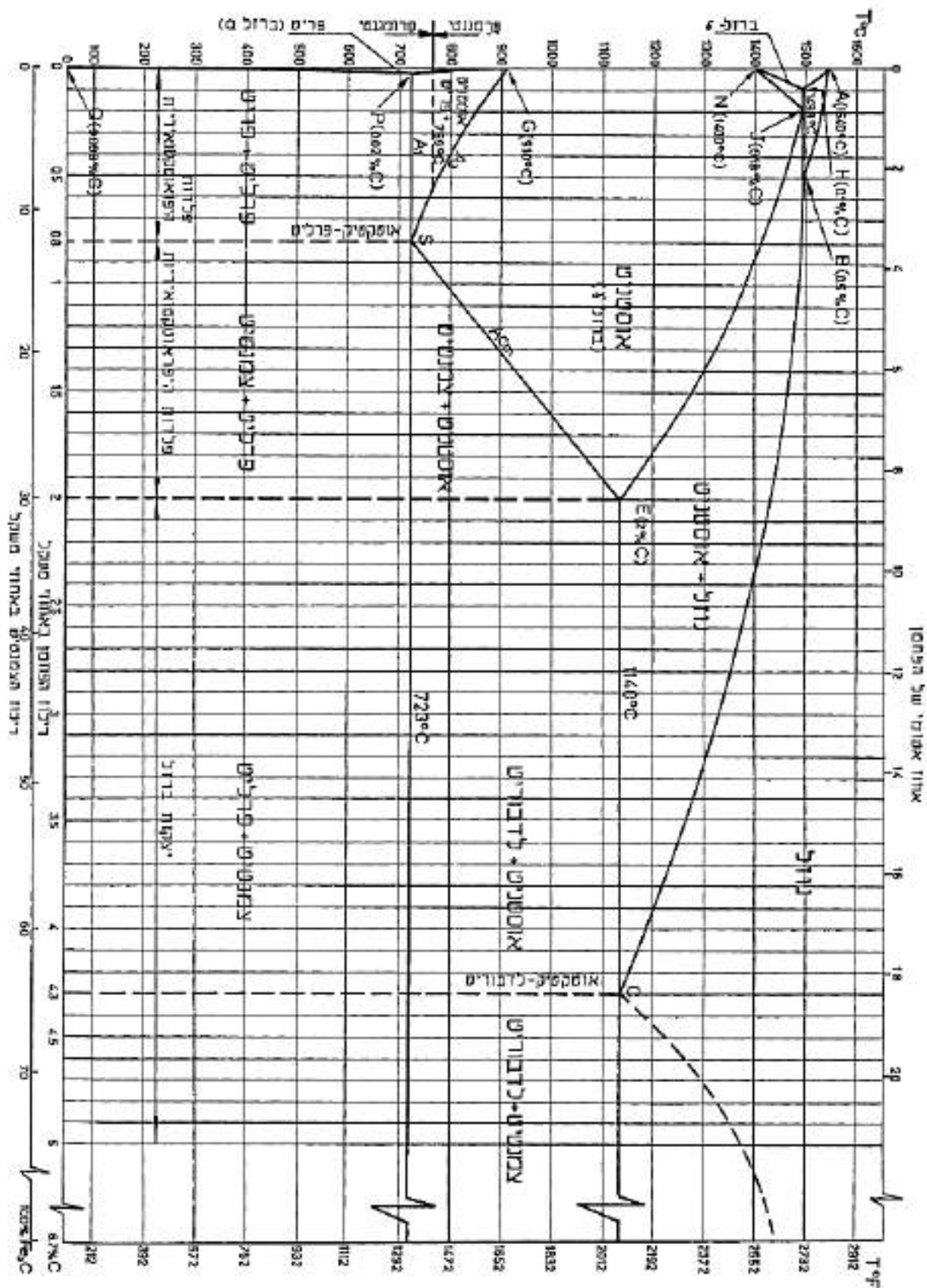
מבנה המתקבל עקב קירור מהיר. זהו מצב לא יציב – תמיסה מוצקה גדושה בפחמן. קשה וחזקה אך באותה

מידה גם פריכה ושבירה פחות יציבה הדורשת הרפיה.



מרטנסיט





קו ליקוידוס – מעל הקו כל הסגסוגות בכל הטמפרטורות נמצאות במצב נוזלי.

קו סולידוס – מתחת לקו כל הסגסוגות בכל הטמפרטורות נמצאות במצב מוצק.

אוסקטואיד – תערובת עדינה מוצקה שנוצרת תוך כדי קירור מתמיסה מוצקה

אוסקטיקה – תערובת עדינה מוצקה שנוצרת תוך כדי תהליך הקירור מתמיסה נוזלית

פלדה אוסקטואידית – פלדה בעלת 0.8% פחמן

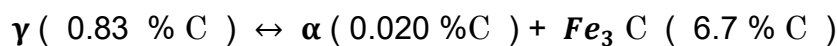
פלדה תת אוסקטואידית – פלדה המכילה פחות מ- 0.8% פחמן

פלדה על אוסקטואידית – פלדה המכילה מעל 0.8% פחמן

סגסוגת אוסקטיד – תערובת שנוצרת מתמיסה מוצקה, בעלת טמפרטורה הנמוכה ביותר בדיאגרמה (נקודת

אוסקטיקה). לסגסוגת אוסקטית חסרה פאזה נוזל פלוס גביש, כלומר הקו האוסקטואידי מתאים לטמפרטורה של

723 °C (מגבול המסיסות ב- 0.02% C).

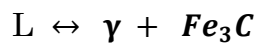


ריאקציה אוסקטית – מעבר מפאזה יחידה נוזלית (היתך) לשתי פאזות מוצקות (אוסטניט וצמנטיט):

מתרחשת בטמפרטורה של 1130 °C, בריכוז 4.30% C.

הקו האויטקטי: מתאים לטמפרטורה של 1130 °C.

(הקו האויטקטי מתחיל בגבול המסיסות המקסימלי של הפחמן באוסטניט: 2.14% C).



המרכיבים של הסגסוגת מתמצקים בו זמנית.

ריאקציה אוסקטואידית – מעבר מפאזה יחידה מוצקה (אוסטניט) לשתי פאזות מוצקות (פריט + צמנטיט). מתרחשת

בטמפ' של 723 °C, בריכוז של 0.83% C.

ריאקציה פריטקטית – מעבר משתי פאזות (נוזל + פריט - δ) לפאזה מוצקה יחידה (אוסטניט).

מתרחשת בטמפרטורה של 1498 °C.

הקו הפריטקטי מתאים לטמפרטורה של 1498 °C

נקודה פריטקטית מתרחשת בטמפרטורה של 1498 °C, בריכוז של 0.16 % C

התגבשות ראשונית פירושה מעבר המתכת ממצב צבירה נוזלי למוצק.

התגבשות משנית – (אלטרופיה) כתלות בגורמים מסוימים (ביחוד בטמפרטורה ולחץ) יכולות מתכות להתגבש בצורות שונות (ליצור יותר מצורה גבישית אחת). תופעה זו נקראת אלטרופיה (ביונית-אלטרופ- "בצורה שונה").

פלדה/ברזל משנה את המבנה הגבישי שלו לאור טמפ' לדוגמא ממבנה B. C. C למבנה F.C.C מאפיינים של קווים בדיאגרמת שיווי משקל של ברזל-פחמן.

קו	שם הקו	טווח טמפרטורות °C בדיאגרמה	טווח ריכוז הפחמן ב-%	תכונה העיקרית של הקו
AC	ליקוודוס	1147°-1539°	4.3-0	קו ליקוודוס (התחלה התמצקות אוסטיט)
CD	ליקוודוס	1600° - 1147°	6.67-4.3	קו ליקוודוס (התחלה התמצקות צמנטיט ראשוני).
AE	סולידוס	1539° - 1147°	2-0	סיום התמצקות אוסטיט
ECF	סולידוס	1147°	6.67-2	קו שיווי משקל בתגובה אוטקטי
SE	קווי הפרדה בין המבנים במצב מוצק.	1147° – 723°	2.14-0.8	קו מסיסות מוגבלת של פחמן באוסטיט. התחלה הפרשת של צמנטיט משני.
GS	קווי הפרדה בין המבנים במצב מוצק.	910°-723°	0-0.8	התחלה מעבר אלטרופית האוסטיט לפריט
GP	קווי הפרדה בין המבנים במצב מוצק.	723° – 910°	0-0.025	סיום מעבר אלטרופית האוסטיט לפריט
PSK	קווי הפרדה בין המבנים במצב מוצק.	723°	0.025-6.67	קו שיווי משקל בתגובה אוטקטואידית (נקודת קריטית התחלונה) של אוסטיט, פריט, צמנטיט = מעבר האוסטיט לפרליט
PQ	קווי הפרדה בין המבנים במצב מוצק.	20° – 723°	0.006-0.025	קו הפרשה של צמנטיט שלישוני.
B-H	קו הפרדה בין אזור דו-פאזי של תמיסה נוזלית + פריט-δ לבין מבנה אוסטיט.	1498°	0.51 -0.1	קו פריטקטי.

