

דף נוסחאות - חלקי מכונות 1

תכן לחוזק (עומס סטטי)

חישוב מאמצים בחתך קריטי שבו יש ריכוז מאמצים

$$\sigma_t = K_{t(t)} \frac{F}{A}$$

$$\sigma_b = K_{t(b)} \frac{M_b \cdot y_{\max}}{I} = K_{t(b)} \frac{M_b}{Z_b}$$

$$Z_b = \frac{\pi A}{32D} (D^4 - d^4)$$

מודול כפיפה עבור צינור

$$\tau_s = K_{ts} \cdot \frac{F}{A}$$

$$\tau_t = K_{t(s)} \frac{M_t \cdot R}{I_p}$$

$$\sigma_{e_{\max}} = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_b)^2 + 3(\tau + \tau_t)^2}$$

$$\sigma_{e_{\max}} \leq \frac{\sigma_y}{n}$$

מאמץ מתיחה/לחיצה (Tension/Compression)

K_f מקדם ריכוז מאמצים עבור מתיחה/לחיצה

כח $F_{[N]}$

שטח החתך $A_{[mm^2]}$

מאמץ כפיפה (Bending Stress)

$K_{t(b)}$ מקדם ריכוז מאמצים עבור כפיפה

מומנט כפיפה $M_{b[N \cdot mm]}$

מרחק מקסימלי מהציר הנייטרלי $y_{\max[mm]}$

מומנט אינרציה סביב ציר הכיפוף $I_{[mm^4]}$

מודול החתך לכפיפה $Z_b[mm^3]$

מאמץ גזירה כתוצאה מכח גזירה (Shear Stress)

מאמץ גזירה בשפות חופשיות הוא אפס

מאמץ גזירה מקסימלי מפתח במרכז השטח

מאמץ גזירה כתוצאה מכח גזירה $\tau_s[MPa]$

$K_{t(s)}$ מקדם ריכוז מאמצים עבור גזירה

כח $F_{[N]}$

שטח החתך $A_{[mm^2]}$

מאמץ גזירה כתוצאה מפיתול (Torsion Stress)

מאמץ גזירה מקסימלי מתפתח בדופן החיצונית (רדיוס הגדול ביותר)

מאמץ גזירה כתוצאה מפיתול $\tau_t[MPa]$

$K_{t(s)}$ מקדם ריכוז מאמצים עבור פיתול

מומנט פיתול $M_{t[N \cdot mm]}$

רדיוס החתך $R_{[mm]}$

מומנט אינרציה פולרי $I_p[mm^4]$

מאמץ שקול מירבי ע"פ פון מיזס

מאמץ שקול מירבי $\sigma_{e_{\max}}[MPa]$

מאמץ נורמלי כתוצאה מתיחה/לחיצה $\sigma_t[MPa]$

מאמץ נורמלי כתוצאה מכפיפה $\sigma_b[MPa]$

מאמץ גזירה כתוצאה מכח גזירה $\tau_s[MPa]$

מאמץ גזירה כתוצאה מפיתול $\tau_t[MPa]$

תנאי חוזק

מאמץ שקול מירבי $\sigma_{e_{\max}}[MPa]$

מאמץ כניעה של החומר $\sigma_y[MPa]$

n מקדם בטיחות נדרש

תכנ להתעייפות (Fatigue) (עומס מחזורי)

$$F_{\min} \leq F \leq F_{\max}$$

$$F_{\text{mean}} = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2}$$

$$\sigma_{m(t)} = K_f \frac{F_{\text{mean}}}{A}$$

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

$$\sigma_{b(m)} = K_f \frac{M_b \cdot y_{\max}}{I}$$

$$F_{\text{amplitude}} = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2}$$

$$\sigma_{t(a)} = K_f \frac{F_a}{A}$$

$$\sigma_{b(a)} = K_f \frac{M_b \cdot y_{\max}}{I}$$

$$\sigma_{m_e} = \sqrt{(\sigma_m)^2 + 3(\tau_m)^2}$$

$$\sigma_{a_e} = \sqrt{(\sigma_a)^2 + 3(\tau_a)^2}$$

כח מחזורי $F_{[N]}$

חישוב כח ממוצע כאשר נתון כח מחזורי

מאמץ ממוצע עבור מתיחה

K_f מקדם ריכוז מאמצים עבור התעייפות

$F_{m[N]}$ כח ממוצע

$A_{[mm^2]}$ שטח החתך

מקדם ריכוז מאמצים עבור התעייפות

K_f מקדם ריכוז מאמצים עבור התעייפות

q מקדם רגישות – שולפים מגרף

K_t מקדם ריכוז מאמצים – שולפים מגרף

מאמץ ממוצע עבור כפיפה

K_f מקדם ריכוז מאמצים עבור התעייפות

$M_{b[N-mm]}$ מומנט כפיפה

$y_{\max[mm]}$ מרחק מקסימלי מהציר הנייטרלי

$I_{[mm^4]}$ מומנט אינרציה סביב ציר הכיפוף

חישוב כח אמפליטודה כאשר נתון כח מחזורי

מאמץ אמפליטודה עבור מתיחה

K_f מקדם ריכוז מאמצים עבור התעייפות

$F_{a[N]}$ כח אמפליטודה

$A_{[mm^2]}$ שטח החתך

מאמץ אמפליטודה עבור כפיפה

K_f מקדם ריכוז מאמצים עבור התעייפות

$M_{b[N-mm]}$ מומנט כפיפה

$y_{\max[mm]}$ מרחק מקסימלי מהציר הנייטרלי

$I_{[mm^4]}$ מומנט אינרציה סביב ציר הכיפוף

מאמץ ממוצע שקול, ע"פ פון מיזס (Von Mises)

$\sigma_{m_e}[MPa]$ מאמץ ממוצע שקול

$\sigma_m[MPa]$ מאמץ ממוצע נורמלי

$\tau_m[MPa]$ מאמץ ממוצע גזירה

מאמץ אמפליטודה שקול, ע"פ פון מיזס (Von Mises)

$\sigma_{m_e}[MPa]$ מאמץ אמפליטודה שקול

$\sigma_a[MPa]$ מאמץ אמפליטודה נורמלי

$\tau_a[MPa]$ מאמץ אמפליטודה גזירה

תכונות מכניות של פלדות פחמניות
(לפי תקן אמריקני)

סימול

טיפול תרמי

גבול ההרס σ_u

גבול הכניעה σ_y

התארכות

קשיות

1	2	3	4	5	6	7	8
AISI No.	Treatment	Temperature °C (°F)	Tensile Strength MPa (kpsi)	Yield Strength, MPa (kpsi)	Elongation, %	Reduction in Area, %	Brinell Hardness
1030	Q&T*	205 (400)	848 (123)	648 (94)	17	47	495
	Q&T*	315 (600)	800 (116)	621 (90)	19	53	401
	Q&T*	425 (800)	731 (106)	579 (84)	23	60	302
	Q&T*	540 (1000)	669 (97)	517 (75)	28	65	255
	Q&T*	650 (1200)	586 (85)	441 (64)	32	70	207
	Normalized	925 (1700)	521 (75)	345 (50)	32	61	149
	Annealed	870 (1600)	430 (62)	317 (46)	35	64	137
1040	Q&T	205 (400)	779 (113)	593 (86)	19	48	262
	Q&T	425 (800)	758 (110)	552 (80)	21	54	241
	Q&T	650 (1200)	634 (92)	434 (63)	29	65	192
	Normalized	900 (1650)	590 (86)	374 (54)	28	55	170
	Annealed	790 (1450)	519 (75)	353 (51)	30	57	149
1050	Q&T*	205 (400)	1120 (163)	807 (117)	9	27	514
	Q&T*	425 (800)	1090 (158)	793 (115)	13	36	444
	Q&T*	650 (1200)	717 (104)	538 (78)	28	65	235
	Normalized	900 (1650)	748 (108)	427 (62)	20	39	217
	Annealed	790 (1450)	636 (92)	365 (53)	24	40	187
1060	Q&T	425 (800)	1080 (156)	765 (111)	14	41	311
	Q&T	540 (1000)	965 (140)	669 (97)	17	45	277
	Q&T	650 (1200)	800 (116)	524 (76)	23	54	229
	Normalized	900 (1650)	776 (112)	421 (61)	18	37	229
	Annealed	790 (1450)	626 (91)	372 (54)	22	38	181/79

$$S_e = C_{load} \cdot C_{size} \cdot C_{surf} \cdot C_{temp} \cdot C_{relib} \cdot B \cdot S_{ut}$$

חוזק גבולי להתעייפות (Endurance) - מאמץ המרבי
שחומר יכול לעמוד בו במספר רב של מחזורים

C_{load} מקדם העמסה

C_{size} מקדם גודל

C_{surf} מקדם טיב פני שטח

C_{temp} מקדם טמפרטורת שירות

C_{relib} מקדם אמינות

B מקדם סוג חומר

S_{ut} חוזק למתיחה

מקדם העמסה C_{load}

עבור כפיפה, או פיתול $C_{load} = 1$

עבור עומס צירי (מתיחה/לחיצה) $C_{load} = 0.7$

מקדם גודל C_{size}

$$C_{size} = 1.2d^{-0.1} = 1.2 \cdot \left(\sqrt{\frac{4A}{\pi}} \right)^{-0.1}$$

