

משרד העבודה, הרווחה והשירותים החברתיים
אגף בכיר להכשרה ולפיתוח כח אדם
מה"ט - המכון הממשלתי להכשרה בטכנולוגיה ובמדע



הטכניון
מכון טכנולוגי לישראל

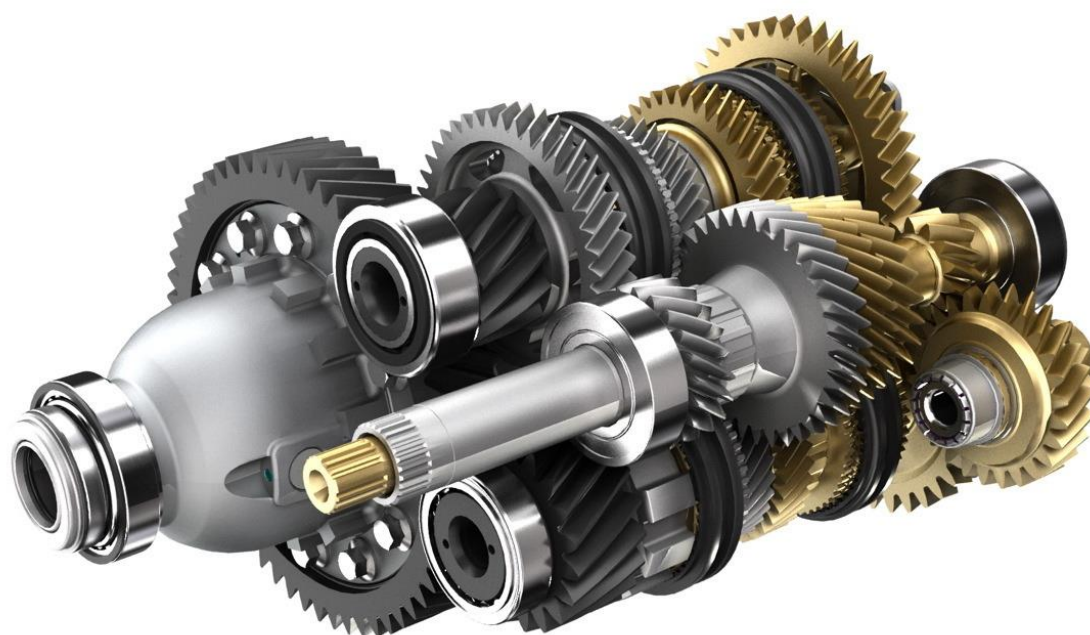
בית הספר הארצי להנדסאים (ע"ר)

מגמת מכונות-המצבה לחלקי מכונות

המעבדה לחלקי מכונות

חוברת מבוא

מגמת מכונות



מאת: ניר וודובוז

ביה"ס הארצי להנדסאים

קרית הטכניון, חיפה



המעבדה לחלקי מכוונות

תרגילי המעבדה וסדר העבודה

במעבדה נערכים במשך סמסטר אחד 6 תרגילים שמחולקים ל-3 נושאים:

- א. ברגים ומחברי ברגים: 1. מחבר חיכוך מוברג 2. חלוקת העומס בין ברגי מחבר רגיל טורי.
 - ב. תופעות בחלקי מכוונות סובבים: 3. איזון חלקים סובבים 4. מהירות סיבוב קריטית.
 - ג. ממסרות סגורות: 5. נצילות (מכנית) של ממסרת גלגלי שיניים 6. ממסרת חלזונית.
- בכל אחד מהתרגילים כלול גם נושא משני או יותר שיש להם קשר לתרגיל או לציווד המשמש בו.
- ביצוע והגשה:**

ביצוע כל תרגיל במשך שיעורי המעבדה בצוותים של 2-3 תלמידים.

הגשת הדו"ח אישית, כוללת תוצאות הביצוע בשיעור ותשובות לשאלות בדפי התרגיל כשיעורי בית. את רוב התשובות ניתן למצוא בחוברת זו, במבוא לנושא או בהסבר התרגיל.

מבוא: סקירה כללית על הנושא:

חלקי מכוונות - הרכיבים השונים שמהם בנויים מכוונות.

הם מתחלקים ל: א. חלקי מבנה ב. חלקים נעים ג. חלקי חיבור ד. עזרים.

א. חלקי המבנה הם:

1. חלקי הבסיס והמסגרת שנותנים לחלקי המכונה הנעים והאחרים יציבות ומיקום יחסי קבוע.
 2. חלקים מחוברים למסגרת באופן סטטי להתאמת ההצמדה של חלקים נעים (מזלג, בית מיסב).
 3. סרנים וידות מקובעים למסגרת.
- סרנים: צירים שהחלק הסובב נע סביבם אבל לא מונע בעזרתם ולכן הם לא מוטרחים לפיתול אלא לכפיפה וגזירה בלבד. מבחינים בין סרן סובב לסרן מקובע במקומו.
 - ידות (ביחיד יד) הן סרנים שמחוברים למבנה בצד אחד בלבד (כמו זיז).

ב. החלקים הנעים הם:

1. גלגלים, שתפקידם לאפשר העברת תנועה באופן נוח לשינוי, בתנועה סיבובית עם הפסדי חיכוך (גילגולי) מופחתים, אלה כוללים - גלגלי שיניים, גלגלי שרשרת, גלגלי רצועה וגלגלי חיכוך.
 2. חלקים מחליקים, שמותאמים ביניהם עם חופש הדדי מוגבל לתנועה קווית או סיבובית.
 3. חלקים שמשמשים צירים להחזקת חלקים סובבים במקומם - גלים, סרנים וידות.
- גלים: צירים סובבים שמניעים חלקים שסובבים איתם, מוטרחים לפיתול, כפיפה וגזירה.
 - סרנים וידות סובבים - שמחוברים אל המסגרת במיסבים ומקובעים אל החלק הסובב.

ג. חלקי חיבור:

1. חיבורים קבועים: הדבקה, הלחמה, מסמרות, ריתוך ובמידה רבה גם אפיצה (הצמדה) בלחץ גבוה. חיבורים קבועים הופכים למעשה כמה חלקים לחלק אחד שאין להפריד עוד בין מרכיביו.
2. חיבורים פריקים: ברגים, פינים, שגמים, יתדות, תפסים שונים, טבעות סגירה קפיציות. המבנה המחובר מתפקד כחלק אחד, אך ניתן לפרק ולחבר חזרה רכיבים ממנו כאשר יש צורך בכך.
3. חיבורים חפשיים: מיסבים, מצמדים - שיש להם דרגת חופש אחת ולעתים שתיים: אפשרות לתנועה יחסית מוגבלת של החלקים הנעים, תוך שמירה על אופן החיבור של החלק הנע או הסובב למערכת.
4. חיבורים אלסטיים: חיבור ע"י חלקים כמו קפיצים (קפיצי מתיחה, פיתול, עלה) ומצמדים, מקובעים למבנה ועם זאת מאפשרים תנועה יחסית ניכרת, אך מוגבלת לתחום האלסטיות של החלק המחובר.