דיאגרמת ברזל-פחמן: בנקודות האופייניות

נקודות	ריכוז הפחמן ב-%	טמפרטורה, °C	תכונה
A	0	1539	נקודת ההיתוך של ברזל נוזלי.
C	4.3	1130	נקודה אוטקטית. מעבר פאזה נוזלית למצב צבירה מוצק ויצירת שיווי משקל אוטקטי עם מבנים אוסטניט וצמנטיט ראשוני
E	2.14	1147	מסיסות המקסימלית של פחמן באוסטניט. מבנה אוסטניט בשיווי משקל אוטקטי עם פאזה נוזלית וצמנטיט.
S	0.8	723	מעבר אוטקטואידית של מבנה אוסטניט לפרליט. שיווי משקל בתגובה אוטקטואידית בין אוסטניט עם פריט α וצמנטיט משני.
P	0.025	723	מסיסות המקסימלית של הפחמן בפריט α . מבנה פריט α בשיווי משקל אוטקטואידית עם אוסטניט וצמנטיט משני
Q	0.006	20	ריכוז המקסימלית של פחמן במבנה פריט בטמפרטורת החדר.
J	0.16	1498	נקודה פריטקטי. קבלת מבנה אוסאניט לפי תגובה פריטקטי.
H	0.1	1498	מסיסות המקסימלית של הפחמן בפריט δ . התחלה של קו פריטקטי.
B	0.51	1498	סיום קו פריטקטי.

קווים בשיווי משקל בין 3 פאזות

קווים	טמפרטורת שיווי משקל °C	מבנים (פאזות) הנמצאים במצב שיווי משקל	תגובה
ECF	1147	תמיסה נוזלית + אוסטניט + צמנטיט	אוטקטית
PSK	723	אוסטניט + פריט + צמנטיט	אוטקטואידית

טיפול תרמי

טכנולוגיה המאפשרת שינוי תכונות מכניות באמצעות חימום וקירור. הטיפול מתבצע כאשר החומר המטופל **במצב מוצק**. בטיפול התרמי אנו משנים את המבנה הגבישי של הפלדות ואת גודל הגרעינים. לטיפול התרמי חשיבות תעשייתית רבה מאוד, ביצועו הנכון עשוי לקבוע את התאמת החלק לתפקודו ואת אורך חייו.

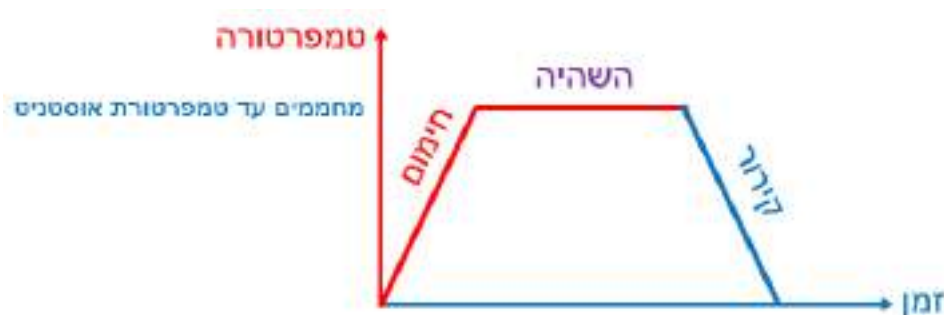
חיסום

מטרה: להקשות את הפלדה, להגדיל את עמידותה בפני שחיקה.

פלדות פחמן המכילות פחות מ- 0.3% פחמן לא ניתנות לחיסום מכיוון שאין מספיק אטומי פחמן ש-'פריעו' לאטומי הברזל להגיע למבנה BCC בתהליך הקירור ואז קיבלנו מבנה חלש יחסית.

שלבי פעולה:

1. חימום לטמפ' אוסטיניתית ($>750^{\circ}\text{C}$)
2. השהיית החלק בתנור החימום, לפרק זמן המחושב לפי גודל החלק.
3. קירור מהיר באחת משלושת האפשרויות: אוויר, מים, שמן.

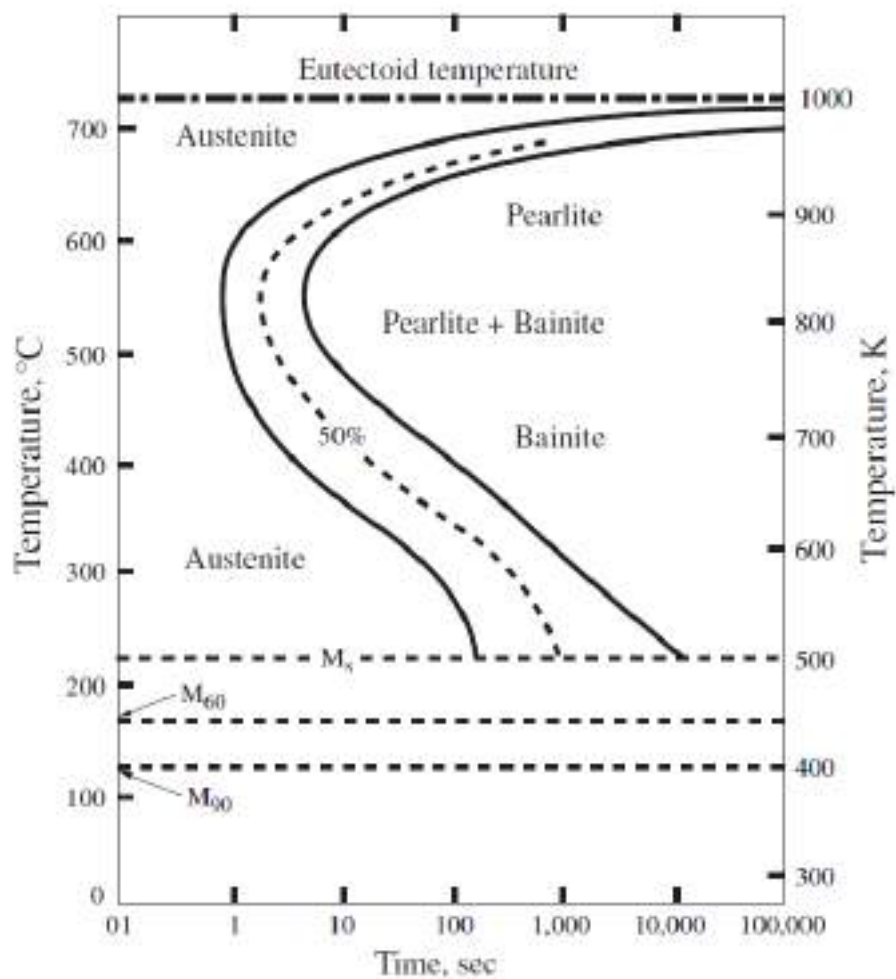


מהירות קריטית – מהירות הקירור המינימלית הגורמת להיווצרות מבנה מרטנסיט בלבד. המטרה שלנו היא להשיג מהירות קירור העולה על מהירות הקירור הקריטית ומבטיחה מבנה מרטנסיטי מושלם.

מהירות הקירור תלויה בעוצמת הצינון וגודל החלק המטופל. עוצמת הצינון היא תכונה של סביבת הקירור ותלויה בסוג הסביבה, טמפ' הסביבה ותנועת הסביבה.

דיאגרמת TTT (Time, Temp, Transformation)

לכל סוגי הפלדה יש דיאגרמת TTT משלה (בדומה לת.ז. של האדם). הדיאגרמה מתארת את השינויים האלוטרוניים המרחשים בפלדה וקובעת את הזמן הדרוש לשינויים הללו. לצורך בניית הדיאגרמה, מכינים מספר רב של דגמים זהים העשויים מאותה פלדה, מחממים עד לטמפ' של אוסטיניזציה, מעבירים כל דגם לתנור אחר שבו הטמפרטורה נמוכה מ-723 מעלות ובאמצעות בדיקה, קובעים את הרגע ההתחלתי של המעבר האלוטרופי והרגע הסופי.



פלדות מים (קירור במים)

פלדות פחמניות בעלות ריכוז הפחמן בינוני מ-0.5% עד 0.9%. מחממים את הפלדה עד טמפרטורת אוסטיניזציה ומקררים במהירות עד לקבלת מבנה מרטנזיט.

פלדות שמן (קירור בשמן)

פלדות פחמניות בעלות ריכוז הפחמן בינוני מ-0.5% עד 0.9%. מחממים את הפלדה עד טמפרטורת אוסטיניזציה ומקררים במהירות איטית יותר בשמן עד לקבלת מבנה פריט + פרליט. כאשר הקירור נעשה לאט והוא מעין הרפיה שבה משתחררים המאמצים הפנימיים שנוצרו בזמן שינוי הנפח בתגובה המרטנסיטית; ומכאן פלדות שצוננו בשמן הן צפידות יותר ואינן רגישות לריכוזי מאמצים כמו פלדות שצוננו במים.

פלדות אוויר (קירור בטמפרטורת החדר בין 20°C – 25°C)

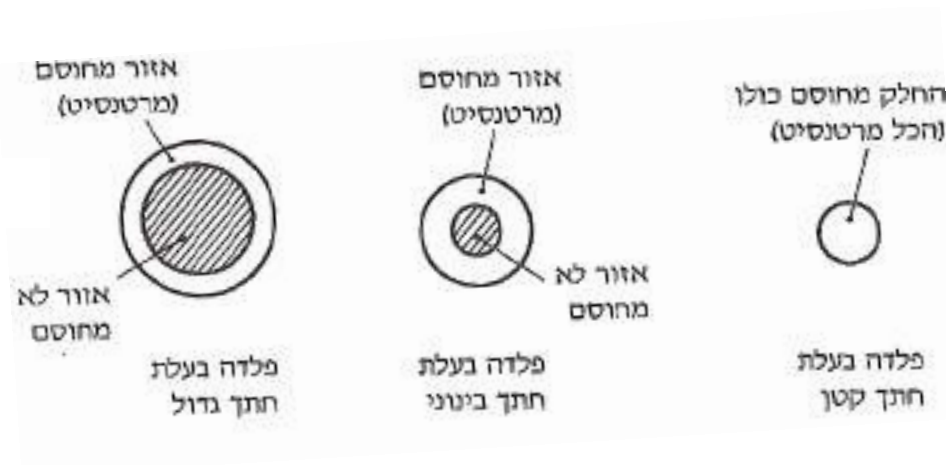
פלדות פחמניות עשירות פחמן (מעל 0.9%), פלדות מסגסוגות בעלות ריכוז גבוה של יסודות המסוג. מחממים את הפלדה עד טמפרטורת אוסטיניזציה ומקררים במהירות איטית מאוד באוויר עד לקבלת מבנה מרטנסיטי מושלם. הצינון באוויר מקטין עד ממצער את המאמצים השארתים המתפתחים בגוף בשעת החיסום, ונמנעת הסכנה לעיווי או להיסדקות הגוף.