עבור קטרים קטנים $C_{size} = 1$, $d \leq 8_{[mm]}$

מקדם טיב פני שטח C_{surf}

שולפים מטבלה,

תלוי בחוזק למתיחה של החומר, ובתהליך הייצור

מקדם טמפרטורה C_{temp}

עבור פלדה בתנאי שירות $C_{temp} = 1$, $T < 450^\circ C$

עבור אלומיניום בתנאי שירות $C_{temp} = 1$, $T < 200^\circ C$

מקדם אמינות C_{relib}

עבור אמינות 50%, $C_{relib} = 1$

עבור אמינות 90%, $C_{relib} = 0.9$

עבור אמינות 99%, $C_{relib} = 0.81$

מקדם סוג חומר B

עבור פלדה $B = 0.5$

עבור אלומיניום $B = 0.4$

מאמץ גבול ההרס $S_{ut[MPa]}$

בהתאם לסוג החומר, והטיפול התרמיים שהוא עבר

$$n_f = \frac{1}{\left(\frac{\sigma_a}{S_e}\right) + \left(\frac{\sigma_m}{S_y}\right)}$$

$$n_f = \frac{1}{\left(\frac{\sigma_a}{S_e}\right) + \left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)}$$

$$n_f = 0.5 \left(\frac{S_{ut}}{\sigma_m} \right)^2 \cdot \frac{\sigma_a}{S_e} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2\sigma_m S_e}{S_{ut} \sigma_a} \right)^2} \right]$$

$$n_f = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{S_y}\right)^2}}$$

מקדם בטיחות להתעייפות – ע"פ סודרברג (Soderberg)

מתאים לכל המתכות, הכי מחמיר

n_f מקדם בטיחות להתעייפות

$\sigma_{a[MPa]}$ מאמץ אמפליטודה

$S_{e[MPa]}$ חוזק גבולי להתעייפות

$\sigma_{m[MPa]}$ מאמץ ממוצע

$S_{y[MPa]}$ מאמץ כניעה (Yield strength)

מקדם בטיחות להתעייפות – ע"פ גודמן (Goodman)

מתאים למתכות צבעוניות פרט לאלומיניום

n_f מקדם בטיחות להתעייפות

$\sigma_{a[MPa]}$ מאמץ אמפליטודה

$S_{e[MPa]}$ חוזק גבולי להתעייפות

$\sigma_{m[MPa]}$ מאמץ ממוצע

$S_{ut[MPa]}$ מאמץ שבר / גבול ההרס (Ultimate Tensile strength)

מקדם בטיחות להתעייפות – ע"פ גרבר (Gerber)

מתאים לאלומיניום, ופלדות

n_f מקדם בטיחות להתעייפות

$\sigma_{a[MPa]}$ מאמץ אמפליטודה

$S_{e[MPa]}$ חוזק גבולי להתעייפות

$\sigma_{m[MPa]}$ מאמץ ממוצע

$S_{ut[MPa]}$ מאמץ שבר / גבול ההרס (Ultimate Tensile strength)

מקדם בטיחות להתעייפות – ע"פ אליפסה (Elliptic)

מתאים לפלדות פחמניות, חומרים משיכים

n_f מקדם בטיחות להתעייפות

$\sigma_{a[MPa]}$ מאמץ אמפליטודה

$S_{e[MPa]}$ חוזק גבולי להתעייפות

$\sigma_{m[MPa]}$ מאמץ ממוצע

$S_{y[MPa]}$ מאמץ כניעה (Yield strength)

תכנן לריתוך

$$\rho_t = \frac{F}{\sum l}$$

$$\rho_s = \frac{F}{\sum l}$$

$$\rho_b = \frac{M_b}{Z_b}$$

$$\rho_T = \frac{M_T \cdot r}{I_0}$$

$$\vec{\rho}_e = \vec{\rho}_t + \vec{\rho}_s + \vec{\rho}_b + \vec{\rho}_T$$

$$|\rho_e| = \sqrt{(\rho_{t_x}, \rho_{t_y})^2 + (\rho_{s_x}, \rho_{s_y})^2 + (\rho_{b_x}, \rho_{b_y})^2 + (\rho_{T_x}, \rho_{T_y})^2}$$

מאמץ מתיחה/לחיצה קווי

מאמץ קווי למתיחה/לחיצה $\rho_t \left[\frac{N}{mm} \right]$

כח $F_{[N]}$

סכום אורכי התפר $\sum l_{[mm]}$

מאמץ גזירה קווי

מאמץ קווי לגזירה $\rho_s \left[\frac{N}{mm} \right]$

כח $F_{[N]}$

סכום אורכי התפר $\sum l_{[mm]}$

מאמץ מתיחה/לחיצה קווי כתוצאה ממומנט כפיפה

מאמץ קווי לכפיפה $\rho_b \left[\frac{N}{mm} \right]$

מומנט כפיפה $M_{b[N \cdot mm]}$

Z_b מומנט התמד קווי (שולפים מטבלה)

מאמץ גזירה קווי כתוצאה ממומנט פיתול

מאמץ קווי לפיתול (בכיוון ניצב לרדיוס) $\rho_T \left[\frac{N}{mm} \right]$

מומנט פיתול M_T

$r_{[mm]}$ מרחק הנקודה הנבדקת ממרכז הכובד של תפר הריתוך

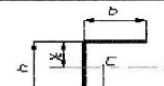
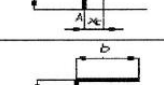
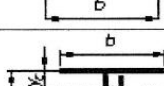
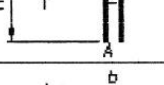
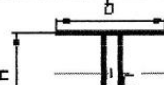
I_0 מומנט התמד פולרי קווי (שולפים מטבלה)

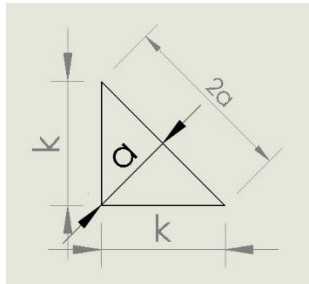
חישוב ווקטור מאמץ קווי שקול מקסימלי בנקודה הקריטית בתפר

(סכום ווקטורי)

ריתוך

טבלת עזר לחישוב מאמצים קווים

צורת הריתוך	מומנט התנגדות Z_b קווי	מומנט התמד קוטבי קווי I_0	מרכז כובד	
	$\frac{h^3}{6}$	$\frac{h^3}{12}$	$x_C=0, y_C=0$	1
	$\frac{h^3}{3}$	$\frac{h(3b^2 + h^2)}{6}$	$x_C=0, y_C=0$	2
	bh	$\frac{b^3 + 3bh^2}{6}$	$x_C=0, y_C=0$	3
	$\frac{h^2(4b+h)}{6(2b+h)}$	$\frac{(b+h)^4 - 6b^2h^2}{12(b+h)}$	$x_C = \frac{b^2}{2b+h}$ $y_C = \frac{h^2}{b+2h}$	4
	$bh + \frac{h^2}{6}$	$\frac{(2b+h)^3}{12} - \frac{b^2(b+h)^2}{2b+h}$	$x_C = \frac{b^2}{2b+h}$ $y_C=0$	5
	$\frac{h^2(2b+h)}{3(b+h)}$ ביחס לנקודה A	$\frac{(b+2h)^3}{12} - \frac{h^2(b+h)^2}{b+2h}$	$x_C=0$ $y_C = \frac{h^2}{b+2h}$	6
	$bh + \frac{h^2}{3}$	$\frac{(b+h)^3}{6}$	$x_C=0, y_C=0$	7
	$\frac{h^2(2b+h)}{3(b+h)}$ ביחס לנקודה A	$\frac{(b+2h)^3}{12} - \frac{h^2(b+h)^2}{b+2h}$	$x_C=0$ $y_C = \frac{h^2}{b+2h}$	
	$\frac{4bh^2 + h^3}{6b + 3h}$ ביחס לנקודה A	$\frac{h^3(4b+h)}{6(b+h)} + \frac{b^3}{6}$	$x_C=0$ $y_C = \frac{h^2}{2(b+h)}$	
	$bh + \frac{h^2}{3}$	$\frac{b^3 + 3bh^2 + h^3}{6}$	$x_C=0, y_C=0$	
	$2bh + \frac{h^2}{3}$	$\frac{2b^3 + 6bh^2 + h^3}{6}$	$x_C=0, y_C=0$	
	$\frac{\pi d^2}{4}$	$\frac{\pi d^3}{4}$	$x_C=0, y_C=0$	8

חישוב עובי תפר מינימלי נדרשעובי התפר $a_{[mm]}$ מאמץ קווי שקול מקסימלי $\rho_{e\max} \left[\frac{N}{mm} \right]$ מאמץ גזירה מותר של החומר $[\tau]_{[MPa]}$ 

$$a > \frac{\rho_{e\max}}{[\tau]}$$

$$k = a\sqrt{2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{\rho_{e\max}}{a}$$