5. עזרים: הם חלקים שמשמשים בתפקידים משניים במכונה, כמו מניעת בריחת שמן (אטמי לחץ), הבטחת סגירה של ברגים (דיסקות, דיסקות קפיציות), וכדומה.

ד. חלקי מכונות סטנדרטיים:

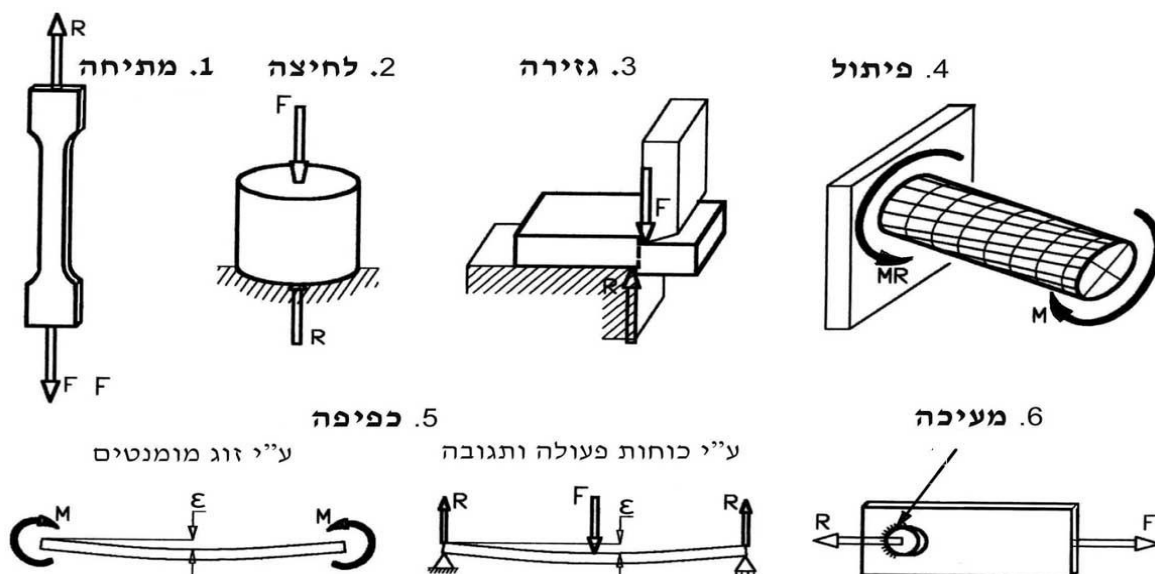
במכונות שונות חלקים שונים, אבל יש חלקי חיבור ועזרים שדומים או זהים במכונות רבות. בייצור חלקי מכונות יש חשיבות רבה לגודל הסידרה, לייצור חלקים דומים או זהים בכמויות גדולות מאד משתמשים במכונות מיוחדות שמוזילות את מחיר הפריט ויחד עם זאת משפרות את איכותו. חלקים כאלה ניתן לקנות מוכנים לפי קטלוגים ואין צורך לייצרם לחוד כמו את שאר חלקי המכונה.

הנפוצים ביותר מביניהם:

ברגים: ברגי הידוק לחיבור יציב של חלקים יחד וברגי הולכה שתפקידם להניע חלקים זה יחסית לזה. מיסבים: - חלקי חיבור שמקשרים (מתווכים) בין חלקים שיש ביניהם תנועה סיבובית יחסית באופן שמאפשר חופש לתנועה הסיבובית תוך שמירת מיקום קבוע ויציב ביניהם. מבחינים בין **מיסבי החלקה** – תותב מותאם לגל או סרן באפיצת חופש לתנועה סבובית יחסית ביניהם, לבין **מיסבי גילגול**, זוג טבעות צורתיות שמוצמדות לגל ולקדח וביניהן כלואים גופי גילגול כמו כדורים, גלילים, קונוסים וכו'. להפחתת הפסדי החיכוך (אנרגיה ובלאי), הודות לכך שמקדם החיכוך בגילגול נמוך בהרבה ממקדם חיכוך בהחלקה. יש מיסבי החלקה סטנדרטיים לקניה אבל אפשר גם לייצרם בתהליך פשוט יחסית. את מיסבי הגילגול שבנויים מחלקים מאד מדויקים ותואמים תמיד קונים מוכנים מהייצור האחיד (הסטנדרטי). חיבורים ורכיבים אלסטיים – קפיצים שונים, טבעות קפיציות, רפידות גומי.

הבהרה: הטרחה לעומת מאמץ:

בחקירת חלקי מכונות במצבי העמסה יש להבדיל בין 2 מושגים שלעיתים נוצר בלבול ביניהם: **הטרחה** ("מצב עמיסה") היא האופן שבו כוחות וואו מומנטים (עומסים) חיצוניים משפיעים על גוף חומרי צורתי. סוג ההטרחה תלוי ביחס בין כיווני הכוחות והמומנטים לבין הגיאומטריה של הגוף. מבחינים בין 6 הטרחות בסיסיות שונות:

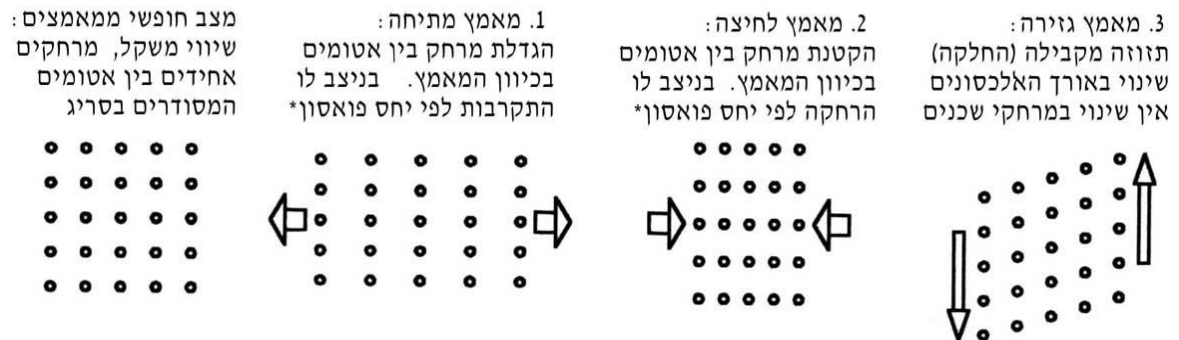


1. מתחה = פעולת זוג כוחות (פעולה ותגובה) על גוף להארכתו בכיוון קו הפעולה של הכוחות.