כושר חיסום של פלדה

מדד של העומק, שבו עדיין אפשר ליצור מבנה מרטנסיטי בתוך גוף הפלדה, כלומר לאיזה עומק חדר החיסום בפלדה המתחממת.

מכיוון שמהירות הקירור היא שונה בעומק שונה של המוצר – לא תושג חדירה מלאה של חיסום, לכן על פני שטח המוצר מתקבל מבנה מרטנסיטי, וכלפי פנים מבנים אחרים, כמו בייניט, טרוסטיט, סורביט ואף פרליט.

קוטר קריטי לחיסום – קוטר מקסימלי שבו ניתן לקבל מבנה מרטנסיטי מלא בפלדה. ככל שהקוטר הקריטי גדול יותר, כושר החיסום של הפלדה יהיה גבוה יותר.



ההשפעה הגורמים העיקריים על כושר חיסום בפלדות:

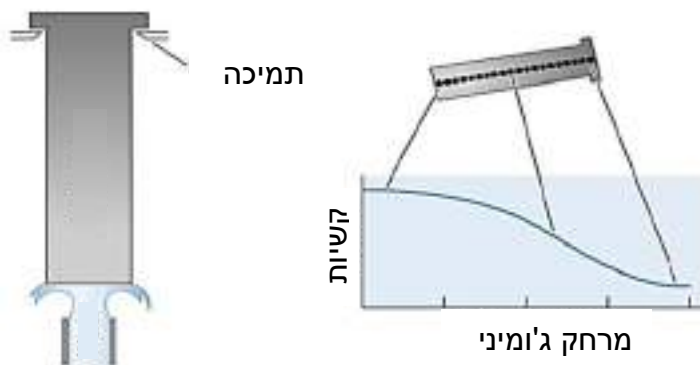
1. כושר חיסום גדל עם עליית אחוז הפחמן בפלדות פחמניות.
2. כושר חיסום גדל עם עליית אחוז מסגסים בפלדות מסג.
3. כושר חיסום גדל עם השלמת היסודות המסג להרכב הכימי של פלדות, כמו $Cr+Ni$; $Cr+Ni+Mo$; $Cr+Mn+Si$.
4. שיעורים קטנים של יסודות כמו ונדיום, ניוביום או טיטניום משפיעים על קבלת מבנה מטלגרפי עדין ותכונות מכאניות משופרות.
5. גיאומטריה מסובכת משפיעה על הגדלת כושר חיסום.
6. בפלדות פחמניות ההשפעה העיקרית תלויה משעורי הפחמן ומנגן. עם הגדלת אחוזי הפחמן ומנגן כושר חיסום גדל.
7. בפלדות מסגסגות כושר חיסום תלוי באיכותם ובריכוזם של היסודות המסגים, הנמצאים בהרכב הכימי של הפלדה. כושר חיסום גדל עם אחוז יסודות המסגים עולה.
8. לכל פלדה קיים קשר בין התכונות המכניות לבין קצב הקירור. במהלך הקירור של דגם פלדה, קשה מאוד לקבל תכונות אחידות בכל נקודה בחומר, מפני שקצבי הקירור בפני השטח הינם מהירים יותר מאשר בתוך הדגם.
9. פלדה בעלת "כושר חיסום טוב" היא כזו שהקשייתה או היווצרות המרטנסיט בה, אינו נוצר רק בפני השטח, אלא גם בתוך נפח הדגם.

השיטות לבדיקת כושר החיסום:

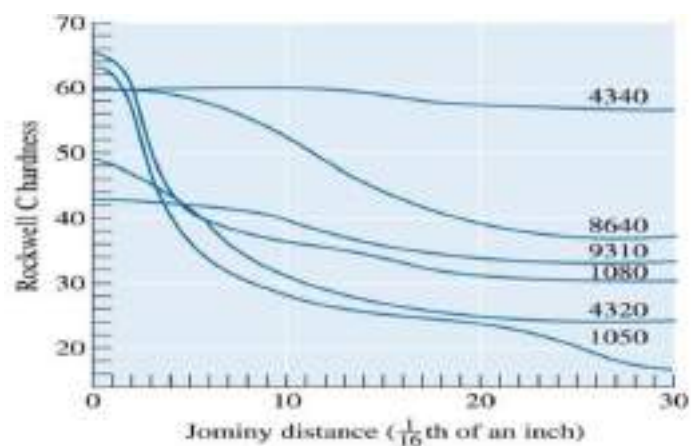
ג'ומיני (The Jominy End Quench Test) – שיטת הבדיקה מאפשרת לקבל עקומות כושר חיסום והשימושיות להשוות כושר החיסום של פלדות. הבדיקה מבוססת על חיסום גילי פלדה תקינים בתנאי טיפול מבוקרים ואחידים לכל סוגי הפלדות. בבדיקת ג'ומיני נבדק מוט פלדה סטנדרטי (1" קוטר ו 4" אורך)

לפי בדיקת קשיות ועקומת כושר חיסום ניתן לקבוע עומק החיסום מהמקום שבו הוטזו המים כלפי מעלה. עקומת כושר חיסום של פלדה מסוימת מתארת את הקשיות כתלות בקצב הקירור (כאשר קיימת התאמה בין קצב הקירור למרחק מקצה הדגם המחווס). המרחק מהקצה המחווס נקרא **"מרחק ג'ומיני"**.

מחממים לטמפרטורת מחממים לטמפרטורת אוסטיניזציה. מכניסים למתקן מיוחד כך שבקצהו האחד מותזים מים בלחץ וטמפרטורה מסוימים. מקבלים קצבי קירור מהירים מאוד בקצה המחווס במים לעומת קירור אוויר בקצה הנגדי. כשהמוט מתקרר, מנסרים אותו לאורך הציר ומודדים את הקשיות במרחקים שונים מהקצה שקיבל את הצינון הישיר. את הנתונים רושמים בדיאגרמה, בקוארדינטות קשיות HRC מרחק מן הקצה המצוין במ"מ ומשרטטים עקומה הנקראת "עקומת כושר חיסום".



גרף קשיות HRC מרחק מקצה הדגם:



גרוסמן (The Grossman End Quench Test) – בבדיקת גרוסמן מכינים מספר מוטות מאותה פלדה בקטרים שונים.

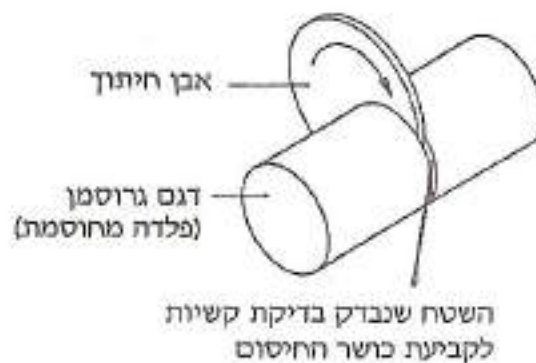
מחממים את דגם גלילי לטמפרטורת האוסטניזציה ומחסמים אותם. לאחר הקירור יש לחתוך את הדגם לרוחב באמצע ולהשחילו. לאחר מכן תתבצע בדיקת קשיות RC לאורך קוטר הדגם במרחק של 2 מילימטר בין בדיקה לבדיקה (על מנת למנוע הקשיית מעוותים בין בדיקה לבדיקה). בדיקת קשיות RC בודקת את פילוג הקשיות על גבי שטח החתך העגול, במרחקים שונים מן המרכז (על הרדיוס), כתלות בחלק היחסי של הקוטר.

את תוצאות רוסמים בדיאגרמה: קשיות HRC - מרחק מן המרכז ובונים עקום, שלפיו ניתן לקבוע את כושר החיסום של הפלדה.

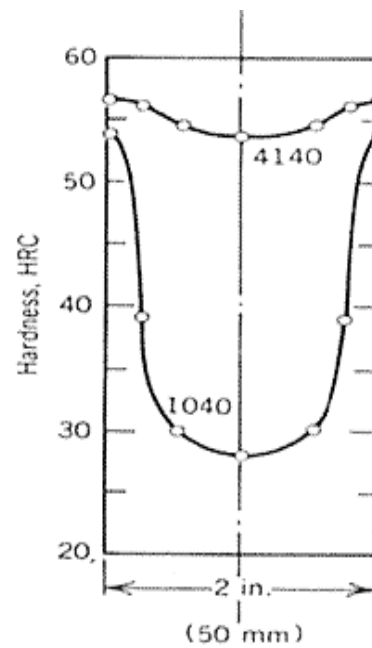
עקומות גרוסמן מתארות את השתנות פרופיל הקושי עם המרחק ממרכז החתך הגלילי.