חישוב מידת צלע התפר (תפר פינתי משולש ישר זווית שווה שוקיים)**חישוב מאמץ גזירה מקסימלי בתפר**מאמץ קווי שקול מקסימלי $\rho_{e\max} \left[\frac{N}{mm} \right]$ עובי התפר $a_{[mm]}$ **חישוב מאמץ מותר בתפר ריתוך עבור עומס סטטי**

$$[\sigma_c] = 0.85 \cdot \frac{\sigma_y}{[n]}$$

$$[\sigma_b] = 0.80 \cdot \frac{\sigma_y}{[n]}$$

$$[\sigma_t] = 0.75 \cdot \frac{\sigma_y}{[n]}$$

$$[\tau] = 0.65 \cdot \frac{\sigma_y}{[n]}$$

מאמץ לחיצה מותר

מאמץ כפיפה מותר

מאמת מתיחה מותר

מאמץ גזירה מותר עבור תפר פינתי

מאמץ פיתול מותר עבור תפר פינתי

ברגי הידוק

$$M_{tot} = M_t + M_{f_1}$$

$$M_t = F_t \cdot \frac{d_2}{2} = Q \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\gamma \pm \varphi')$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{p}{\pi d_2}\right)$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\mu}{\cos \alpha}\right)$$

$$\text{Metric Screw thread: } \alpha = \frac{60}{2} = 30_{[\text{deg}]}$$

$$M_{f_1} \cong \frac{Q \mu_1 D_f}{2}$$

$$M_{f_2} = \frac{Q \mu_2 d}{3}$$

מומנט הידוק נדרש של בורג

מומנט סגירה של בורג $M_{tol[N \cdot mm]}$

מומנט חיכוך בתבריג $M_{t[N \cdot mm]}$

מומנט חיכוך בין משטח לראש הבורג $M_{f_1[N \cdot mm]}$

מומנט החיכוך בתבריג (בין כריכות הבורג וההברגה)

מומנט חיכוך בתבריג $M_{t[N \cdot mm]}$

כח הידוק משיקי $F_{t[N]}$

קוטר אפקטיבי של הבורג $d_{2[mm]}$

כח צירי שפועל על הבורג $Q_{[N]}$

זווית המעלה של ההברגה / שיפוע הברגה $\gamma_{[\text{deg}]}$

זווית חיכוך בתבריג $\varphi'_{[\text{deg}]}$

זווית המעלה / שיפוע הברגה

זווית המעלה של ההברגה / שיפוע הברגה $\gamma_{[\text{deg}]}$

פסיעת התבריג $p_{[mm]}$

קוטר אפקטיבי של הבורג $d_{2[mm]}$

זווית חיכוך בתבריג

זווית חיכוך בתבריג $\varphi'_{[\text{deg}]}$

μ מקדם חיכוך בתבריג

זווית פרופיל שן ההברגה $\alpha_{[\text{deg}]}$

מומנט החיכוך בין האום למשטח הגוף המהודק (ביטוי מקורב)

מומנט החיכוך בין האום למשטח המהודק $M_{f_1[N \cdot mm]}$

כח צירי שפועל על הבורג $Q_{[N]}$

μ_1 מקדם חיכוך בין האום למשטח / בין ראש הבורג לחלק

$D_f \cong 1.3d$ קוטר אפקטיבי של האום / ראש הבורג

$d_{[mm]}$ קוטר חיצוני של הבורג

מומנט החיכוך בין משטח קצה הבורג למשטח הנלחץ ע"י הבורג

מומנט החיכוך בין משטח קצה הבורג למשטח הנלחץ ע"י הבורג $M_{f_2[N \cdot mm]}$

$Q_{[N]}$ כח לחיצה שמפעיל הבורג על המשטח

μ_2 מקדם חיכוך בין משטח קצה הבורג למשטח הנלחץ

$d_{[mm]}$ קוטר חיצוני של הבורג

$$\sigma_e \leq [\sigma_t] = \frac{\sigma_y}{[n]}$$

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau_t^2}$$

$$\sigma_t = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi d_1^2}$$

$$\tau_t = \frac{M_t}{Z_0} = \frac{Q \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\gamma \pm \varphi')}{Z_0}$$

$$A \geq \frac{1.25Q}{[\sigma_t]}$$

$$d_1 \geq \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$Q_{\max} = \frac{[\sigma_t]}{\sqrt{\frac{1}{A^2} + 3 \left(\frac{\frac{1}{2} d_2 \cdot \tan(\gamma + \varphi')}{Z_0} \right)^2}}$$

תנאי חוזק עבור בורג

σ_e [MPa] מאמץ שקול (אקוויולנטי) בבורג
 σ_y [MPa] חוזק למתיחה של הבורג
 $[n]$ מקדם בטיחות נדרש

מאמץ שקול בבורג (ע"פ וון מיזס)

σ_e [MPa] מאמץ שקול (אקוויולנטי) בבורג
 σ_t [MPa] מאמץ מתיחה בבורג
 τ_t [MPa] מאמץ גזירה בבורג

מאמץ מתיחה בקנה הבורג

σ_t [MPa] מאמץ מתיחה בבורג
 Q [N] כח צירי שפועל על הבורג
 A [mm²] שטח חתך של ליבת הבורג
 d_1 [mm] קוטר פנימי של הבורג (קוטר ליבת הבורג)

מאמץ גזירה בבורג (כתוצאה מפיתול)

M_t [N·mm] מומנט פיתול שפועל על הבורג – מומנט חיכוך בתבריג
 Z_0 [mm³] מודול החתך הבורג לפיתול

בחירה מוקדמת של מידת הבורג

(עבור 90% מהמקרים, בחירה מוקדמת היא הבחירה הסופית)
 A [mm²] שטח חתך של ליבת הבורג
 Q [N] כח צירי שפועל על הבורג
 $[\sigma_t]$ [MPa] מאמץ מתיחה מותר של חומר הבורג

חישוב כח צירי מקסימלי בבורג

נובע מתנאי חוזק עבור בורג, ומאמץ שקול בבורג

תקן ISO לתברייג מטרי

מידות תברייגי הידוק מטריים חיצוניים לפי ISO (ת"י 665)

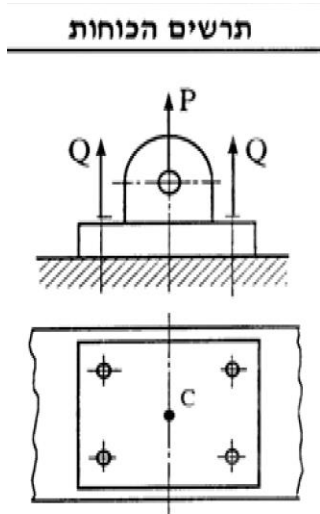
תברייגים רגילים					תברייגים עדינים			
קוטר חיצוני d [mm]	פסיעה p [mm]	שטח חתך מתיחה A [mm ²]	קוטר פנימי d ₁ [mm]	קוטר אפקטיבי d ₂ [mm]	פסיעה p [mm]	שטח חתך מתיחה A [mm ²]	קוטר פנימי d ₁ [mm]	קוטר אפקטיבי d ₂ [mm]
2	0.40	1.79	1.509	1.740				
2.5	0.45	2.98	1.948	2.200				
3	0.5	4.47	2.387	2.675				
3.5	0.6	6.00	2.764	3.110				
4	0.7	7.75	3.141	3.545				
5	0.8	12.7	4.079	4.420				
6	1	17.9	4.773	5.350				
8	1.25	32.8	6.466	7.188	1	36.0	6.773	7.350
10	1.5	52.3	8.160	9.026	1.25	56.3	8.466	9.188
12	1.75	76.3	9.853	10.863	1.25	86.0	10.466	10.647
14	2	104	11.546	12.701	1.5	116	12.160	13.026
16	2	144	13.546	14.701	1.5	157	14.160	15.026
20	2.5	225	16.933	18.376	1.5	259	18.760	19.026
24	3	324	20.319	22.051	2	365	21.546	22.701
30	3.5	519	25.706	27.727	2	596	27.546	28.701
36	4	759	31.092	33.402	2	884	33.546	34.701
42	4	1050	36.779	39.077	2	1230	39.546	40.701
48	5	1380	41.866	44.752	2	1630	45.456	46.701
56	5.5	1910	49.252	52.428	2	2250	53.516	54.701
64	6	2520	56.639	60.639	2	2980	61.546	62.701

Head Marking	Class and Material	Nominal Size Range (mm)	Mechanical Properties		
			Proof Load (MPa)	Min. Yield Strength (MPa)	Min. Tensile Strength (MPa)
Metric bolts					
 8.8	Class 8.8 Medium Carbon Steel, Quenched and Tempered	All Sizes below 16mm	580	640	800
		16mm - 72mm	600	660	830
 10.9	Class 10.9 Alloy Steel, Quenched and Tempered	5mm - 100mm	830	940	1040
 12.9	Class 12.9 Alloy Steel, Quenched and Tempered	1.6mm - 100mm	970	1100	1220
Stainless markings vary. Most stainless is non-magnetic. Usually stamped A-2	A-2 Stainless Steel alloy with 17-19% Chromium and 8-13% Nickel	All Sizes thru 20mm		210 Min. 450 Typical	500 Min. 700 Typical

בורג לא אמור להיות עמוס במאמצי גזירה חיצוניים, אלא להבטיח הידוק מתאים שמונע את תזוזה יחסית בין החלקים.