2. לחיצה = פעולת זוג כוחות (פעולה ותגובה) על גוף לקיצורו בכיוון קו הפעולה של הכוחות.

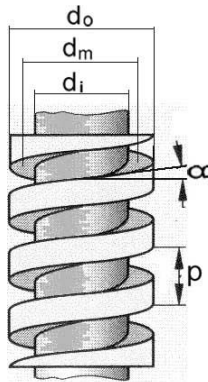
3. גזירה = פעולת זוג כוחות מקבילים משני עברי שטח חתך לעיוות או הפרדת הגוף בשטח חתך זה.
 4. פיתול = פעולת זוג מומנטים במישורים מקבילים שיוצרת עיוות זוויתי לאורך הקטע סביב צירו.
 5. כפיפה = פעולת זוג מומנטים לעיקום הגוף תוך מתיחת דופן אחת של הגוף ולחיצה של הדופן הנגדית.
 6. מעיכה = פעולת הידוק שני גופים ע"י זוג כוחות תוך עיוות פלסטי והזזת חומר באזור המגע בין הגופים.
- גוף חמרי יכול להיות מוטרך בסוג הטרחה אחד או בכמה מהם בו-זמנית.

מאמץ הוא מצב כוחות פנימיים בתוך גוף חומרי (בין האטומים שמהם הוא בנוי) ומבדילים בין 3 סוגי מאמצים שקשורים לכיוון ההזזה היחסי של האטומים זה לעומת זה:



מאמצים עשויים להתקיים בתוך הגוף החומרי גם ללא הטרחה אבל אין הטרחה ללא שינוי מצבי המאמצים בתוך הגוף. כתגובה להטרחות משתנים המאמצים בגוף עד שיווי משקל או כניעה. השתנות זו מלווה לרוב בשינוי צורתו הגיאומטרית של הגוף – עיוות אלסטי, פלסטי או הפרדה (הרס). מאמצי מתיחה ולחיצה ניצבים (נורמליים) לשטח חתך מסוים בגוף ואילו מאמץ הגזירה משיק (טנגנציאלי) לו.

מבוא לנושא א': ברגים

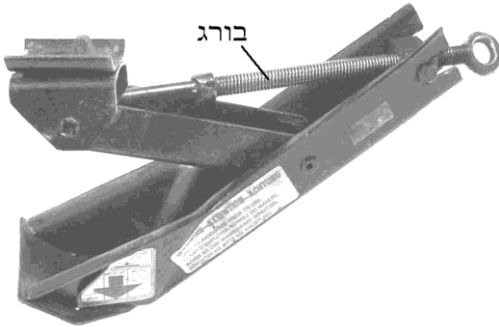


מבנה: בורג הוא מוט גלילי (לב הבורג d_i) שעליו תבריג. התבריג הוא למעשה מישור משופע צר, מלופף בצורת לוליון על המוט. המרחק בין הכריכות (ליפופים) של התבריג קבוע ומדויק ונקרא פסיעה (P). הפסיעה הקבועה נותנת לתבריג זווית מעלה אחידה α של המישור המשופע הצר והמלופף. מישור משופע ידוע במכניקה כאחד הסוגים של "מגביר כוח". מגביר כוח הוא התקן שנותן יתרון מכני: המרה של כוח קטן f_0 שעושה דרך ארוכה S_0 בכוח גדול F_1 שעושה דרך קצרה s_1 . העבודה (תוצאה) שעושה הכוח הגדול $W_1 = F_1 \cdot s_1$ קטנה מהעבודה שעושה הכוח המניע $W_0 = f_0 \cdot S_0$. ההפרש ביניהם הוא כמות העבודה W_f שמושקעת (מתבזבזת) נגד החיכוך $W_0 - W_1 = W_f$. גודל זווית המעלה בתבריג תלוי בגודל הפסיעה P ובקוטר הממוצע d_m של התבריג לפי: $\tan \alpha = P / \pi \cdot d_m$.

בורג משתלב בתנועה סיבובית לתוך חלק שבו קדח עם תבריג פנימי תואם לתבריג הבורג, ממלא אותו ונותן חיבור חזק ואמין. **אום** הוא חלק נפרד עם תבריג פנימי, לרוב סטנדרטי כמו הבורג. היתרון המכני שנותן תבריג גדל ככל שהזווית α קטנה, אבל נצילותו נמוכה בגלל חיכוך החלקה. התנועה הסיבובית בהברגה מאפשרת שימוש פשוט בידית כמנוף לתוספת יתרון מכני גדול ויעיל. הבורג הוא המצאה עתיקה. כבר לפני אלפיים שנה יוצרו בגילוף ידני ברגי עץ כדי לקבל כוחות גדולים בין שני לוחות עץ שבהם קדח ותבריג פנימי לצורך סחיטה נוספת של זיתים וענבים. ברגי מתכת להידוק נכנסו לשימוש החל מהמאה ה-16.

לבורג 5 יתרונות שעושים אותו כה שימושי:

1. הגברת כוח ישירה במקדם יתרון מכני כפול וגבוה, לצורך הזזה או הידוק שבהם נדרש כוח רב. ליתרון המכני של מישור משופע (מלופף כתבריג סביב הבורג) נוסף היתרון המכני של מנוף ביחס שבין אורך ידית המפתח (או ארכובה) כזרוע הארוכה לבין הרדיוס האפקטיבי (ממוצע) $d_{m2}/2$ של ליפוף התבריג כזרוע הקצרה. כך יכול אדם במאמץ ידני לא גדול להרים מכונית בעזרת מגבה (ג'ק) בורגי קטן וקל (כמו בתמונה משמאל).



2. מתקבלים כוח קווי מוגבר והנעה קווית (ליניארית) מתנועה סיבובית (נפוצה ונוחה במנועים ומכונות).

דוגמאות: בורג הידוק, מלחציים, מתקן להרמת כלי רכב במוסך, מכבש ומתקן מתיחה בורגיים.

3. ברגים קצרים ובעיקר ברגי הידוק הם אלמנטים מגבירי כוח מאד קומפקטיים.

4. בקרת תנועה ומיקום מדויקים שמתקבלת ע"י כך שהפסיעה קבועה ומדויקת בכל סיבוב.

דוגמאות: מכשירי מדידה מסוג מיקרומטר ומגבלים בורגיים באוטומציה.

בקרת תנועת הקידמה ומידה מדויקת של ההיגש במכונות עיבוד שבבי.