שני הגורמים העיקריים אשר משפיעים על דרגת ההקשיה לפי שיטת גרוסמן:

1. החומרה של החיסום. גורם קובע כמה מהר חום מוסר מפני השטח של הדגם במהלך החיסום. היחס בין שטח הפנים לנפח הדגם של הפלדה. הגורם קובע כמה מהר מרכז הדגם מתקרר.
2. היחס בין שטח הפנים לנפח הדגם של הפלדה. הגורם קובע כמה מהר מרכז הדגם מתקרר



גרף קשית HRC – מרחק ממרכז הדגם:



הרפיה

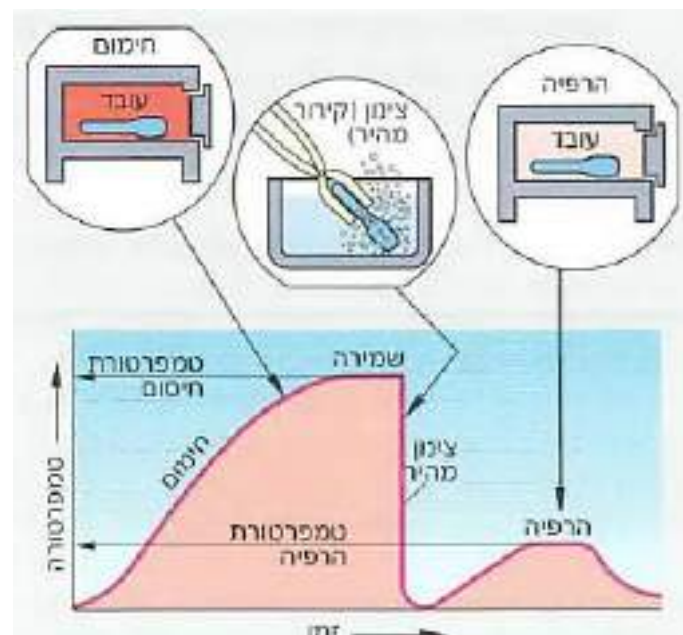
כל פלדה העוברת חימום תעבור **תמיד** הרפיה לאחר החימום !!!
מטרה: לשחרר מאמצים פנימיים בפלדה מחוסמת, להקטין פריכות, להחזיר גמישות.

אופן הביצוע:

1. חימום: מתחת ל- 723°C (לא מגיעים לטמפ' אוסטיניטית)
2. הרפיה גבוהה לפלדות מבנה $550^{\circ}\text{C} - 650^{\circ}\text{C}$
3. הרפיה בינונית לפלדות קפיציות $350^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$
4. הרפיה נמוכה לפלדות כלים $150^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$

ככל שטמפרטורת החימום גבוהה יותר כך חוזק קשיות ופריכות יורדים ופלסטיות עולה.
השהיה: בתנור החימום, הזמן מחושב לפי גודל החלק.

קירור: איטי בתנור כבוי.



ככל שטמפרטורת ההרפיה גבוהה יותר הקשיות הסופית של הפלדה נמוכה יותר.
ככל שטמפרטורת ההרפיה נמוכה יותר הקשיות הסופית של הפלדה גבוהה יותר.

ריפוי

מטרה: שחרור מאמצים פנימיים בפלדות המתחסמות באוויר (לא מתאים להם תהליך נרמול), קבלת מבנה אחיד, להקטין את הקשיות ולהגדיל פלסטיות במידה ניכרת.

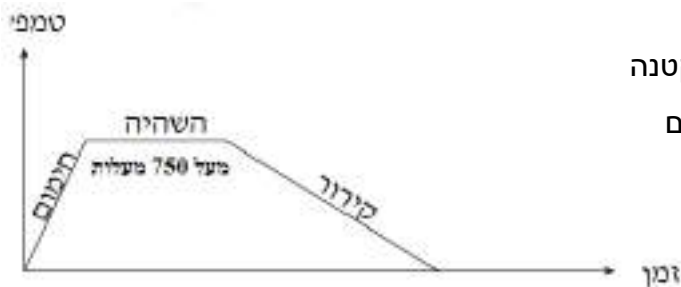
אופן הביצוע:

1. חימום לטמפ' אוסטיטית (עבור פלדות תת אוטקטואידיות נחמם בטמפ' נמוכה יותר מפלדות המכילות מעל 0.8% פחמן).

חימום יתר יגרום ל:

- הגדלת גודל הגרעינים
- שריפת הפחמן ואז כמות הפחמן בשכבה החיצונית קטנה
- שריפת הפלדה- היתוך מקומי לאורך גבולות הגרעינים

2. השהיה בתנור החימום, הזמן מחושב לפי גודל החלק.



קירור איטי מאוד בתנור סגור ומכובה

מבנה מתקבל: פריט + פרליט בקירור איטי/ ריפוי מלא

נרמול

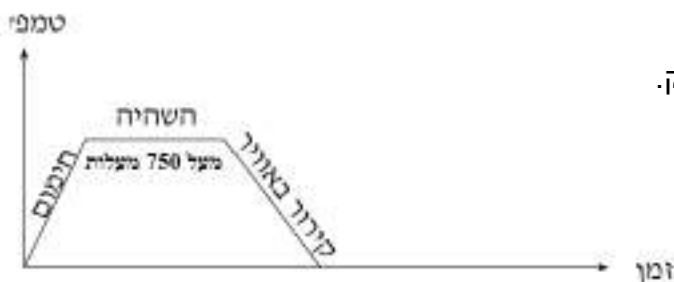
מטרה: קבלת חומר אחיד בעל גרעינים קטנים יחסית, לשחרר מאמצים פנימיים, לשפר כושר עיבוד שבבי. החוזק והקשיות יהיה גבוהים מאלה לאחר ריפוי.

אופן הביצוע:

1. חימום לטמפ' אוסטיטית (עבור פלדות תת אוטקטואידיות נחמם בטמפרטורה נמוכה יותר מפלדות המכילות מעל 0.8% פחמן).

2. השהיה בתנור החימום, הזמן מחושב לפי גודל החלק.

3. קירור מהיר יותר מהריפוי מכיוון שנעשה באוויר



הקשיה חיצונית של פלדה

הקשיה חיצונית (Surface hardening) – טיפול תרמי המאפשר לקבל משטח חיצוני קשה וצמיגות בליבה, הנדרש עבור חלקי מכונות רבים החייבים לעמוד בתנאי עבודה קשים כגון: שחיקה, חיכוך, מאמצים דינמיים.

השיטות של הקשיה חיצונית:

- חיסום חיצוני (הקשיה חיצונית) בטיפול תרמי בלבד
- הקשיה חיצונית בטיפול תרמוכימי.

חיסום בלהבה

חיסום חיצוני בטיפול תרמי בלבד-דומה לתהליך החיסום הרגיל, אלא שכאן אזור החיסום מוגדר ומוגבל רק לשכבות החיצוניות.

מחממים את המשטח החיצוני בלהבה. השטח המחומם נהפך למבנה אוסטניטי ובשעת הקירור עובר תגובה מרטנסיטית ומתקשה. הקירור נעשה בהתזת מים ברציפות.

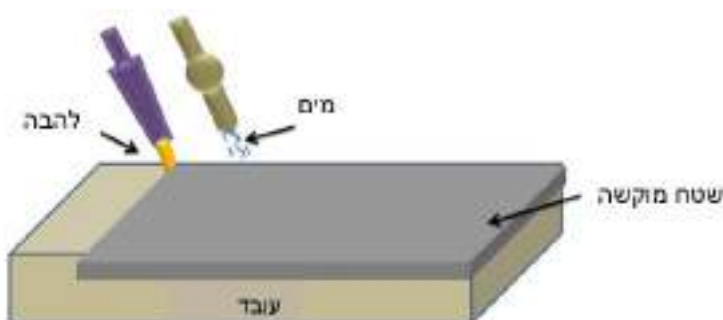
- עומק החיסום כ- 3 מ"מ
- מתבצע בפלדות פחמניות פשוטות שמכילות 0.4-0.7 אחוז פחמן.

יתרונות :

- מתאים לחלקי מכונות גדולים
- חימום מהיר.

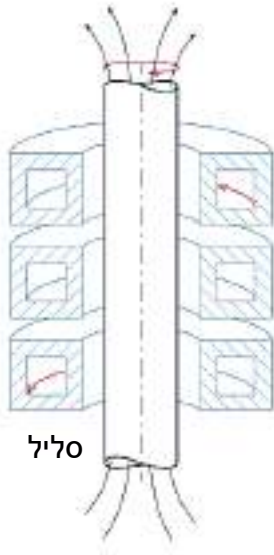
חסרונות:

- קושי בפיקוח על עומק החיסום ועוצמת החימום
- נדרשים במתקנים מיוחדים למוצרים בעלי צורה מורכבת.



חיסום בהשראה

הקשיה עם חימום בעזרת השראה (אינדוקציה) – מחממים את פני הפלדה בעזרת שדה אלקטרומגנטי בתדירות גבוהה. החלק יושב בתוך סליל ויוצר סביבו שדה מגנטי מתחלף הגורם לחימום המתכת.



יתרונות:

- מהירות חימום גבוהה,
- חימום אחיד, לכן מאמצים שאריתיים קטנים יותר מחימום בלהבה.
- עומק החימום נשלט על-ידי שינוי עצמת הזרם ושינוי תדירות.
- הפלדה אינה מתחממת ואינה מאבדת פחמן
- התפוקה גבוהה ביחס לתהליכים אחרים
- מתאפשר חימום בסדרות

חסרונות:

- עלות הציוד
- צריכת חשמל גבוהה

הקשיה חיצונית בטיפול תרמוכימי – שינוי הרכב הכימי ומבנה המטלורגי של השכבות החיצוניות על ידי החדרת יסודות לתוך פני המתכת.