מקרים נפוצים בחיבור ברגים

$$Q = \frac{P}{i}$$



מקרה 1 – כח P פועל במקביל לציר הברגים, ועובר דרך מרכז הכובד C של החיבור

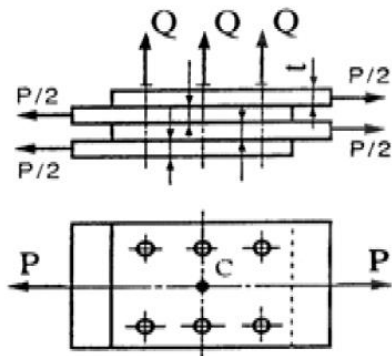
$Q_{[N]}$ כח צירי שפועל על הבורג

i מספר הברגים בחיבור

$P_{[N]}$ עומס (כח) חיצוני

עבור מקרה זה אין חשיבות להידוק הבורג

$$Q = \frac{f_k \cdot P}{i \cdot n \cdot \mu_0}$$



מקרה 2 – כח P פועל בניצב לציר הברגים, ועובר דרך מרכז הכובד של החיבור

א. חיבור עם מרווח בין הבורג לקדח - קדח קצת יותר גדול מהבורג (המקרה הנפוץ)

$Q_{[N]}$ כח צירי שפועל על הבורג

f_k מקדם אי וודאות (מקדם עומס יתר)

$P_{[N]}$ עומס (כח) חיצוני

i מספר הברגים בחיבור

n מספר שטחי מגע

μ_0 מקדם החיכוך בין שטחי המגע

מקרה 2 – כח P פועל בניצב לציר הברגים, ועובר דרך מרכז הכובד של החיבור

ב. חיבור ללא מרווח בין הבורג לקדח (מקרה פחות נפוץ)

$Q_{[N]}$ כח צירי שפועל על הבורג

f_k מקדם אי וודאות (מקדם עומס יתר)

$P_{[N]}$ עומס (כח) חיצוני

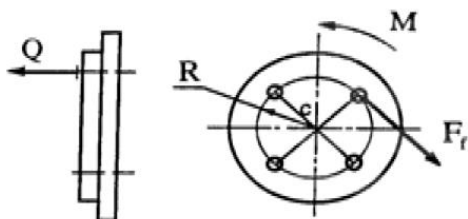
i מספר הברגים

n מספר שטחי מגע

μ_0 מקדם החיכוך בין שטחי המגע

תרשים הכוחות

$$Q = \frac{f_k \cdot M}{i \cdot n \cdot \mu_0 \cdot R}$$



מקרה 3 – מומנט פיתול פועל במישור החיבור

א. הברגים נמצאים במרחק קבוע ממרכז החיבור C

$Q_{[N]}$ כח צירי שפועל על הבורג

f_k מקדם אי וודאות (מקדם עומס יתר)

$M_{[N \cdot mm]}$ מומנט פיתול

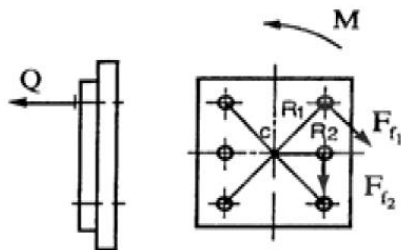
i מספר הברגים

R רדיוס

μ_0 מקדם החיכוך בין שטחי המגע

n מספר שטחי מגע

$$Q_{\max} = \frac{f_k \cdot M \cdot R_{\max}}{i \cdot n \cdot \mu_0 \cdot \sum R_i^2}$$



מקרה 3 – מומנט פיתול פועל במישור החיבור

ב. הברגים נמצאים במרחק שונה ממרכז החיבור C

$Q_{\max[N]}$ כח צירי שפועל על הבורג העמוס ביותר

f_k מקדם אי וודאות (מקדם עומס יתר)

$M_{[N \cdot mm]}$ מומנט

$R_{\max}$ רדיוס מקסימלי (הבורג העמוס ביותר)

i מספר הברגים

n מספר שטחי מגע

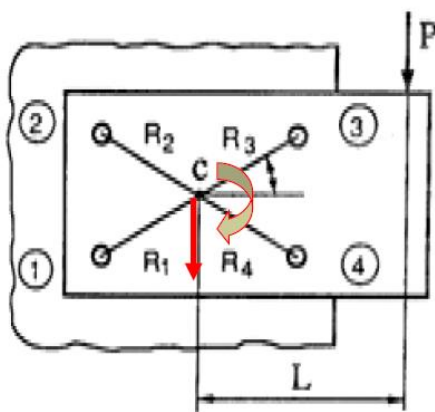
μ_0 מקדם החיכוך בין שטחי המגע

$\sum R_i^2$ סכום של כל הרדיוסים בריבוע

$$Q = Q_p + Q_M$$

$$Q_p = \frac{f_k \cdot P}{i \cdot \mu_0 \cdot n}$$

$$Q_M = \frac{f_k \cdot M \cdot R_{\max}}{n \cdot \mu_0 \cdot \sum R_i^2}$$



מקרה 4 – הכח P פועל בניצב לצירי הברגים

(לא עובר דרך מרכז הכובד C)

$Q_{[N]}$ כח צירי שפועל על הבורג

f_k מקדם אי וודאות (מקדם עומס יתר)

$M_{[N \cdot mm]} = P \cdot L$ מומנט

i מספר הברגים

$R_{\max}$ רדיוס מרחק הבורג הרחוק ביותר מנקודה C

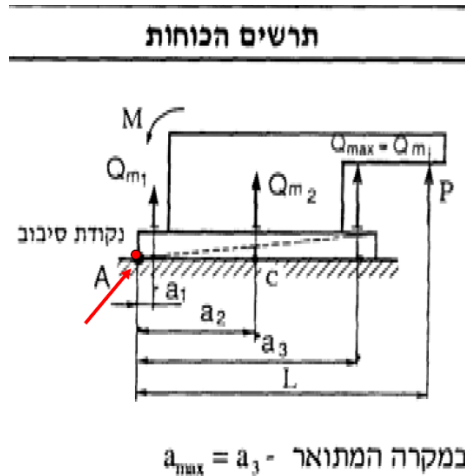
μ_0 מקדם החיכוך בין שטחי המגע של החלקים

n מספר שטחי מגע

$\sum R_i^2$ סכום מרחקי הברגים בריבוע

(כולל הבורג במרחק המקסימלי)

$$Q_{\max} = \frac{f_k \cdot M \cdot a_{\max}}{\sum (a_i^2 \cdot i_i)}$$



מקרה 5 – הכח P (או מומנט M)

פועל במקביל לצירי הברגים

(לא עובר דרך מרכז החיבור C)

$Q_{[N]}$ כח צירי שפועל על הבורג

f_k מקדם אי וודאות (מקדם עומס יתר)

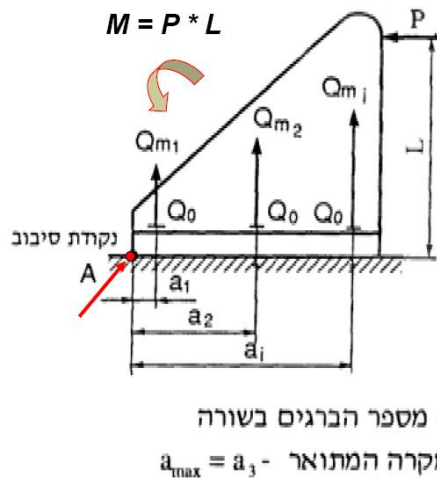
מומנט $M_{[N \cdot mm]} = P \cdot L$

$a_{\max}$ מרחק הבורג הרחוק ביותר מציר הסיבוב
מספר הברגים i

$$Q = Q_P + Q_M$$

$$Q_P = \frac{f_k \cdot P}{\mu_0 \cdot i}$$

$$Q_M = \frac{M \cdot a_{\max} \cdot f_k}{\sum (a_i^2 \cdot i_i)}$$



מקרה 6 – הכח P (או מומנט M)

פועל בניצב לצירי הברגים

(לא עובר דרך מרכז החיבור C)

$Q_{[N]}$ כח צירי שפועל על הבורג

f_k מקדם אי וודאות (מקדם עומס יתר)