5. תופעת הנעילה העצמית שבה כוח החיכוך שמופיע במישור המשופע (המלופף) מתנגד לפתיחת הבורג או לסיבובו ע"י כוח צירי. התנאי לכך הוא זווית מעלה קטנה: $\alpha < \arctan \mu$.

החסרונות העיקריים של ברגים:

1. בברגים רגילים (מלבד ברגי כדורים) יש בתבריג מקדם חיכוך החלקה ניכר שגורם לנצילות נמוכה (ונמוכה יותר ככל שזווית המעלה קטנה). בברגי הידוק, שבהם החיכוך רצוי לנעילה עצמית, נדרש מומנט מוגדל פי כמה לסגירה. גם בברגים מוליכים שבהם הנצילות גבוהה יותר, היא לרוב קטנה בהרבה מהרצוי עם תופעות בלאי וגם בזבז אנרגיה משום שהתבריג מבצע עבודה ולא נעול באופן נייח כמו בורג הידוק.

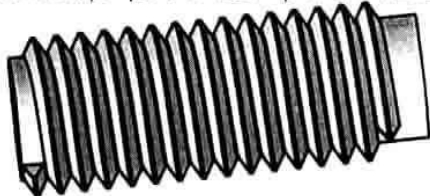
2. מהלכי הסרק, אם אינם ממונעים, הם איטיים ומייגעים, בעיקר בברגים ארוכים עם פסיעה קטנה.

זו הסיבה העיקרית לכך שמיקרומטרים בנויים לטווחי מדידה של 25 מ"מ בלבד.

10 ג' ברגים ותבריגים:

מסווגים את הברגים לפי תפקידיהם ובהתאם לכך הם מיוצרים עם תבריגים בפרופילים שונים.

1. בורג הידוק - תבריג (חתך שן) משולש



ברגי הידוק תפקידם לחבר ולהדק באופן קבוע חלקי מכונה אחרים זה אל זה, עם אופציה לפתיחת החיבור ע"י התרת הבורג בעת צורך. אחרי סגירתו הבורג אמור להשאר מתוח ונעול. בחומרים רכים בורג נכנס ויוצר את התבריג הפנימי. בחומרים קשים יש להכין קדח ותבריג פנימי.

ברגי הידוק למכונות אמצעי חיבור פריק וקומפקטי שהוא גם מגבר כוח ונותן הצמדה בכוח גדול ומבוקר (לפי מומנט סגירה נמדד). תפקידם לחבר חלקים לתקופה ארוכה – עד הפירוק הבא ולכן רצוי להגביר את החיכוך לצורך נעילה עצמית משופרת (זווית מעלה קטנה מזווית החיכוך). נצילות הסגירה נמוכה מאד אך האנרגיה המתבזבזת וגם הבלאי שנגרם מחיכוך זניחים.

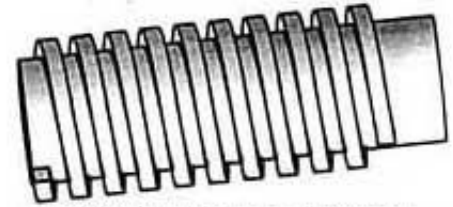
פרופיל התברג משולש (עם רדיוסי פינות לבטיחות ומניעת ריכוז מאמצים). חתך משולש מגביר את החוזק לגזירה ולכפיפה וגם את כוחות החיכוך, אבל בלאי עלול להקטין את הקוטר החיצוני של הבורג. בהמשך ההתייחסות תהיה לברגי הידוק אלה, שהם האלמנטים הנפוצים במחברים ונושאי התרגיל.

ברגים מוליכים (מניעים): תפקידם להפוך תנועה סיבובית

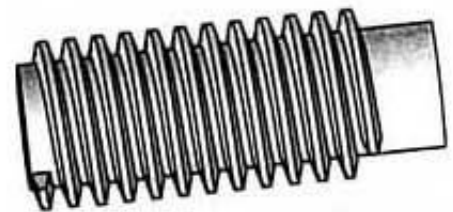
לתנועה קווית תוך הגברת הכוח ביחס גבוה

עם אפשרות בקרת תנועה פשוטה ומדויקת. חשובה בהם הקטנת החיכוך למניעת אבדן אנרגיה ובעיקר בלאי של חומר בתברג. זה נעשה ע"י התאמת חומרי האום והבורג (כולל טיפול תרמי), העיבוד הסופי שלהם, והוספת חומרי סיכה (שימון).

על פי רוב הבורג סובב, האום לא סובב ורק נע לאורך הבורג וכך מניע גררה או שולחן במכונה. גם במתקנים שנפתחים ונסגרים לעתים קרובות כמו מלחציים עדיף בורג מוליך. בברגים מוליכים חשוב שבלאי מתמשך לא יקטין את קוטר הבורג וגם שתהיה נעילה עצמית. לכן לברגים מוליכים רגילים פרופיל תברג מלבני (מיושן) או טרפזי עם רוחב מספיק בראש הפרופיל.



בורג מוליך - תברג (חתך שן) מרובע



בורג מוליך - תברג (חתך שן) טרפזי

בכל בורג מבחנים בשני קטרים ברורים:

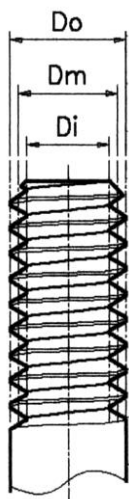
1. קוטר חיצוני d_o , שכולל את התברג (קטן במידת מה ממידה עגולה כדי לתת אפיצת חופש כלפי האום, שהוא קדח אחד).

2. קוטר פנימי d_i , שהוא קוטר הגל הפנימי ללא התברג, נקרא "לב הבורג". ומשמש לחישוב חוזק הבורג לצורך בחירת קוטר הבורג המתאים.

בלוחות הטכניים מוגדרים בבורג שני קטרים נוספים:

3. הקוטר הממוצע של לולין התברג d_m שנקרא גם קוטר אפקטיבי. משמש לחישוב מומנט, נתון בטבלאות ברגים וניתן גם למדידה עקיפה בעזרת מדידי גלילים מיוחדים.

4. הקוטר הנומינלי d_n שהוא המידה העגולה שמעל הקוטר d_o ומשמש לסימול וסיווג.



ברגים מיוצרים לפי תקן שמגדיר את הקוטר הנומינלי (ובכך גם את החיצוני) ואת גודל הפסיעה P . התקן בארץ הוא בעיקרון מטרי (לדוגמא M10 שהוא בורג שקטרו $d_n=10\text{mm}$),

כמו ברוב העולם, אבל משתמשים גם בתקנים אינצייים - הבריטי והאמריקני שהתברגים בהם אינם תואמים זה לזה: זווית התברג המשולש האמריקאי 60° כמו ב-ISO, לעומת 55° בתקן הבריטי וגם גודל הפסיעות לעתים שווה ולעתים שונה בין שני התקנים האינצייים.