צמנוט (Carburizing)

חדרת פחמן לתוך השכבה החיצונית של פלדה.

התהליך מאפשר עליה בתכולת הפחמן בשכבה החיצונית של פלדה דלת פחמן עד $0.2\%C$, כך שהמרכז נשאר צמיג.

צמנוט נעשה בטמפרטורה $920-950^{\circ}C$, במצב אוסטניטי ובמגע הדוק עם חומר עשיר פחמן, הנקרא קרבידיזטור (מפחם) הנמצא במצב מוצק, גז או נוזל.

הפחמן חודר לפלדה, מתרכב עם הברזל ויוצר את התרכובת הקשה Fe_3C צמנטית. לאחר תהליך הצמנוט הפלדה עוברת תהליך של חיסום רגיל. בסיום התהליך מתקבלת שכבה חיצונית מחוסמת עשירת פחמן (עד- $0.8\%C$) פנים החלק נשאר רך. **לאחר החיסום יש לבצע הרפיה !!!**

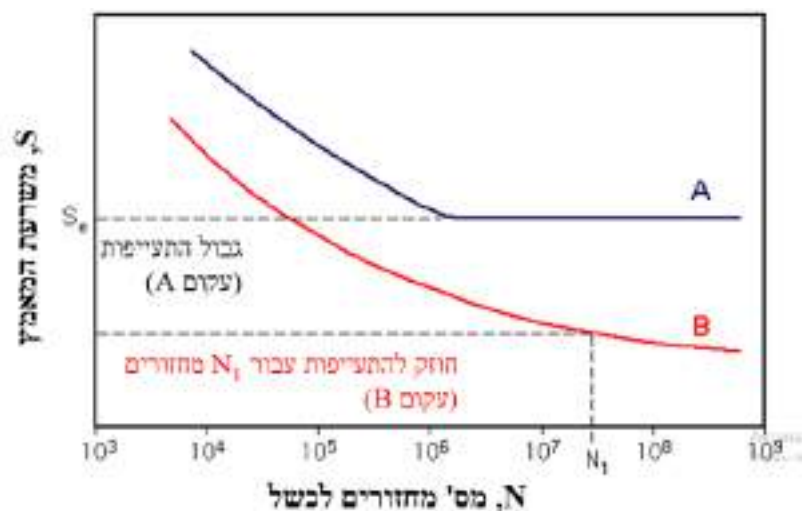
חנקן – ניטראציה (Nitriding)

תהליך של החדרת החנקן לתוך השכבה החיצונית של פלדה. על פני השטח נוצרת שכבת קרבוניטריד $\text{Fe}_3(\text{CN})$ בעובי 0.2 – 0.5 מ"מ עם עמידות גבוהה לבלאי ולשיתוך.

לתהליך החנקן מספר יתרונות על פני תהליך הצמנט:

- שכבה הנוצרת אינה פריכה.
- קשיות השכבה גבוהה יותר.
- פחות עיוותים בחלק
- קשיות השכבה החיצונית אחרי חנקן גבוהה יותר מאשר שאחרי צמנט ועמידה יותר בטמפרטורות גבוהות (עד 600°C – 650°C ובצמנט רק עד 200°C – 225°C)

עקום S-N - מתאר את אורך החיים של חלק במספר מחזורים עד לשבר (N), כתלות במשרעת (אמפליטודה) המאמץ S , [MPa].



גבול התעייפות – הערך של משרעת (אמפליטודת) המאמץ, הוא מאמץ המרבי שבו לא יתרחש נשבר התעייפות. כלומר, באופן תיאורטי, אורך חיים של חלק המועמס במאמץ זה ומטה הוא אינסופי (אינסוף מחזורי העבודה).

כללים למניעת התעייפות החומר:

- הקפדה על מרקם המשטח של חלקי מכונות העובדים במאמץ משתנה. טיב פני שטח המומלץ הוא N6 וחלק יותר.
- הימנעות מפנינות חדות
- סגסוג עם חומרים המעלים את העמידות בהתעייפות.
- הימנעות מקורוזיה גימום
- תכנון נכון, כך שהמאמצים המתפתחים יהיו נמוכים מגבול ההתעייפות.

קורוזיה (שיתוך)

תהליך כימי או אלקטרוכימי הגורם להרס מתכות בהשפעת הסביבה, קודם כל, בהשפעת החמצן.

קורוזיה כימית – המתכות מגיבות עם גזים, במיוחד בטמפרטורות גבוהות ללא נוכחות נוזל. מכאן שתהליך זה נקרא גם קורוזיה יבשה. במקרה זה של קורוזיה, נוצרת על המתכת שכבת תחמוצת (תרכובת של מתכת עם חמצן).

יש שני סוגים של שכבת התחמוצת:

- שכבת תחמוצת מתפוררת וחדירה. שכבה זו אינה מונעת את המשך התקדמות תהליך הקורוזיה, והמתכת מתכלה. השכבה המתפוררת נוצרת על ברזל וסגסוגותיו: פלדות וציקות ברזל. שכבת התחמוצת שנוצרת על הסגסוגות האלה נקראת חלודה. ברזל וסגסוגותיו מחלידות.
- שכבת תחמוצת הדוקה ואטומה שמונעת את המשך תהליך הקורוזיה. מתרחשת במתכות אל ברזליות כדוגמת: אלומיניום, כרום, טיטניום. מתכות אל ברזליות אינן מחלידות.
- תהליך היווצרות שכבת התחמוצת תלוי בטמפרטורת הסביבה, הרכב הסביבה, וסוג המתכת.

מס'	שם המתכת	סימון כימי	הפוטנציאל בולטאים
1	ליתיום	Li	-3.05
2	אשלגן	K	-2.93
3	מגנזיום	Mg	-2.37
4	חמצן	Al	-1.66
5	מנגן	Mn	-1.05
6	כרום	Cr	-0.71
7	אבץ	Zn	-0.76
8	ברזל	Fe	-0.44
9	קדמיום	Cd	-0.40
10	ניקל	Ni	-0.25
11	בדיל	Sn	-0.14
12	עופרת	Pb	-0.13
13	מימן (גז)	H	0
14	נחושת	Cu	+0.34
15	כסף	Ag	+0.8
16	זהב	Au	+1.5

קורוזיה אלקטרוליטית – בעוד שבקורוזיה כימית התהליך מתבצע

באוויר או בגז אחר, הרי שבקורוזיה אלקטרוליטית התהליך מתרחש

בנוכחות נוזל מוליך חשמל הנקרא אלקטרוליט.

למתכות שונות יש נטייה שונה לעבור קורוזיה אלקטרוליטית.

אחד המדדים לנטייה זו היא היכולת לשחרר אלקטרון לאלקטרוליט

(נוזל מוליך חשמל) או לקבל אלקטרון ממנה.

קורוזיה גלוונית – כאשר שתי מתכות בעלות פוטנציאל

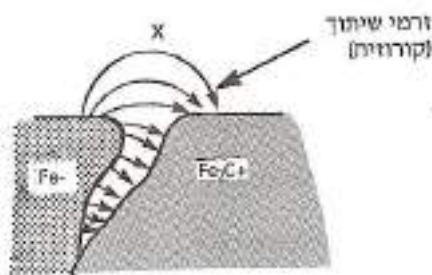
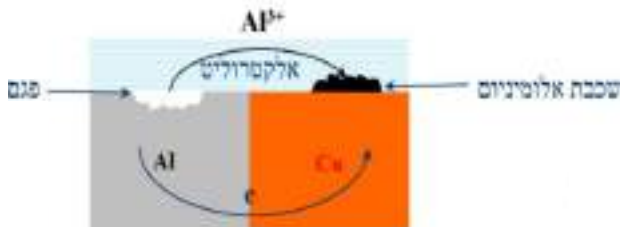
אלקטרוכימי שונה באות במגע בנוכחות אלקטרוליט,

מתכת בעלת פוטנציאל נמוך יותר תופסת את התפקיד

של אנודה ומשליחה אלקטרונים, ומתכת בעלת

פוטנציאל גבוה יותר תופסת את התפקיד של קטודה.

המתכת שהיא "אנידה" נהרסת.



קורוזיה בין גבישית של סגסוגות – מתרחשת לפי המנגנון של קורוזיה

גלוונית. סגסוגות מהוות תערובת של גבישים שונים בעלי פוטנציאל

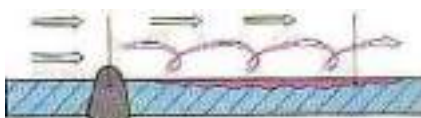
אלקטרו-כימי שונה.



גבישים בעלי פוטנציאל נמוך יותר נארסים, וסגסוגת "מתפוררת" לגבישים נפרדים.

שיתוך עקב התעייפות המתכת – ריכוז מאמצים גורם להיווצרות סדקים

עדינים הגורמים גורמים לשיתוך.



שיתוך מחמת שחיקה מחזורית (ארוזיה) – שיתוך אירוזיבי המתרחש תוך

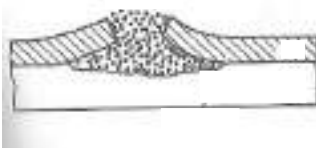
כדי תנועה:

תנועת אלקטרוליט יחסית למתכת (תנועת מים בצינורות),

תנועת חיכוך המתכות (חלקי מכונה: מסבים, ברגי הנעה)

שיתוך תת-שכבתי -נוצר במתכות המצופות בצבע, שמן או חומרים פלסטיים.

עקב פגם בציפוי חודרים מים וחמצן היוצרים שיתוך מתחת לציפוי.