$P_{[N]}$ כח אופקי

μ_0 מקדם החיכוך בין שטחי המגע של החלקים

i מספר הברגים שסה"כ מחברים את החלקים

מומנט סביב נקודת הסיבוב $M_{[N \cdot mm]} = P \cdot L$

$a_{\max[mm]}$ מרחק הבורג (או שורת הברגים) הרחוק ביותר

מנקודת הסיבוב

i_i מספר הברגים בכל שורה הנמצאת במרחק a

ברגי הנעה

סוגי תבריגים של ברגי הנעה

תבריג ריבועי ($\alpha = 0^\circ$) (Square Thread)

תבריג טרפזי לא סימטרי (מסור) ($\alpha = 3^\circ$) (Battress Thread)

תבריג טרפזי סימטרי ($\alpha = 15^\circ$) (Trapezoidal Thread)

חישובי חוזק עבור ברגי הנעה בדיוק כמו ברגי הידוק

בדיקת תמירות הבורג

λ תמירות הבורג (קריטריון לבדיקה האם הבורג נמצא בסכנת קריסה)

μ מקדם אחיזת קצוות (בהתאם לסוג הקריסה)

$l_{[mm]}$ אורך מירבי של הבורג

$d_{1[mm]}$ קוטר פנימי של הבורג (קוטר ליבת הבורג)

עבור $\lambda \leq 60$ אין סכנת קריסה

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{0.25d_1}$$

$$Q_{critic} = \frac{\pi^2 E \cdot I}{(\mu \cdot l)^2}$$

חישוב כח קריטי שיגרום לקריסה ע"פ אוילר

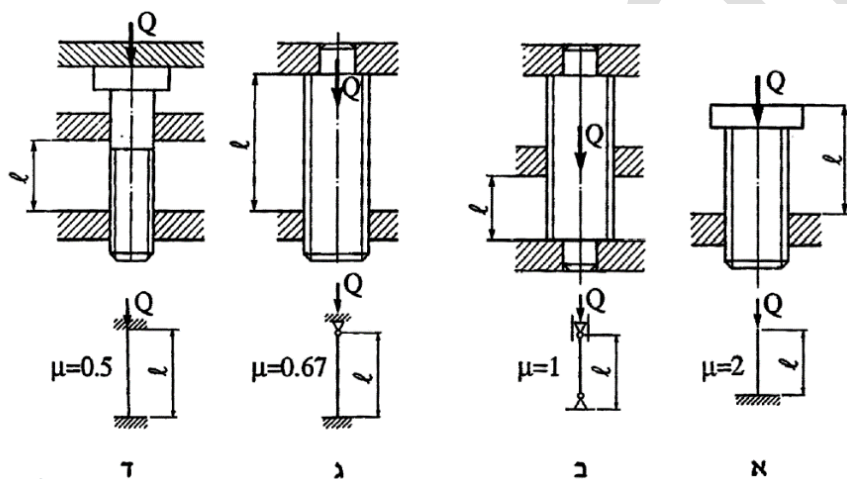
Q_{critic} כח קריטי שיגרום לקריסה

$E_{[MPa]}$ מודול אלסטיות

$I_{[mm^4]} = \frac{\pi d_1^4}{64}$ מומנט אנרציה של חתך הבורג

μ מקדם אחיזת קצוות (בהתאם לסוג הקריסה)

$l_{[mm]}$ אורך מירבי של הבורג



$$Q_{critic} \geq S \cdot Q_{max}$$

$$Q_{max} = \frac{Q_{critic}}{S}$$

תנאי קריסה

Q_{critic} כח קריטי שיגרום לקריסה

S מקדם בטיחות לקריסה

$Q_{max[N]}$ כח צירי מקסימלי שמותר להפעיל על הבורג, מבחינת קריסה

בברגי הנעה האום הוא לא סטנדרטי, ולכן חייבים לתכנן גם אותו

$$H \geq p \cdot n$$

$$H \approx 2d$$

בוחרים את הגובה הגדול מבין השניים

קביעת גובה האום

$H_{[mm]}$ גובה אום

$p_{[mm]}$ פסיעה בתבריג

n מספר כריכות בתבריג האום

d קוטר הבורג

$$n \geq \frac{Q}{A_s \cdot [\tau]}$$

מבחינת גזירה

$$A_s = \pi \cdot d_1 \cdot h$$

$$h_{trapez} = 0.65p$$

$$n \geq \frac{Q}{A_p \cdot [p]}$$

מבחינת מעיכה

$$A_p = 0.25\pi(d^2 - d_1^2)$$

מספר כריכות דרוש בתבריג האום

בוחרים את הערך הגדול מבין השניים

מספר כריכות בתבריג האום n

$Q_{[N]}$ כח צירי שפועל על הבורג

A_s שטח גזירה של שן

$[\tau]$ מאמץ גזירה מותר בחומר האום

A_p שטח היטל טבעתי

$[p]$ לחץ מגע למעיכה

$$P = \frac{M_t \cdot n}{9550}$$

הספק מנוע נדרש להנעת הבורג

$P_{[kW]}$ הספק מנוע

$M_{t[N \cdot m]}$ מומנט

$n_{[RPM]}$ סל"ד מנוע

$$\eta = \frac{Q \cdot h}{M_t \cdot 2\pi} = \frac{\tan(\gamma)}{\tan(\gamma + \phi')}$$

נצילות בורג

η נצילות הבורג

(עבודה מתקבלת לחלק לעבודה משוקעת עברו סיבוב אחד של הבורג)

$Q_{[N]}$ כח צירי שפועל על הבורג

$h_{[mm]}$ מרחק שהבורג נע בסיבוב אחד

$M_{t[N \cdot mm]}$ מומנט פיתול

$Q_{[N]}$ זווית המעלה של ההברגה / שיפוע הברגה

$\phi'_{[deg]}$ זווית חיכוך בתבריג

בדיקת תנאי עצירה עצמית

תנאי עצירה עצמית מתקיים כאשר $\gamma < \phi'$

ממסרות

$$i = \frac{n_{output}}{n_{input}}$$

ממסרת הפחתת מהירות $i < 1$ - מקטינה מהירות סיבוב, מגדילה מומנט
ממסרת הגברת מהירות $i > 1$ - מגדילה מהירות סיבוב, מקטינה מומנט

יחס תמסורת / יחס העברה

i יחס תמסורת

n_{output} סל"ד יוצא

n_{input} סל"ד נכנס

$$i = \frac{n_{output}}{n_{input}} = \frac{Z_{input}}{Z_{output}}$$

יחס תמסורת / יחס העברה – ממסרת גלגל"ש

i יחס תמסורת

Z_{input} מספר שיניים בגלגל מניע (פיניון)

Z_{output} מספר שיניים בגלגל מונע

$$i = \frac{Z_1}{Z_2}$$

יחס תמסורת / יחס העברה – ממסרת גלגל"ש חלזונית

(עבור מצב שבו החילזון מניע)

i יחס תמסורת

Z_1 מספר ההתחלת בחילזון

Z_2 מספר שיניים בגלגל שיניים

$$i = \frac{Z_{input}}{Z_{output}}$$

יחס תמסורת / יחס העברה – ממסרת שרשרת

i יחס תמסורת

Z_{input} מספר שיניים בגלגל מניע

Z_{output} מספר שיניים בגלגל מונע

$$i = \frac{D_{input}}{D_{output}}$$

יחס תמסורת / יחס העברה – ממסרת רצועה

i יחס תמסורת

D_{input} קוטר גלגל מניע

D_{output} קוטר גלגל מונע

$$M_{t_{output}} = \frac{M_{t_{input}} \cdot \eta}{i}$$

הקשר בין מומנט ליחס תמסורת

$M_{t_{output}}$ מומנט יוצא מהתמסורת

η נצילות התמסורת

$M_{t_{input}}$ מומנט נכנס מהתמסורת

i יחס תמסורת

$$n = \frac{v \cdot 60,000}{\pi D}$$

$$v = \frac{\pi D n}{60,000}$$

$$P = \frac{M_t \cdot n}{9550}$$

$$P_{input} = \frac{P_{output}}{\eta_{tot}}$$

$$M_t = \frac{P}{\omega} = \frac{1000P}{\frac{2\pi}{60} \cdot n} = \frac{9550P}{n}$$