בכל תקן כזה יש אפשרות לבחור בין:

תברג רגיל (גס), שבו חוזק התברג תואם את חוזק לב הבורג.

תברג עם פסיעה עדינה, שנותנת זווית מעלה מוקטנת, יותר נעילה ודיוק המהלך. בתברג עדין פחות שטח חתך ולכן נדרש יתר דיוק בייצור ולרוב בורג כזה מיוצר מחומר משופר או שעובר תהליך שיפור.

ברגי הידוק מיוצרים לרוב מפלדה פחמנית או דלת סגסוגת עם תחום אלסטי גדול – פלדת פחמן מעיבוד (פלסטי) בקר. ברגים משופרים עוברים גם טיפול תרמי.

המאמצים בבורג מהדוק: הכוח הגדול שמתקבל בהידוק בורג יוצר מאמצי מתיחה בלב הבורג לאורך צירו, לעומת זאת בסיס התברג (שטח חיבור התברג ללב הבורג) מוטרך לגזירה וצד אחד של התברג (הפונה אל הראש) מוטרך למעיכה. כך גם בתברג הפנימי של הקדח או האום.

בעת הסגירה של בורג עמוס נוספת הטרחת פיתול בחתך הרוחב ובתברג נוסף חיכוך למעכה.

העומס על התברג לא מתחלק שווה בין הכריכות שבאות במגע עם האום.

כמחצית העומס מטריחה את פסיעת התברג הראשונה ממשטח המגע של האום בחלק המהודק.

כמחצית מהעומס הנשאר מטריח את הפסיעה השנייה וכך הלאה עד שבפסיעה השישית העומס זניח.

כדי שבורג יישאר נעול צריכה זווית המעלה של התברג שבו למלא אחר התנאי $\mu \ll \tan \alpha$. לשם כך רצוי מקדם חיכוך μ גבוה בין תברגי הבורג והאום – או שעל פסיעת התברג P להיות קטנה. לכן רוב הברגים המשמשים בכלי רכב ובאים במגע עם שמן הם עם פסיעה עדינה.

בברגי הידוק בלאי החומר שנובע מחיכוך זניח כי פעולות הסגירה והפתיחה נעשות בתדירות נמוכה, רק לצורך פירוק וחיבור.

נושא א': מחברי ברגים

מחבר – איזור חיבור בין חלקים שהיו קודם נפרדים, עם אבזרי חיבור או בלי, תוך ביטול רוב דרגות החופש או כולן. מחבר שמשאיר דרגות חופש הוא מחבר פרקי, מיסב, מחבר טלסקופי וכד'.

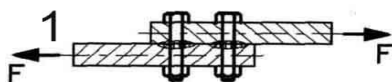
מחבר יכול להיות קבוע או פריק:

מרכיבי מחבר קבוע מחוברים ע"י ריתוך, הלחמה, הדבקה, מסמרות וכיוצא באלה אמצעי חיבור שאינם מיועדים לפירוק. ביטול החיבור יכול להתבצע רק ע"י הרס אזור החיבור או הרכיב המחובר.

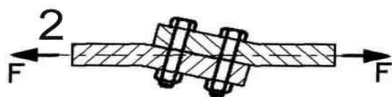
במחבר פריק רכיבי החיבור – ברגים, שגמים, פינים, טבעות קפיציות ותברגים בחלקים עצמם, ניתנים להוצאה בשלמותם כאשר יש צורך לפרק את המחבר והוא ניתן באותו אופן לחיבור מחדש.

מחבר ברגים רגיל ומחבר חיכוך:

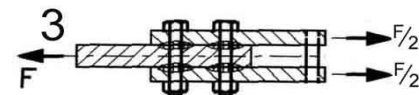
במחבר ברגים רגיל הותאמו חלקי המחבר מראש להכנסת הברגים ע"י ייצור קדחים גליליים (עגולים) מתאימים (בקוטר גדול במקצת מקוטר הבורג) במיקום מדויק בחלקים כך שיתמזגו לקדח אחד שבו יעבור כל בורג. סגירת הברגים מצמידה את חלקי המחבר שטח אל שטח כך שבעת העמסת המחבר חלקיו לא ייפרדו. כאשר המחבר מוטרח למתיחה (כמו בניסוי) או לחיצה הברגים יוטרחו כמעט רק לגזירה.



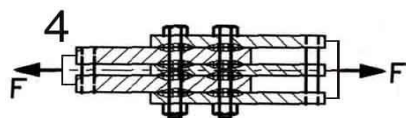
מחבר לא סימטרי (איור 1): כאשר מחבר כזה מוטרח ע"י עומס מתיחה גדול יחסית לקשיחות המבנה שלו, כוחות הפעולה והתגובה המקבילים יוצרים מומנט צמד שמעוות את המבנה (איור 2):



לוחות המחבר מוטרחים אז גם לכפיפה, הם מתעקמים ואז הברגים מוטרחים גם למתיחה בנוסף לגזירה.



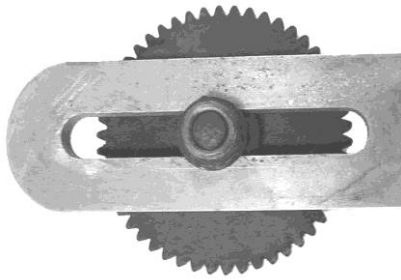
לכן לעומס גדול נבנים מחברים סימטריים (איור 3): על כל לוח חיצוני פועל חצי הכוח הכולל ונוצר זוג מומנטי כפיפה מנוגדים שביב ציר הסימטריה, סכומם 0 והכפיפה נמנעת.



תועלת נוספת היא שבכל אחד מהברגים מוטרח לגזירה לא שטח חתך אחד (איור 1) אלא שניים: משני צידי הלוח האמצעי (איור 3).

לעיתים מועיל מאד לחלק את העומס הזה ליותר שטחי גזירה ואז בונים מחבר רב לוחות כך שמספרם באגף אחד n ובשני $n+1$ (למשל 2 נגד 3 כמו באיור מס' 4). כך המחבר נשאר סימטרי, אבל מספר שטחי הגזירה על כל בורג עולה להיות $2n$.

במחבר חיכוך מוברג רק באחד מאגפי המחבר (חלק או כמה חלקים באותו צד של המחבר) יש קדח גלילי למיקום כל בורג. באגף השני יש חריץ מאורך, ישר או אחר, כגון מעגלי. מיקום הבורג סגור בקדח אבל בחריץ יש לו חופש מיקום בכל נקודה על ציר החריץ.