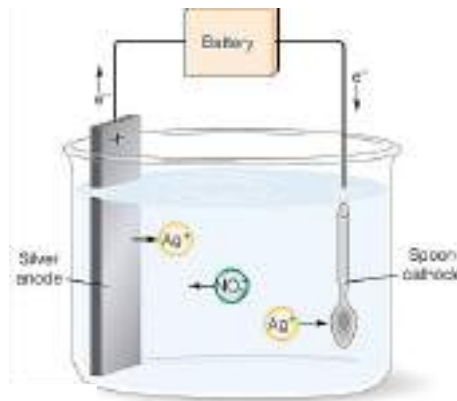


שיטות הגנה בפני קורוזיה

הגנה לא מתכתית – כיסוי המתכת בשכבת מגן כמו שימון, גורוז, צבע או ציפוי אמייל.

אמצעי הגנה מתכתיים:

ציפוי אלקטרוליטי – גליון: פעולת ציפוי מתכת במתכות בתוך תמיסה נוזלית בעזרת זרם חשמלי ישר.



ציפוי בהתזה – נעשה בהתזת טיפות מתכת מותכת (אלומיניום, אבץ וכו') על פני המוצר העשוי פלדה, הטעון ציפוי, על-מנת ליצור שכבה חיצונית להגנה מחלודה.

ציפוי בטבילה – נעשה בטבילת המוצר בתוך אמבטיות המכילות מתכת מותכת (לרוב אבץ)

ציפוי בזרחן (השחרת פלדה) – נעשה בטבילת המוצר העשוי פלדה בחומצת זרחן מחוממת.

ציפוי בפלסטיק – במפעלים כימיים מצפים מכלים וצינורות העשויים מתכת בפלסטיק על מנת ליצור הגנה בפני חומצות.

טיפול בסביבה – מניעת לחות, שימוש במעקבי חמצון.

הגנה בפני קורוזיה גלונית – יצירת בידוד בין המתכות הבאות במגע.

18. מטלורגית אבקות

תהליך יצור מוצרים ממתכות נקיות, סגסוגות או חומרים קרמיים ללא צורך בהתכה.

התהליך משמש במקרים הבאים:

- כאשר לא ניתן או קשה להתיך את החומר, כמו במקרה של חומרים קרמיים ומתכות בעלות טמפרטורת התכה גבוהה מאד.
- כאשר יש צורך בהרכבים מיוחדים אשר לא אפשריים על-פי דיאגרמת הפאזות.
- כאשר יש צורך במשקל מדויק מאד של המוצר הסופי.
- עבור חלקים בעלי צורה מיוחדת אשר לא ניתן או יקר מאד ליצרם בשיטות אחרות.

התהליך מורכב מארבעה שלבים:

1. הכנת האבקות – השאיפה לקבל אבקות אחידות ככול הניתן מבחינת צורת הגרגרים, גודלם והרכבם.

ניתן להכין את האבקות מספר שיטות:

- שיטה מכנית – גריסה וטחינה
- שיטה כימית – חיזור, אלקטרוליזה
- אטומיזציה – התכה, יצירת סילון של החומר המותך וקירור מהיר באמצעות מים או אוויר
- שיטת ההכנה נקבעת על פי חומר הגלם, גודל וצורת גרגרי האבקה הנדרשים.

2. ערבוב האבקות – תהליך הערבוב הוא חיוני ביותר והוא נמשל מספר שעות.

לערבוב האבקות יש מספר מטרות:

- קבלת פילוג גודל גרגרים אחיד בכל נפח האבקה. בעת האחסון והשינוע של האבקה, הגרגרים הקטנים שוקעים מטה והגרגרים הגדולים עולים מעלה. מטרת הערבוב לבטל תופעה זו.
- קבלת הרכב אחיד. במקרה של אבקה המורכבת ממספר מרכיבים, הערבוב יוצר הרכב אחיד בכל נפח האבקה.

3. כבישה – תהליך של הפעלת לחץ על אבקה הנמצאת בתבנית. עוצמת הלחץ תלויה בגודל המוצר וסוג האבקה. התוצאה היא מוצר הגדול במקצת מהמוצר הסופי, ובעל חוזק נמוך אך מספיק על מנת לשנע אותו ממקום למקום. (ניתן לשבור את המוצר הירוק ביד).

4. סנטור – האבקה אשר מרכיבה את המוצר הירוק, הופכת לחומר מלא (או כמעט מלא) ומתקבל מוצר שלם.

- התהליך העיקרי בסנטור הוא הדיפוזיה (פעפוע). הגורם העיקרי הקובע את קצב הדיפוזיה הוא טמפרטורה. ככול שהטמפרטורה גבוהה יותר, כך קצב הדיפוזיה מהיר יותר.
- גורם נוסף הוא גודל הגרגרים. ככול שהגרגרים קטנים יותר, כך קצב הדיפוזיה מהיר יותר.

19. אלומיניום (חמרן)

יסוד המופק מבוקסיט. מתכת קלה שאינה מקבלת שיתוך (קורוזיה) בעלת משקל סגולי 27000 N/m^3 . תכונותיו המכניות חלשות.

לאלומיניום נקי ניתן להוסיף חומרים אחרים על מנת לשפר את תכונותיו המכניות. אחת התוספות הנפוצות היא הנחושת היוצרת את הנתך דוראל. נתך זה אכן חזק יותר מאלומיניום נקי אך אינו עמיד בפני שיתוך.

האלקלד הוא נתך דוראל מצופה בשכבות דקות של אלומיניום נקי ולכן בפח זה יש להיזהר משריטות כי הדבר עלול להסיר את ציפוי האלומיניום הנקי.

ניתן לשייך את סוגי נתכי האלומיניום בהתאם לטיפול התרמי שקיבלו לפי האות הרשומה ליד מספר הנתך:

- O נתך במצב הרך ביותר שעבר ריפוי שלא עבר טיפול תרמי
- F נתך שעבר הקשיה בעיבוד קר או בטיפול תרמי
- H נתך אלומיניום הניתן להקשיה בעיבוד קר בלבד
- W נתך אלומיניום במצב ביניים (לפני הזדקנות)
- S נתך אלומיניום שעבר חישול
- T נתך אלומיניום שעבר טיפול תרמי

ליד האות T יש למקם מספר שמשמעו סוג הטיפול התרמי שהנתך עבר:

- T4 נתך שעבר טיפול תרמי והתיישן באוויר החופשי
- T5 נתך שעבר טיפול תרמי והתיישן באופן מלאכותי
- T6 טיפול תרמי והתיישן מלאכותי בתנור לאחר עיבוד בקור

סימון:

נתכי אלומיניום מסומנים בארבע ספרות וכן באות ומספר



חומר עיקרי שהוסף לאלומיניום הנקי:

- 1 אלומיניום טהור
- 2 נחושת
- 3 מנגן
- 4 צורן
- 5 מגנזיום
- 6 מגנזיום וצורן
- 7 אבץ
- 8 חומרים אחרים

נתכים 1100, 5056, 5086 אינם מתקשים בטיפול תרמי, הואיל ואחוז התוספת מזערי ולכן יישארו בעלי תכונות מכניות גרועות.

נתכים כגון: 7075, 2024 מכילים תוספת משמעותית של החומר הנוסף ולכן הם מתקשים.

סימון סגסוגת אלומיניום, טיפולים תרמיים ועיבודים מכניים:

Aluminum Alloy Designation System

Types of Aluminum Alloys	
Aluminum Association (AA) Numbering System	
Alloy (AA)	Major alloying element
1xxx	Aluminium (Al) > 99.00%
2xxx	Copper (Cu)
3xxx	Manganese (Mn)
4xxx	Silicon (Si)
5xxx	Magnesium (Mg)
6xxx	Magnesium (Mg) & Silicon (Si)
7xxx	Zinc (Zn)
8xxx	Other elements

The Basic Temper Designations	
F	As Fabricated
O	Annealed
H	Strain Hardened
W	Solution Heat-Treated
T	Thermally Treated

T = Heat Treating Codes	
Code	Description
T1	קירור מטמפרטורה גבוהה בה בוצע העיצוב וזיקון טבעי
T3	טיפול המסה, עיבוד בקור וזיקון טבעי
T361	טיפול המסה ושיחרור מאמצים על-ידי מתיחה
T4	טיפול המסה וזיקון טבעי לקבלת מצב יציב
T451	טיפול המסה ושיחרור מאמצים על-ידי מתיחה. זהה ל- T4
T5	קירור מטמפרטורה גבוהה בה בוצע העיצוב וזיקון מלאכותי
T6	טיפול המסה וזיקון מלאכותי
T651	טיפול המסה, שיחרור מאמצים על-ידי מתיחה ואח"כ זיקון מלאכותי
T8	טיפול המסה, עיבוד בקור וזיקון מלאכותי

H = Strain Hardening Codes	
Code	Description
H1X	הקשייה באופן מבאני
H2X	הקשייה באופן מבאני וריפוי חלקי
H3X	הקשייה באופן מבאני וייצוב על-ידי טיפול בטמפרטורה נמוכה
HX2	רבע (1/4) קשיות
HX4	חצי (1/2) קשיות
HX6	שלוש רבעי (3/4) קשיות
HX8	קשיות מלאה (~75% הפחתה של שטח החתך בעיבוד בקור)