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}}$$

$$\eta_{total} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots \eta_n$$

נצילות כוללת של כל המערכת – כפל נצילויות

סל"ד גלגל

סל"ד $n_{[RPM]}$

מהירות משיקית $v_{\left[\frac{m}{s}\right]}$

קוטר חיצוני גלגל $D_{[mm]}$

מהירות משיקית גלגל

מהירות משיקית $v_{\left[\frac{m}{s}\right]}$

קוטר חיצוני גלגל $D_{[mm]}$

סל"ד $n_{[RPM]}$

הספק מנוע

הספק מנוע $P_{[kW]}$

מומנט $M_{t[N \cdot m]}$

סל"ד מנוע $n_{[RPM]}$

הספק מנוע

הספק מנוע P_{input}

הספק שדורש הצרכן P_{output}

η נצילות כוללת

מומנט

מומנט $M_{t[N \cdot m]}$

הספק $P_{[kW]}$

מהירות זוויתית $\omega_{\left[\frac{rad}{sec}\right]}$

סל"ד $n_{[RPM]}$

נצילות תמסורת

נצילות תמסורת η

הספק יוצא P_{output}

הספק נכנס P_{input}

גלגלי שיניים

$$D = Z \cdot m$$

גלגל שיניים – קוטר מעגל החלוקה

$D_{[mm]}$ קוטר מעגל החלוקה

Z מספר שיניים בגלגל"ש

$m_{[mm]}$ מודול הגלגל"ש

$$m = \frac{p}{\pi}$$

גלגל שיניים – מודול השן

$m_{[mm]}$ מודול הגלגל"ש

$p_{[mm]}$ פסיעת השן – מרחק בין 2 שיניים (אורך הקשת בין השיניים על מעגל החלוקה)

$$F_t = \frac{2M_t}{D} = \frac{2M_t}{m \cdot Z}$$

כח משיקי – כח שמעביר מומנט
גלגל מניע – כח משיקי פועל נגד הסיבוב שלו

כוח שילוב משיקי – גלגל"ש שיניים ישרות

$M_{t[N \cdot mm]}$ מומנט

$D_{[mm]}$ קוטר מעגל החלוקה (גלגל קטן)

$m_{[mm]}$ מודול הגלגל"ש

Z מספר שיניים בגלגל"ש

$$F_r = F_t \cdot \tan(\alpha)$$

כח שילוב רדיאלי פועל מנקודת השילוב לכיוון המרכז

כוח שילוב רדיאלי – גלגל"ש שיניים ישרות

$F_{r[N]}$ כח שילוב רדיאלי

$F_{t[N]}$ כח שילוב משיקי

$\alpha_{[deg]}$ זווית תשלוּב

$$F = \frac{F_t}{\cos(\alpha)}$$

כוח שילוב שקול – גלגל"ש שיניים ישרות

$F_{[N]}$ כח שילוב שקול

$F_{t[N]}$ כח שילוב משיקי

$\alpha_{[deg]}$ זווית תשלוּב

$$F_t = \frac{2M_t}{D} = \frac{2M_t}{m_s \cdot Z}$$

כוח שילוב משיקי – גלגל"ש שיניים משופעות

$F_{t[N]}$ כח שילוב משיקי

$M_{t[N \cdot mm]}$ מומנט

$D_{[mm]}$ קוטר מעגל החלוקה

$m_{s[mm]}$ מודול חזיתי של הגלגל"ש

$$F_r = F_t \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\cos(\beta)}$$

כוח שילוב רדיאלי – גלגל"ש שיניים משופעות

$F_{r[N]}$ כח שילוב רדיאלי

$F_{t[N]}$ כח שילוב משיקי

$\alpha_{[deg]}$ זווית תשלוּב

$\beta_{[deg]}$ זווית שיפוע השן

$$F_a = F_t \cdot \tan(\beta)$$

כוח שילוב צירי – גלגל"ש שיניים משופעות

$F_{a[N]}$ כח שילוב צירי

$F_{t[N]}$ כח שילוב משיקי

$\beta_{[deg]}$ זווית שיפוע השן

תמסורת חלזונית

$$i = \frac{Z_{\text{worm}}}{Z_{\text{worm wheel}}}$$

$$Z_{\text{worm}} = 1, 2, 3, 4$$

$$F_{t1} = \frac{2M_{t1}}{d}$$

$$d = q \cdot m_a$$

$$F_r = F_{t2} \cdot \tan(\alpha_a) = \frac{F_{t1}}{\tan(\gamma + \phi')} \cdot \tan(\alpha_a)$$

$$F_{a1} = \frac{2M_{t2}}{D} = \frac{F_{t1}}{\tan(\gamma + \phi')}$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{Z_1 \cdot m_a}{d}\right)$$

$$\phi' = \arctan\left(\frac{\mu}{\cos(\alpha_n)}\right)$$

תמסורת חלזונית – יחס תמסורת

i יחס תמסורת

Z_{worm} מספר התחלות בחילזון

$Z_{\text{worm wheel}}$ מספר שיניים בגלגל החלזוני

כוח שילוב משיקי – תמסורת חלזונית

$F_{t1[N]}$ כח שילוב משיקי

$M_{t1[N \cdot mm]}$ מומנט בחילזון

$d_{[mm]}$ קוטר מעגל החלוקה

$m_{a[mm]}$ מודול חזיתי של הגלגל"ש

q מאפיין הקוטר

כוח שילוב רדיאלי – תמסורת חלזונית

$F_{r[N]}$ כח שילוב רדיאלי

$F_{t2[N]}$ כח שילוב משיקי בגלגל החילזון

$\alpha_{a[deg]}$ זווית שילוב צירית

$F_{t1[N]}$ כח שילוב משיקי בחילזון

$\gamma_{[deg]}$ זווית המעלה של החילזון

$\phi'_{[deg]}$ זווית החיכוך המדומה

כוח שילוב צירי – תמסורת חלזונית

$F_{a[N]}$ כח שילוב צירי

$M_{t2[N]}$ מומנט בגלגל החלזוני

$D_{[mm]}$ קוטר מעגל חלוקה

$F_{t1[N]}$ כח שילוב משיקי בחילזון

$\gamma_{[deg]}$ זווית המעלה של החילזון

$\phi'_{[deg]}$ זווית החיכוך המדומה

זווית המעלה – תמסורת חלזונית

$\gamma_{[deg]}$ זווית המעלה של החילזון

Z_1 מספר התחלות בחילזון

m_a מודול צירי

$d_{[mm]}$ קוטר מעגל החלוקה

זווית החיכוך המדומה – תמסורת חלזונית

$\phi'_{[deg]}$ זווית החיכוך המדומה

μ מקדם החיכוך בתבריג בין החילזון לגלגל החלזוני (מקדם חיכוך נמוך משל ברגים)

$\alpha_{n[deg]}$ זווית שילוב נורמלית

$$\eta = \frac{\tan(\gamma)}{\tan(\gamma + \varphi')}$$

נצילות השילוב – תמסורת חלזונית

η נצילות השילוב

$\gamma_{[\text{deg}]}$ זווית המעלה של החילזון

$\varphi'_{[\text{deg}]}$ זווית החיכוך המדומה

Guyaros

תמסורת רצועה

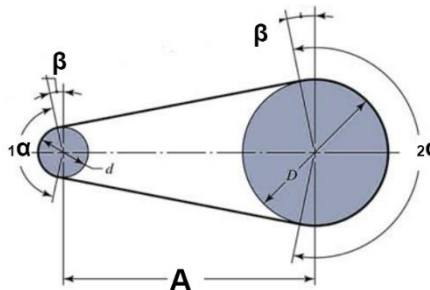
$$i = \frac{n_{output}}{n_{input}} = \frac{d(1-\xi)}{D} \approx \frac{d}{D}$$

$$\xi = 0.01 \div 0.02$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{D-d}{2A}\right)$$

$$\alpha = 180 \pm 2\beta$$

זווית חביקה
 β זווית שיפוע של הרצועה



$$F_t = \frac{2M_t \cdot 10^3}{d} \cdot k = S_1 - S_2$$

$$S_2 = S_1 - F_t$$

$$S_1 = \frac{F_t \cdot e^{\mu \cdot \alpha_1}}{e^{\mu \cdot \alpha_1} - 1}$$

$$S_1 = \frac{F_t \cdot e^{\mu' \cdot \alpha_1}}{e^{\mu' \cdot \alpha_1} - 1}$$

$$\mu' = \frac{\mu}{\sin(\gamma)}$$

מקדם חיכוך מדומה
 μ' מקדם חיכוך מדומה
 μ מקדם חיכוך
 γ זווית הטריז של הרצועה

$$Q = S_1 + S_2$$

יחס תמסורת – רצועה טריזית

i יחס תמסורת
 n_{output} סל"ד גלגל מונע
 n_{input} סל"ד גלגל מניע
 $d_{[mm]}$ קוטר גלגל קטן
 $D_{[mm]}$ קוטר גלגל גדול
 ξ מקדם החלקה

זווית שיפוע של הרצועה

β זווית שיפוע של הרצועה
 $D_{[mm]}$ קוטר גלגל גדול
 $d_{[mm]}$ קוטר גלגל קטן
 $A_{[mm]}$ מרחק בין צירי הגלגלים

כח משיקי – רצועה שטוחה/תזמון/טריזית

$F_{t[N]}$ כח משיקי
 $M_{t[N \cdot m]}$ מומנט סיבוב
 $d_{[mm]}$ קוטר גלגל קטן
 k מקדם שרות
 $S_{1[N]}$ כח מתיחה בענף פעיל
 $S_{2[N]}$ כח מתיחה בענף סביל

כח מתיחה בענף פעיל – רצועה שטוחה/תזמון

$S_{1[N]}$ כח מתיחה בענף פעיל
 $F_{t[N]}$ כח משיקי
 μ מקדם חיכוך
 $\alpha_{1[rad]}$ זווית חביקה