דוגמא בתמונה משמאל: מחבר בין גלגל שיניים למוט.
לפני סגירת הבורג נשאר חופש לקבוע את מיקום הגלגל בכל נקודה
רצויה ברצף לאורך החריץ.

סגירת הבורג היא שמצמידה בכוח מספיק את הבורג במיקום שנקבע.
מה שמונע מהבורג להחליק (לזוז) לאורך החריץ הוא רק כוח חיכוך.
כוח החיכוך הזה גדול ככל שגדולים :

- א. מקדם החיכוך בין חלקי המחבר.
 - ב. כוח ההידוק שמפעיל הבורג.
 - ג. מספר שטחי ההצמדה,
- את כוח ההידוק אפשר לקבל בכל גודל רצוי ע"י בחירת בורג ומומנט סגירה מתאימים. כל עוד מאמצי
המתיחה בבורג הם לגמרי בתחום האלסטי יש יחס ישר וליניארי בין גודל מומנט הסגירה לכוח ההידוק.
אם המחבר מוטרח בעומס גדול מכוח החיכוך הזה, מופיעה תזוזת החלקה בין חלקי המחבר לאורך החריץ.
צורת או מידת המחבר משתנה ללא נזק לחלקיו. את התופעה הזו ויתרונותיה נחקור בניסוי מס' 1.

ניסוי מס' 1: כוח החיכוך במחבר מוברג

נושאי משנה: סגירת ברגים - מומנט ונצילות, מד כוח אלסטי, בורג מתיחה דו כיווני, מיסב לחץ
מטרות התרגיל:

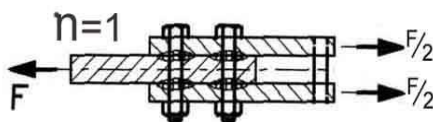
1. הכרת הנושא של מחבר חיכוך בורגי, מאפייניו ושימושים טכניים.
 2. ביצוע מעשי - הידוק המחבר ומדידה מעשית של כוח החיכוך.
 3. חישוב תאורטי - סגירת בורג במומנט ידוע וחישוב כוח החיכוך שאמור ההידוק לתת.
 4. בדיקה והשוואה בין החישוב התאורטי לתוצאה המעשית, ניתוח התוצאות.
- תיאוריה:

מחבר מוברג הוא מחבר פריק מחובר ע"י ברגי הידוק. הברגים המהודקים מחזיקים את חלקי המחבר
צמודים. עצם ההידוק מטריח את גופי (קני) הברגים קודם כל למתיחה, אבל גם לפיתול.
התברג (הדדית בבורג ובאום) מוטרח לגזירה בבסיס התברג, מעיכה בשטחי המגע וכפיפת שן התברג.
עומס חיצוני על המחבר עלול להטריח את קני הברגים שבמחבר גם לגזירה ולכפיפה בהתאם למבנה
המחבר ולאופי ההטרח (מצב עומס).

- מחבר חיכוך - מחבר שנותן רצף אפשרויות חיבור לאורך מסלול ומוחזק רק בכוח החיכוך.
- לרוב המסלול הוא חריץ מאורך, ישר או בקשת מעגלית. קנה הבורג מוטרח רק למתיחה ופיתול.
- מחברים כאלו נפוצים מאד בתעשייה, בכל מקום שנדרשת נעילה במיקום שניתן לשינוי וכיוונון.
- במכונות עיבוד הוא משמש להידוק הריתום של כלי עיבוד, להידוק העובד בדפינה למו"ק או לשולחן
המכונה ולכיוונון המיקום של אביזרי עזר כמו מעצורי גבול או מפסק חשמלי במערכת אוטומטית.
- הוא גם נפוץ בשימוש ביתי לכיוונון גובה וואו זווית של כסא, שולחן סירטוט, מנורה ועוד.

מחבר החיכוך מבוסס על העיקרון שהצמדת שטחים בכוח הידוק ידוע, נותנת כוח חיכוך ידוע.
כניעתו של מחבר חיכוך מתבטאת בתזוזה בין חלקיו כנגד חיכוך דינמי.

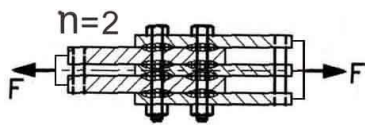
הוא יכול לשמש אביזר הגנה שבו כאשר העומס על המחבר מוגזם יש החלקה ללא עיוות פלסטי או שבר.
בנוסף הוא תמיד פריק וניתן להחזרה ולקביעת עומס כניעה רצוי ע"י גודל מומנט סגירת (הידוק) הבורג.



- למבנה הסימטרי של המחבר בניסוי (שני לוחות משני
צידי לוח מרכזי) שני יתרונות:

1. הוא מונע הופעת מומנט צמד שמטריח את המחבר והברגים.

2. הוא מכפיל את כוח החיכוך ע"י הכפלת מספר שטחי המגע לשני הצדדים של לוח מרכזי.



- הכפלה נוספת של כוחות החיכוך ניתן לקבל ע"י הוספת לוחות בסימטריה כך שיהיו n לוחות באגף אחד נגד $n+1$ בשני. הסימטריה נשמרת ומספר שטחי המגע בין הלוחות במחבר $2n$. כלומר משני הצדדים של כל לוח באגף שבו אין לוח חיצוני.

- באיור לעיל: באגף השמאלי $n=2$ לוחות ובימני 3. מספר שטחי החיכוך בין האגפים הוא 4.



- דוגמא מעשית מהמעבדה (תמונה): במחבר רציף לחיזוק משענת כסא משרדי נראים 9 לוחות חיכוך עם חריץ (קדח מאורך) וביניהם 10 דיסקיות קבועות עם קדחים. היחס: $n=9$ וכוח החיכוך מוכפל פי 18 כדי לאפשר נעילת כיוון המשענת ביד אחת במצב לא נוח כנגד מומנט גדול של המשענת הארוכה מוכפל בלחץ גב האדם היושב.

סגירת ברגי הידוק

בהידוק הבורג נמתח: האום הסובב מתקדם על התברג בכיוון אל ראש הבורג. גוף המחבר המהודק מתנגד להתקצרות הבורג וקטע הבורג שבין הראש לאום נמתח כקפיץ ומגיב בכוח האלסטיות.