Products forms and nominal compositions of common wrought Aluminum Alloys

AA Number	Product(s)	Composition in weight percent (wt.%)							
		Al	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Other
AA 1100	S, P, F, E, ES, ET, C, DT, FG	99,00 min		0,12					
AA 2011	E, ES, ET, C, DT	93,7		5,5					0,4 Bi ; 0,4 Pb
AA 2014	S, P, E, ES, ET, C, DT, FG	93,5	0,8	4,4	0,8	0,5			
AA 2024	S, P, E, ES, ET, C, DT	93,5		4,4	0,6	1,5			
AA 3003	S, P, F, E, ES, ET, C, DT, FG	98,6		0,12	1,2				
AA 5052	S, P, F, C, DT	97,2				2,5	0,25		
AA 6061	S, P, E, ES, ET, C, DT, FG	97,9	0,6	0,28		1	0,2		
AA 6063	E, ES, ET, DT	98,9	0,4			0,7			
AA 7075	S, P, E, ES, ET, C, DT, FG	90		1,6		2,5	0,23	5,6	

AA = Aluminum Association = האגודה לאלומיניום

S = Sheet = לוח ; P = Plate = פלטה ; F = Foil = רדיד ; E = Extruded rod, bar and wire = מוט, קורה וחוט מאקסטרוזיה ;

ES = Extruded Shapes = צורות מאקסטרוזיה ; ET = Extruded Tubes = צינורות מאקסטרוזיה ;

C = Cold finished rod, bar and wire = מוט, קורה וחוט גימור בטיב בקר ; DT = Drawn Tube = צינורות במשיכה ; FG=Forging=חישול ;

תכונות מכניות של סגסוגת אלומיניום (טבלה מפורטת):

Typical mechanical properties of various Aluminum Alloys							
Alloy (AA) and Temper	Modulus of Elasticity E	Tensile Yield Strength σ_y	Ultimate Tensile Strength σ_{UTS}	Strain at Fracture ϵ_f	Hardness HB	Ultimate Shearing Strength τ	Fatigue Endurance Limit σ_L
	GPa	MPa	MPa	%	BHN	MPa	MPa
1100-O	69	35	90	35	23	60	35
1100-H12	69	105	110	12	28	70	40
1100-H14	69	115	125	9	32	75	50
1100-H16	69	140	145	6	38	85	60
1100-H18	69	150	165	5	44	90	60
2011-T3	70	295	380	15	95	220	125
2011-T8	70	310	405	12	100	240	125
2014-O	73	95	185	18	45	125	90
2014-T4	73	290	425	20	105	260	140
2014-T6, T651	73	415	485	13	135	290	125
2024-O	73	75	185	21	47	125	90
2024-T3	73	345	485	18	120	285	140
2024-T4	73	325	470	19	120	285	140
2024-T361	73	395	495	13	130	290	125
3003-O	69	40	110	35	28	75	50
3003-H12	69	125	130	15	35	85	55
3003-H14	69	145	150	12	40	95	60
3003-H16	69	170	180	9	47	105	70
3003-H18	69	185	200	7	55	110	70

תכונות מכניות של סגסוגת אלומיניום:

Typical mechanical properties of various Aluminum Alloys							
Alloy (AA) and Temper	Modulus of Elasticity E	Tensile Yield Strength σ_Y	Ultimate Tensile Strength σ_{UTS}	Strain at Fracture ϵ_F	Hardness HB	Ultimate Shearing Strength τ	Fatigue Endurance Limit S_e
	GPa	MPa	MPa	%	BHN	MPa	MPa
2011-T3	70	295	380	15	95	220	125
2011-T8	70	310	405	12	100	240	125
2014-O	73	95	185	18	45	125	90
2014-T4	73	290	425	20	105	260	140
2014-T8, T651	73	415	485	13	135	290	125
2024-O	73	75	185	21	47	125	90
2024-T3	73	345	485	18	120	285	140
2024-T4	73	325	470	19	120	285	140
2024-T361	73	395	495	13	130	290	125
7075-O	72	105	230	17	60	150	
7075-T6, T651	72	505	570	11	150	330	160

AA = Aluminum Association = האגודה לאלומיניום
E(GPa) = Modulus of Elasticity = מודול אלסטיות
σ_Y (MPa) = Tensile Yield Strength = מאמץ כניעה
σ_{UTS} (MPa) = Ultimate Tensile Strength = מאמץ מתיחה מקסימלי
ϵ (%) = Strain at Fracture = נעוות בשבר
HB (BHN) = Hardness Brinell (Brinell Hardness Number) = קשיות ברינל
τ (MPa) = Ultimate Shearing Strength = חוזק גזירה מקסימלי
S_e (MPa) = Fatigue Endurance Limit = גבול התעייפות

סגסוגות אלומיניום נפוצות והשימושים

AA 1100

ציוד כימי, חלקים משוכים או מיוצרים באמצעות סיבוב, ייצור כללי, עיבוד לוחות. **סגסוגת "אלומיניום טהור מסחר".** סגסוגת רכה ומשיכה בעלת עבירות (workability) מעולה, ולכן אידיאלי עבור יישומים בהם מתגלה קושי בעיבוד. הסגסוגת ניתנת לריתוך בכל שיטה, אולם הסגסוגת אינה ניתנת לטיפול תרמי. לסגסוגת התנגדות מעולה לקורוזיה ולכן נפוצה בתעשיית הכימיה ובעיבוד מזון.

AA 2011

חלקים בעיבוד שבבי, ייצור ברגים בעיבוד שבבי. סגסוגת בעלת חוזק גבוה ויכולות גבוהות לעיבוד שבבי. **סגסוגת זו נקראת לרוב "סגסוגת לעיבוד שבבי חופשי באופן ממוכן" - free machining alloy (FMA).** כלומר, הבחירה המעולה לפרויקטים בהם נדרש עיבוד שבבי ממוכן באמצעות מחרטה. עיבוד שבבי במהירויות גבוהות של סגסוגת זו ייצור שבבים עדינים שניתנים להסרה בקלות. סגסוגת זו מהווה את הבחירה המעולה לייצור צורות מורכבות בעלות פרטים רבים.

AA 2014

מטוסים (קונסטרוקציה/צנרת), חלקים למכוניות, חלקים בעיבוד שבבי. **סגסוגת בתוספת של נחושת, בעלת חוזק גבוה ויכולות מעולות לעיבוד שבבי.** שימוש עיקרי ביישומים מבניים לחלל.

AA 2024

מטוסים (קונסטרוקציה/צנרת), חלקים למכוניות, מחברים ואביזרים, ייצור ברגים בעיבוד שבבי, יישומים מבניים, מסגרות וקרונ גרר של משאיות. אחת סגסוגות הנפוצות בעלת חוזק גבוה. בעזרת שילוב של חוזק גבוה ועמידות מעולה בהתעייפות, ניתן להשתמש בסגסוגת היכן שדרוש יחס טוב של חוזק למשקל. סגסוגת זו ניתנת לעיבוד שבבי למצב גימור גבוה וכן ניתן לעבדה במצב ריפוי (annealed condition) ובמידת הצורך להוסיף לאחר מכן טיפול תרמי. לסגסוגת זו עמידות נמוכה בפני קורוזיה. כדי להתגבר על עמידות נמוכה בפני קורוזיה מבצעים טיפול אנודיזציה.

AA 3003

מבנים אדריכליים, כלי בישול, חלקים משוכים או מיוצרים באמצעות סיבוב, ייצור כללי, מיכלי לחץ, עיבוד לוחות, מיכל (בריקה) לאחסון. הסגסוגת הנפוצה ביותר מבין כל סגסוגות האלומיניום. אלומיניום טהור מסחרית בתוספת מנגן להגדלת החוזק (20% חזק יותר מהסגסוגת AA1100). לסגסוגת עמידות מעולה בפני קורוזיה וכן עבירות מעולה. סגסוגת זו ניתן לעבד במשיכה וכן לרתך או להלחים.

AA 5052

מטוסים (קונסטרוקציה/צנרת), בניית סירות, כלי בישול, ייצור כללי. יישומים ימיים, מיכלי לחץ, עיבוד לוחות, מסגרות וקרונ גרר של משאיות. **סגסוגת בעלת החוזק הגבוה ביותר, ובעלת עמידות בהתעייפות הגבוהה ביותר מבין כלל סגסוגות האלומיניום שאינן ניתנות לטיפול תרמי.** לסגסוגת התנגדות טובה באווירה ימית ולקורוזיה של מים מלוחים ובעלת עבירות (workability) מעולה. ניתן בקלות לעיבוד במשיכה או בעיצוב (drawn, formed) לצורות מורכבות.

AA 6061

מטוסים (קונסטרוקציה/צנרת), מבנים אדריכליים, מוצרים לבניין, בניית סירות, ציוד כימי, מוצרי חשמל, מחברים ואביזרים, ייצור כללי, יישומים ימיים, צנרת, ציוד פנאי, עיבוד לוחות, מיכל (בריקה) לאחסון, יישומים מבניים, מסגרות וקרונ גרר של משאיות. **סגסוגת אלומיניום הניתנת לטיפול תרמי לשימושים רב גוניים, תוך שמירה על רוב התכונות הטובות של האלומיניום.** תחום רחב של תכונות מכניות והתנגדות לקורוזיה. ניתן לעבד את הסגסוגת במצב ריפוי (annealed condition). ניתן לרתך את הסגסוגת בכל השיטות הריתוך, כולל הלחמה בתנור (furnace brazed). לכן, לסגסוגת זו שימושים רבים, היכן שנדרש שילוב של תכונות מכניות טובות ועמידות טובה בקורוזיה.

AA 6063

מבנים אדריכליים, מוצרים לבניין, מוצרי חשמל, יישומים ימיים, צנרת, ציוד פנאי, מיכל (בריקה) לאחסון. **סגסוגת הידועה בכינויה "סגסוגת אדריכלית".** בעלת תכונות מכניות המציגות חוזק גבוה, מאפייני גימור מעולים ועמידות גבוהה בפני קורוזיה. השימוש האדריכלי הוא הן לפניו והן לחוף המבנים. הסגסוגת מתאימה לטיפול אנודיזציה.