כח מתיחה בענף פעיל – רצועה טריזית

$S_{1[N]}$ כח מתיחה בענף פעיל
 $F_{t[N]}$ כח משיקי
 μ' מקדם חיכוך מדומה
 $\alpha_{1[rad]}$ זווית חביקה

חישוב עומס על הציר

$Q_{[N]}$ עומס על הציר
 $S_{1[N]}$ כח מתיחה בענף פעיל
 $S_{2[N]}$ כח מתיחה בענף סביל

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n_1}{60,000}$$

מהירות הרצועה

מהירות הרצועה $v_{\left[\frac{m}{s}\right]}$

קוטר הגלגל הקטן $d_{[mm]}$

סל"ד גלגל קטן $n_{1[RPM]}$

$$P_e = k_d \cdot P = k_d \cdot \frac{M_t \cdot n}{9550}$$

חישוב הספק אפקטיבי נדרש של רצועה

הספק אפקטיבי נדרש של הרצועה $P_{e[kW]}$

k_d מקדם שירות (שולפים מטבלה, בהתאם לסוג ההנעה והעומס)

מומנט $M_{t[N \cdot m]}$

סל"ד גלגל $n_{[RPM]}$

$$M_t = \frac{9550P}{n}$$

חישוב מומנט של גלגל

הספק $P_{[kW]}$

מומנט $M_{t[N \cdot m]}$

סל"ד גלגל $n_{[RPM]}$

$$N = \frac{P_e}{(P' + B) \cdot G \cdot C_L}$$

$$N = \frac{P_e}{P'}$$

חישוב מספר רצועות נדרש

מספר רצועות נדרש N

הספק אפקטיבי נדרש של הרצועה $P_{e[kW]}$

P' הספק שמסוגלת להעביר רצועה אחת

B

G מקדם זווית חביקה

C_L מקדם אורך הרצועה

$$T_s = 450 \frac{R - G}{G} \cdot \frac{P}{N \cdot v} + M \cdot v^2$$

חישוב מתיחות הרצועה הנדרש

המתיחות הסטטית לרצועה $T_{s[N]}$

R מקדם מתיחות

G מקדם זווית חביקה

$P_{[kW]}$ הספק נומינלי

N מספר הרצועות

מהירות הרצועה $v_{\left[\frac{m}{s}\right]}$

M מקדם גודל חתך הרצועה

$$Q = 2T_s \cdot N \cdot \cos(\beta)$$

חישוב עומס סטטי על הצירים

עומס צירי על הצירים $Q_{[N]}$

המתיחות הסטטית לרצועה $T_{s[N]}$

N מספר הרצועות

β זווית שיפוע של הרצועה

גלים

$$d_{\min} \geq (130 \div 160) \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n}}$$

$$d_{\min} \geq \sqrt[3]{\frac{32M_e}{\pi \cdot [\sigma]}}$$

$$M_e = \sqrt{(K_{fb} \cdot M_b)^2 + 0.75(K_{fs} \cdot M_t)^2}$$

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

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot [n]}{\pi} \cdot \sqrt{4 \left(\frac{k_f \cdot M_{a(b)}}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{fs} \cdot M_{a(tr)}}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{k_f \cdot M_{m(b)}}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{fs} \cdot M_{m(tr)}}{S_y} \right)^2}}$$

חישוב קוטר מינימלי של גל מבחינת חוזק (שיטה מקורבת)

$d_{\min[mm]}$ קוטר מינימלי של הגל

$P_{[kW]}$ הספק שהגל מעביר

$n_{[RPM]}$ סל"ד הגל

חישוב קוטר מינימלי של גל מבחינת התעייפות (שיטה מקורבת)

$d_{\min[mm]}$ קוטר מינימלי של הגל

$M_{e[N \cdot mm]}$ מומנט שקול

$[\sigma]_{[MPa]}$ מאמץ מותר להתעייפות (מקורב)

מומנט שקול (שילוב של מומנט כפיפה עם מומנט פיתול)

$M_{e[N \cdot mm]}$ מומנט שקול

K_{fb} מקדם ריכוז מאמצים עבור כפיפה

$M_{b[N \cdot mm]}$ מומנט כפיפה

K_{fs}

$M_{t[N \cdot mm]}$ מומנט פיתול

מאמץ מותר להתעייפות (חישוב מקורב)

$[\sigma]_{[MPa]}$ מאמץ מותר להתעייפות (מקורב)

$\sigma_{y[MPa]}$

S מקדם בטיחות עבור חישוב מקורב של התעייפות

חישוב קוטר מינימלי (שיטה מדויקת)

$d_{\min[mm]}$ קוטר מינימלי של הגל

$[n]$ מקדם בטיחות נדרש

k_f מקדם ריכוז מאמצים לכפיפה

$M_{a(b)}$ מומנט אמפליטודה לכפיפה

S_e חוזק גבולי להתעייפות

k_{fs} מקדם ריכוז מאמצים לגזירה/פיתול

$M_{a(tr)}$ מומנט אמפליטודה לפיתול

S_e חוזק גבולי להתעייפות

$M_{m(b)}$ מומנט ממוצע לכפיפה

S_y גבול הכניעה של החומר

$M_{m(tr)}$ מומנט ממוצע לפיתול

בדיקת גל להתעייפות

על הגל פועלים מאמצי כפיפה סימטריים + מאמץ פיתול.
בהנחה שהמאמץ פיתול הוא קבוע, הדבר דומה למחזור מאמצים פועם.

$$\sigma_b = \sqrt{\sigma_{b_x}^2 + \sigma_{b_y}^2 + \sigma_{b_z}^2}$$

חישוב מומנט כפיפה שקול שפועל בחתך המסוכן

σ_b [MPa] מאמץ כפיפה שקול שפועל בחתך

σ_{b_x} [MPa] מאמץ כפיפה שפועל בציר x

σ_{b_y} [MPa] מאמץ כפיפה שפועל בציר y

σ_{b_z} [MPa] מאמץ כפיפה שפועל בציר z

$$\sigma_{b(a)} = K_{fb} \cdot \frac{M_b}{Z_b}$$

חישוב מאמץ כפיפה אמפליטודה

$\sigma_{b(a)}$ [MPa] מאמץ כפיפה אמפליטודה

K_{fb} מקדם ריכוז מאמצים עבור כפיפה

M_b [N·mm] מומנט כפיפה שקול

$Z_b = \frac{\pi d^3}{32}$ מודול החתך לכפיפה

$$\sigma_{a_e} = \sqrt{(\sigma_a)^2 + 3(\tau_a)^2}$$

מאמץ אמפליטודה שקול, ע"פ פון מיזס (Von Mises)

σ_{m_e} [MPa] מאמץ אמפליטודה שקול

σ_a [MPa] מאמץ אמפליטודה נורמלי

τ_a [MPa] מאמץ אמפליטודה גזירה

$$\tau_{t(m)} = K_{ft} \cdot \frac{M_t}{Z_0}$$

חישוב מאמץ ממוצע גזירה - כתוצאה מפיתול

τ_t [MPa] מאמץ גזירה כתוצאה מפיתול

K_{ft} מקדם ריכוז מאמצים עבור פיתול

M_t [N·mm] מומנט פיתול

$Z_0 = \frac{\pi d^3}{16}$ מודול החתך לפיתול

$$\sigma_{m_e} = \sqrt{(\sigma_m)^2 + 3(\tau_m)^2}$$

מאמץ ממוצע שקול, ע"פ פון מיזס (Von Mises)

σ_{m_e} [MPa] מאמץ ממוצע שקול

σ_m [MPa] מאמץ ממוצע נורמלי

τ_m [MPa] מאמץ ממוצע גזירה

$$n_f = \frac{1}{\left(\frac{\sigma_{a_e}}{S_e}\right) + \left(\frac{\sigma_{m_e}}{S_y}\right)}$$

$$n_f = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_{a_e}}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{m_e}}{S_y}\right)^2}}$$

$$n_y = \frac{\sigma_y}{\sigma_{a_e} + \sigma_{m_e}}$$

חישוב מקדם בטיחות להתעייפות – ע"פ סודרברג (Soderberg)

מתאים לכל המתכות, הכי מחמיר

n_f מקדם בטיחות להתעייפות

$\sigma_{a[MPa]}$ מאמץ אמפליטודה שקול

$S_{e[MPa]}$ חוזק גבולי להתעייפות

$\sigma_{m[MPa]}$ מאמץ ממוצע שקול

$S_{y[MPa]}$ מאמץ כניעה של החומר (Yield strength)

חישוב מקדם בטיחות להתעייפות – ע"פ אליפסה (Elliptic)

מתאים לפלדות פחמניות, חומרים משיכים

n_f מקדם בטיחות להתעייפות

$\sigma_{a[MPa]}$ מאמץ אמפליטודה שקול

$S_{e[MPa]}$ חוזק גבולי להתעייפות

$\sigma_{m[MPa]}$ מאמץ ממוצע שקול

$S_{y[MPa]}$ מאמץ כניעה (Yield strength)

חישוב מקדם בטיחות לחוזק

n_y מקדם בטיחות לחוזק

$\sigma_{y[MPa]}$ מאמץ כניעה (Yield strength)