- א. רוב מומנט הסגירה הכולל מושקע בהתגברות על מומנטי חיכוך: בעת ההידוק פועלים כוחות חיכוך: הבורג שנמתח בכוח Q אלסטי ומגיב בכוח הידוק שווה: $H=Q$. מכפלת כוח ההידוק במקדמי החיכוך נותנת כוחות הידוק שמתנגדים לתנועת סיבוב האום לסגירה. לכל כוח זרוע מומנט שהיא רדיוס המרחק בין מעגל פעולת הכוח לציר הבורג והתברג. זה קורה בשני אזורים:
1. בין דופן האום לחלק המהודק בחצי קוטר המעגל הממוצע של דופן האום.
 2. בתברג, בין תברג האום לתברג הבורג בחצי הקוטר הממוצע של התברג.

המומנט האפקטיבי, זה שמבצע את עבודת מתיחת הבורג כנגד זווית המעלה של התברג בלבד ללא החיכוך, הוא קטן מאד יחסית כפי שייראה בחישוב בתרגיל.

בליטה טבעתית באום



ב. חשיבות הניצבות של דופן האום לציר הבורג:

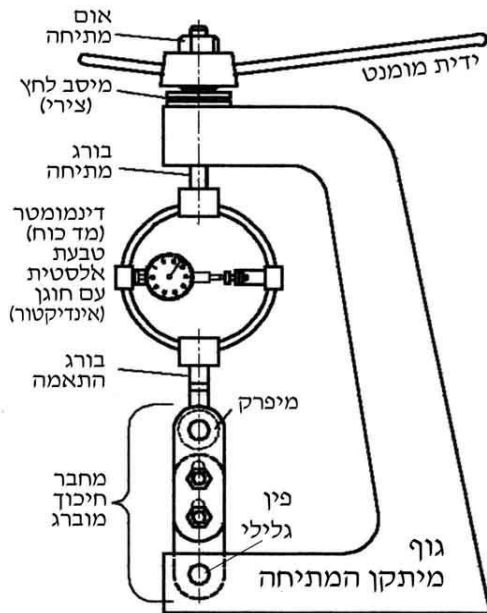
ניצבות גרועה לא רק מוסיפה כפיפה לבורג סגור אלא גורמת גם כפיפה מתחלפת בעת הסגירה. בברגים המיועדים לסגירה מבוקרת יש במישורי המגע באום ובראש הבורג **בליטה טבעתית**. היא צרה (תמונה) כדי לתת רדיוס חיכוך ידוע, ומעובדת בטיב שטח משופר (למקדם חיכוך ידוע) וניצבות מדויקת לציר התברג של האום. בחלקים יצוקים המיועדים לחיבור בורגי יש ליישר את משטח ההידוק בעיבוד שבבי להבטחת הניצבות.

ג. הידוק הבורג מצד הראש: ההידוק לא חייב לבוא מצד האום. ברגים שנכנסים לתברג פנימי בחלק ניתן לסגור רק מצד הראש. בסגירת ראש מוטרח קנה הבורג במלוא מומנט התברג, ולא רק במומנט החיכוך כמו בסגירת האום. ההבדל לרוב קטן כי מקדם החיכוך בתברג μ_m גדול מאד יחסית לזווית המעלה α שנותנת רק תוספת מומנט קטנה.

לכן היתרון לכאורה בסגירת אום לעומת סגירת ראש כמעט תמיד זניח.

מהלך הניסוי:

חלק א' הוא מעשי ובו מבוצעות:



1. הרכבת המחבר באופן שמשאיר לו את כל טווח ההחלקה בקדח המאורך (בניסוי הוא קצר, כ-8 מ"מ) כיוונון מתקן המתיחה עם טווח חופשי מתאים.

סגירה ידנית של 2 ברגי ההידוק במחבר.

2. סגירה מבוקרת של 2 ברגי המחבר במפתח מומנטים בהדרגה ולסירוגין ב-3 שלבים כדי לקבל סגירה סופית שווה במינימום סטיות שנגרמות בגלל אלסטיות חלקי המחבר.

3. מתיחת המחבר ומדידת הכוח על פי העיוות הקבוע של דינמומטר (מד כוח) טבעת בזמן החלקה.

כוח החיכוך הדינמי קטן במידת מה מכוח החיכוך הסטטי, קבוע יותר וחשוב יותר מכיוון שהוא הקריטי. לכן רק את הערך שלו (ולא של הסטטי) יש לרשום בטבלה.

4. חזרה 3 פעמים על שלבים 2,3 וחשוב מידת העיוות הממוצעת (מ"מ או מאיות המ"מ).

5. החלפת לוחות המחבר החיצוניים בלוחות מחומר אחר וחזרה על שלבים 2,3 ו-4. ס"ה 9 מדידות.

6. חישוב כוח החיכוך הכולל הממוצע שדרוש להחלקת המחבר בכל אחד מ-3 ההרכבים של המחבר ע"י הכפלת מידת העיוות האלסטי של הטבעת (שנמדד בחוגן) במקדם הקפיציות (הנתון בניסוי) של הטבעת.

הערות: בחישוב Q לפי הנוסחה מקדמי החיכוך μ_c ו- μ_m משוערים בלבד וזה יכול לגרום לטעויות.

- מעט שמן על התברג מוריד את מקדם החיכוך.

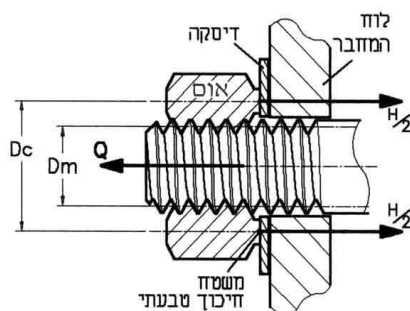
- חישוב הכוח הכולל גם הוא לפי מקדמי חיכוך משוערים בין לוחות המחבר וגם פה קיים סיכוי לטעות.

חלק ב' הוא חישובי ובו יתקבלו תוצאות לפי נתוני הברגים מטבלאות תקן ומקדמי חיכוך משוערים:

1. חישוב הגודל התאורטי של הכוח Q שבו נמתח בורג ע"י
א. חילוף Q מהנוסחה של מציאת מומנט סגירה (כי המומנט נתון):
$$M_t = Q \left[\tan(\alpha + \rho') \frac{D_m}{2} + \mu \frac{D_c}{2} \right]$$

כאשר נתונים: א. M_t - מומנט סגירת הברגים המעשי בהמרה ליחידות מתאימות ונתוני הבורג:

ב. כוח ההידוק H שמפעיל כל בורג על לוחות המחבר הוא כוח תגובה ל-Q ולכן שווה לו.