AA 7075

מטוסים (קונסטרוקציה/צנרת), יישומים מבניים. **סגסוגת אלומיניום בעלת חוזק גבוה, בעלת יחס גבוה של חוזק למשקל.** ולכן אידיאלי לשימוש בחלקים הנתונים למאמצים גדולים. ניתן להשתמש בסגסוגת

זיקון – טיפול תרמי באלומיניום

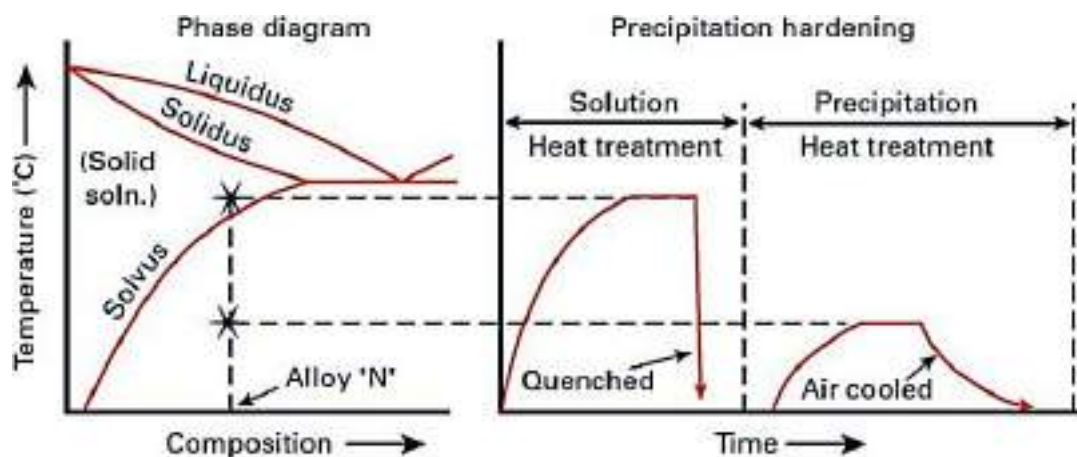
(Precipitation hardening או age hardening)

תהליך הקורה במסגרי אלומיניום ובעוד כמה מסגים (כולל פלדה). תהליך הזיקון גורם להתקשות המסג בטמפרטורת הסביבה במשך זמן ממושך או בעזרת חימום.

זיקון טבעי – כאשר ההקשיה מתקבלת במסג כלשהו בטמפרטורת הסביבה הרגילה.

זיקון מלאכותי – יש צורך בחימום חוזר של המסג כדי לגרום להקשיה.

(זיקון מתאים בעיקר לסגסוגות אלומיניום בעלת אחוז גבוה, יחסית, של חומר מסג. עבור אלומיניום בעל אחוז נמוך של חומר מסג מבצעים הקשיה מכנית בעזרת ערגול, הגורמת לדחיסת הגבישים ובכך פלסטיות יורדת, חוזק קשיות עולים).

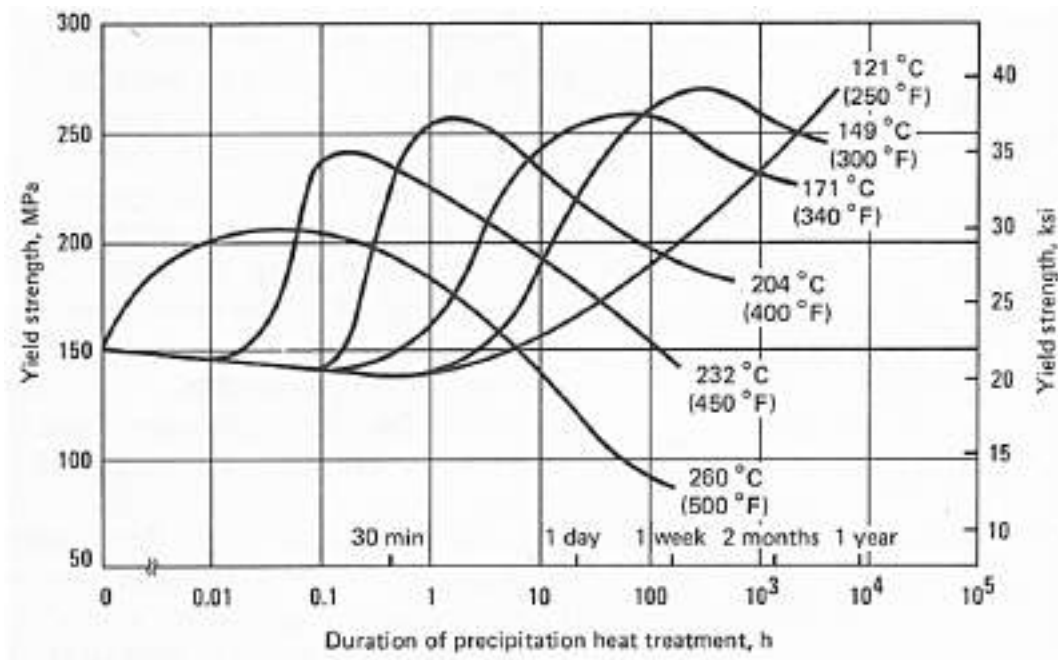


קיימים 3 שלבים בטיפול התרמי לזיקון:

1. טיפול המסה (Solution Treatment) – מחממים את הנתך עד לטמפרטורה שמעל לקו הסולבוס ומחזיקים בטמפרטורה זו עד להומוגניזציה מוחלטת.
2. נתך במצב מוצק (לא התכה) – המטרה היא לסדר את היסודות שיהיו בצורה הומוגנית בתוך החומר.
3. שלב קירור בטיפול המסה – הקפאת מצב – הנתך ההומגני מקורר במהירות לטמפרטורת חדר על ידי זריקתו למים בבת אחת, בדומה לחיסום פלדות, בכדי להקפיא מצב וליצור פאזה שאינה בשיווי משקל.

זיקון (Aging) – תהליך שבו מחממים את הפאזה רוויות יתר לטמפרטורה כלשהיא מתחת לקו הסולבוס (טמפ' לא גבוהה) בכדי לזרז את הדיפוזיה האטומרית ולגרום להופעת המתבדלים הזעירים והומגניים במטריצה.

זיקון יתר (Overaging) – מציין ירידה בחוזק, או בקושיות, של החומר כתוצאה מחשיפה לטמפרטורות או לזמנים ממושכים מדיי וכתוצאה מכך גידול או התמוססות של המתבדלים.



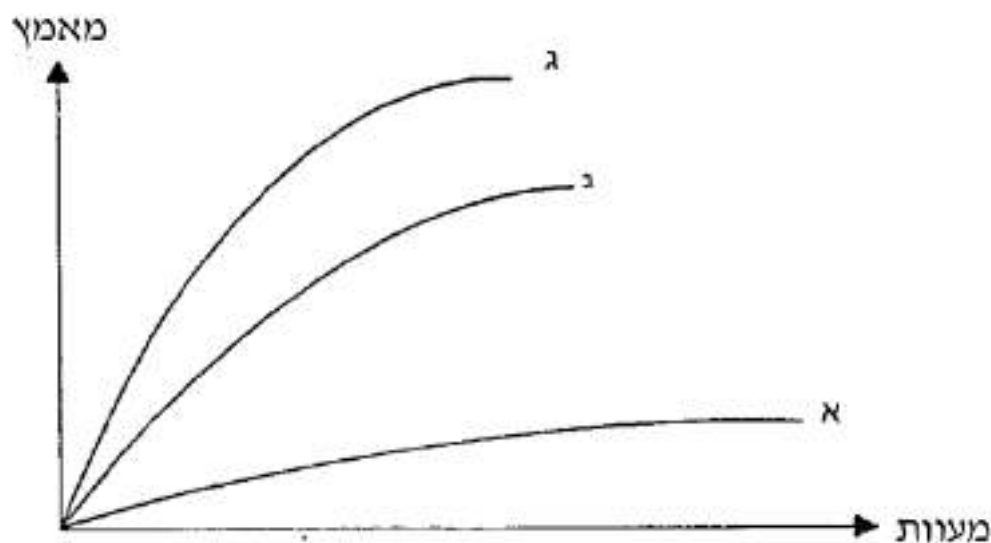
20. חומרים מרוכבים

חומר מרוכב הוא חומר המורכב משני חומרים שונים כאשר האחד הוא חומר הבסיס התופס את מרבית נפח החומר ומחומר משריין המחזק אותו. לחומרים המרוכבים יחס חוזק/משקל גבוה מאד וכיום השימוש בהם נפוץ ביותר במקום האלומיניום וחומרים אחרים.

קיימות מספר קבוצות של חומרים מרוכבים. כאן נטפל בעקרונות של חומרים מרוכבים ובעיקר באותם חומרים המחוזקים בסיבים.

שריין בסיבים:

חומרים מרוכבים מסוג זה הינם הנפוצים ביותר כיום. הם קלים להכנה ולעיבוד ויתרונם העיקרי הוא משקל סגולי נמוך וחוזק רב. בחומרים אלו שבעיקרם פלסטיים אין בעיות שיתוך וניתן לחזקם בסיבי זכוכית, פחם או מתכות שונות.



א. אפוקסי נקי

ב. אפוקסי משריין בסיבי קוורץ

ג. אפוקסי משריין בסיבי זכוכית

עקומות מאמץ-מעוות של אפוקסי