$\sigma_{a[MPa]}$ מאמץ אמפליטודה שקול

$\sigma_{m[MPa]}$ מאמץ ממוצע שקול

מסבים

$$C = P \cdot L^{\frac{1}{a}} \cdot f_w \cdot f_t < C_{\text{catalogue}}$$

חישוב כושר דינמי נדרש של מיסב

$C_{[N]}$ כושר דינמי נדרש של מיסב

$P_{[N]}$ עומס על מיסב

$L_{[10^6 \text{ rev}]}$ אורך חיים של מיסב

a מקדם צורת גוף

f_w מקדם עומס דינמי

f_t מקדם טמפרטורה

$C_{\text{catalogue}}$ כושר דינמי לפי קטלוג היצרן

$$P = F_r = \sqrt{R_{A_x}^2 + R_{A_y}^2}$$

עבור מיסב נייד – מיסב שעמוס בכח רדיאלי בלבד.
את הכח הרדיאלי מחשבים בעזרת שקול כוחות התגובה
שהוא מפעיל על הגל

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

עבור מיסב ניח – מיסב שעמוס בכח רדיאלי וגם בעומס צירי.
את המקדמים X, Y שולפים מטבלה

חישוב עומס על מיסב

$P_{[N]}$ עומס על מיסב

$F_{r[N]}$ כח רדיאלי

$F_{a[N]}$ כח צירי

מקדם צורת גוף גלילה

a מקדם צורת גוף

$$a_{\text{ball}} = 3$$

$$a_{\text{cylinder/Cone}} = \frac{10}{3}$$

$$L = L_h \cdot n \cdot 60 \cdot 10^{-6}$$

אורך חיים של מיסב

$L_{[10^6 \text{ rev}]}$ אורך חיים של מיסב

$L_{h[hr]}$ אורך חיים של מיסב בשעות עבודה

$n_{[RPM]}$ מהירות סיבוב של הגל

f_x מקדם העומס הדינמי

מקדם העומס הדינמי f_x	דוגמות שימוש	תנאי העבודה
1 + 1.2	מנועים חשמליים, מכונות עיבוד, מאווררים ומוגנים	עבודה רצופה, ללא תנודות וחבטות
1.2 + 1.5	ממסרים גלגלי שיניים, מדחסים, מתקני הרמה,	עבודה עם תנודות בינוניות
3.0 + 1.5	מכונות ערגול, ממסרות רצועה, מנועי שריפה פנימית	עבודה עם תנודות וחבטות

f_t מקדם הטמפרטורה

300	250	200	< 150	טמפרטורת העבודה של המסב [$^{\circ}\text{C}$]
1.7	1.3	1.1	1.0	מקדם הטמפרטורה f_t

מקדם עומס דינמי

f_w מקדם עומס דינמי

מקדם טמפרטורה

f_t מקדם טמפרטורה

מצמידים

$$M_e = k_0 \cdot M_t$$

$$M_t = \frac{9550P}{n}$$

$$k_0 = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

$$M_f \geq M_e$$

$$e = \frac{d}{D}$$

$$F_{pistone} = P \cdot A$$

חישוב מומנט אפקטיבי

מומנט אפקטיבי $M_{e[N \cdot m]}$

k_0 מקדם שרות

מומנט עבודה $M_{t[N \cdot m]}$

חישוב מומנט עבודה

הספק $P_{[kW]}$

מומנט $M_{t[N \cdot m]}$

$n_{[RPM]}$ סל"ד גלגל

מקדם שרות

k_0 מקדם שרות

k_1 מקדם עומס דינמי

k_2 מקדם מס' התנעות

k_3 מקדם טמפרטורה

תנאי העברת מומנט

M_f מומנט חיכוך

מומנט אפקטיבי $M_{e[N \cdot m]}$

יחס קטרים

e יחס קטרים

$d_{[mm]}$ קוטר מינימלי של הדיסקה (קוטר פנימי)

$D_{[mm]}$ קוטר מקסימלי של הדיסקה (קוטר חיצוני)

כח שמפעילה בוכנה

$F_{pistone[N]}$ כח בוכנה

$P_{[MPa]}$ לחץ שפועל על הבוכנה

$A_{[mm^2]} = \frac{\pi D^2}{4}$ שטח חתך הבוכנה

$$p_{\max} = \frac{2F_a}{\pi d(D-d)}$$

$$p_{\max} \leq [p]$$

$$M_f = \mu \cdot F_a \cdot R_f \cdot n = (\mu) \cdot \left(\frac{\pi d p_{\max}}{2} (D-d) \right) \cdot \left(\frac{D+d}{4} \right) \cdot (n)$$

$$F_a = \frac{\pi d p_{\max}}{2} (D-d) = \frac{M_f}{\mu \cdot n \cdot R_f}$$

$$R_f = \frac{D+d}{4}$$

לחץ מגע מקסימלי עבור מצמד בלאי קבוע (דיסקיות עבות)

$p_{\max}$ [MPa] לחץ מגע מקסימלי

F_a [N] כח הצמדה (כח נורמלי)

d [mm] קוטר מינימלי של הדיסקה (קוטר פנימי)

D [mm] קוטר מקסימלי של הדיסקה (קוטר חיצוני)

תנאי חוזק ללחץ מגע מותר עבור מצמד בלאי קבוע (דיסקיות עבות)

$p_{\max}$ לחץ מגע מקסימלי

$[p]$ לחץ מגע מותר

מומנט חיכוך עבור מצמד בלאי קבוע (דיסקיות עבות)

M_f [N·mm] מומנט חיכוך

μ מקדם חיכוך

d [mm] קוטר מינימלי של הדיסקה (קוטר פנימי)

$p_{\max}$ [MPa] לחץ מגע מקסימלי

D [mm] קוטר מקסימלי של הדיסקה (קוטר חיצוני)

F_a [N] כח הצמדה (כח נורמלי)

R_f [mm] רדיוס חיכוך

n מספר שטחי מגע

כח הצמדה עבור מצמד בלאי קבוע

F_a [N] כח הצמדה (כח נורמלי)

$p_{\max}$ [MPa] לחץ מגע מקסימלי

D [mm] קוטר מקסימלי של הדיסקה (קוטר חיצוני)

d [mm] קוטר מינימלי של הדיסקה (קוטר פנימי)

M_f [N·mm] מומנט חיכוך

μ מקדם חיכוך

n מספר שטחי מגע

R_f [mm] רדיוס חיכוך

רדיוס חיכוך עבור מצמד בלאי קבוע (דיסקיות עבות)

R_f [mm] רדיוס חיכוך

D [mm] קוטר מקסימלי של הדיסקה (קוטר חיצוני)

d [mm] קוטר מינימלי של הדיסקה (קוטר פנימי)

$$p_{\max} = \frac{4F_a}{\pi(D^2 - d^2)}$$

$$p_{\max} \leq [p]$$

$$M_f = \mu \cdot F_a \cdot R_f \cdot n$$

$$F_a = \pi \left(\frac{D^2 - d^2}{4} \right) \cdot p_{\max}$$

$$R_f = \frac{1}{3} \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2}$$

לחץ מקסימלי עבור מצמד לחץ שטח קבוע (דיסקיות דקות)

$p_{\max}$ [MPa] לחץ מגע מקסימלי

F_a [N] כח הצמדה (כח נורמלי)

D [mm] קוטר מקסימלי של הדיסקה (קוטר חיצוני)

d [mm] קוטר מינימלי של הדיסקה (קוטר פנימי)

תנאי חוזק ללחץ מגע מותר עבור מצמד לחץ שטח קבוע (דיסקיות דקות)

$p_{\max}$ [MPa] לחץ מגע מקסימלי

$[p]$ לחץ מגע מותר

מומנט חיכוך עבור מצמד לחץ שטח קבוע (דיסקיות דקות)

M_f [N·mm] מומנט חיכוך

μ מקדם חיכוך

d [mm] קוטר מינימלי של הדיסקה (קוטר פנימי)

$p_{\max}$ [MPa] לחץ מגע מקסימלי

D [mm] קוטר מקסימלי של הדיסקה (קוטר חיצוני)

F_a [N] כח הצמדה (כח נורמלי)

R_f [mm] רדיוס חיכוך

כח הצמדה עבור מצמד לחץ שטח קבוע

F_a [N] כח הצמדה (כח נורמלי)

$p_{\max}$ [MPa] לחץ מגע מקסימלי

D [mm] קוטר מקסימלי של הדיסקה (קוטר חיצוני)

d [mm] קוטר מינימלי של הדיסקה (קוטר פנימי)

M_f [N·mm] מומנט חיכוך

μ מקדם חיכוך

n מספר שטחי מגע

R_f [mm] רדיוס חיכוך

רדיוס חיכוך עבור מצמד לחץ שטח קבוע (דיסקיות דקות)

R_f [mm] רדיוס חיכוך

D [mm] קוטר מקסימלי של הדיסקה (קוטר חיצוני)

d [mm] קוטר מינימלי של הדיסקה (קוטר פנימי)