המומנט M_t דרוש להתגבר על שני מומנטי התנגדות:

1. M_c - בין דופן האוס ללוח המחבר עם זרוע $D_c/2$ - רדיוס טבעת האוס:

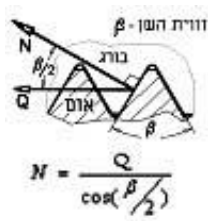
$$M_c = \mu_c \cdot H \cdot D_c/2 = \mu_c \cdot Q \cdot D_c/2$$

2. M_m - של ההתנגדות בתברג עם זרוע $D_m/2$ - רדיוס התברג הממוצע

$$M_m = Q \cdot \tan(\alpha + \rho') \cdot D_m/2$$

המומנט בתברג מחושב לפי "זווית מעלה מדומה" ($\alpha + \rho'$) סכום

זווית החיכוך $\rho' = \arctan[\mu_m / \cos(\beta_2/2)]$ עם זווית המעלה α .



רק החלק של זווית המעלה α . הוא המומנט היעיל שיוצר את כוח המתיחה Q :

$$M_{ef} = H \cdot \sin \alpha \times D_m / 2$$

זווית הפתיחה β מגדילה את החיכוך ע"י שמגדילה את הכוח N שהוא כוח תגובה ניצב לשטח התבריג. הכוח Q הוא רכיב שלו כך שזהו כוח מוגבר ע"י הזווית :

2. חישוב כוח החיכוך התאורטי הכולל במחבר:

א. כוח החיכוך המקומי בשטח חיכוך אחד הוא מכפלת כוח הידוק המחבר (ששווה לכוח מתיחת הבורג

$$\text{כגובה אלסטית}) \text{ במקדם החיכוך הנתון בטבלה. } F_f = H \cdot \mu$$

ב. כוח החיכוך הכולל של המחבר הוא לפי 2 ברגים ו-2 שטחי הידוק לכל בורג. $F_{ft} = 4F_f$

3. נושאי משנה במבנה מיתקן המתיחה:

המחבר הנבדק נתון בין שני מיפרקים – פין גלילי בבסיס ומיפרק מחובר לבורג ההתאמה בחלקו העליון. זאת כדי לנטרל כל הטרחת כפיפה. המחבר נתון למתיחה בלבד.

א. בורג ההתאמה בין המיפרק למד-הכוח (דינמומטר) הוא "בורג חף" (ללא ראש עם

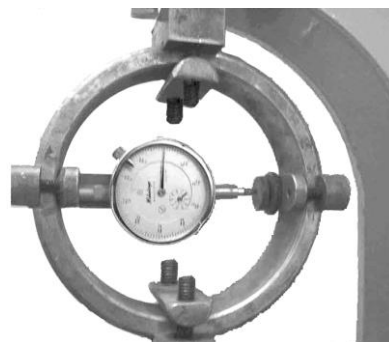
תברייגים משני צדדיו) כאשר אחד התברייגים רגיל (ימני) והשני הפוך (שמאלי). סיבובו

לכיוון אחד מקרב בין המחבר למד-הכוח ולכיוון השני מרחיק אותו. כאן הוא משמש

לכיוונון מירווח הביטחון הרצוי. ברגים מסוג זה משמשים "מותחנים" מתכווננים

לתמיכת זיז עמוס ע"י כבל, כמו שער ארוך או כבד.

ב. עקרון הפעולה של דינמומטר טבעת



כוח מתיחה במיתקן מעוות את הטבעת לצורת אליפסה עם ציר

ארוך מאונך. הציר האופקי מתקצר וחוגן מדויק מודד את מידת

ההתקצרות. בתחום הקצר (פחות מ-1 מ"מ) יש תלות לינארית טובה

מאד בין גודל הכוח למידת ההתקצרות.

בלחיצה מתקבל אותו מקדם (יחס) בדיוק, אלא בכיוון התרחבות

הטבעת בציר האופקי.

ג. בורג המתיחה של המיתקן היה אמור להיות בורג מוליך. אום המתיחה שלו ארוך כמו של בורג מוליך

להפחתת הלחץ על התברייג ומשומן להפחתת החיכוך, הגדלת הנצילות והקלת סגירה ידנית מבוקרת.

5. מיסב הלחץ – בבורג המתיחה של המכונה במקום שהאום יהדק דיסקה

רגילה עם חיכוך רב, האום הארוך מהדק קשווה (דיסקה עם מסלול קעור)

של מיסב צירי (אקסיאלי) עם כדורים כגופי גילגול. החיכוך בגילגול

שואף לאפס ולכן המומנט נגד סיבוב המיסב מבטל כמעט לגמרי את

מומנט ההתנגדות הגדול ביותר – זה שבדופן אום המתיחה ובהשוואה

לבורג ההידוק של המחבר לפחות מכפיל את הנצילות כדי להקל על

הסגירה הידנית של מיתקן המתיחה.



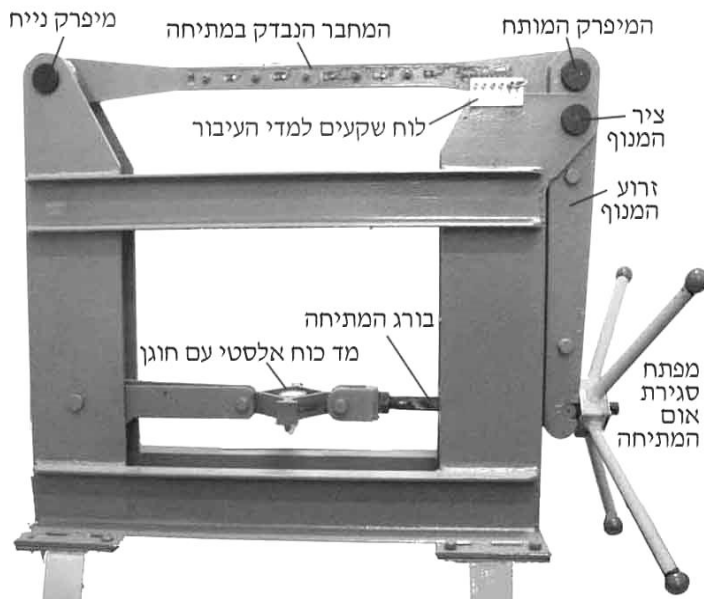
ניסוי מס' 2: חלוקת כוחות במחבר מוברג טורי

נושאי משנה – מנוף ומדי עיבור

מטרות הניסוי:

1. להמחיש את התפלגות העומס הכולל על מחבר בורגי טורי בין הברגים שבטור.
2. להכיר מעשית שימוש במנוף ובשילוב מנוף ובורג להגברת כוח מבוקרת יעילה ופשוטה.
3. להכיר את השימוש בטכניקת מדי עיבור (מדי מעוות, Strain Gauges) למדידת מאמץ מקומי.
4. הבנת ההשפעה של אלסטיות החומר והחלקים על התפלגות העומס בין הברגים.

א. הסבר המיתקן והניסוי:



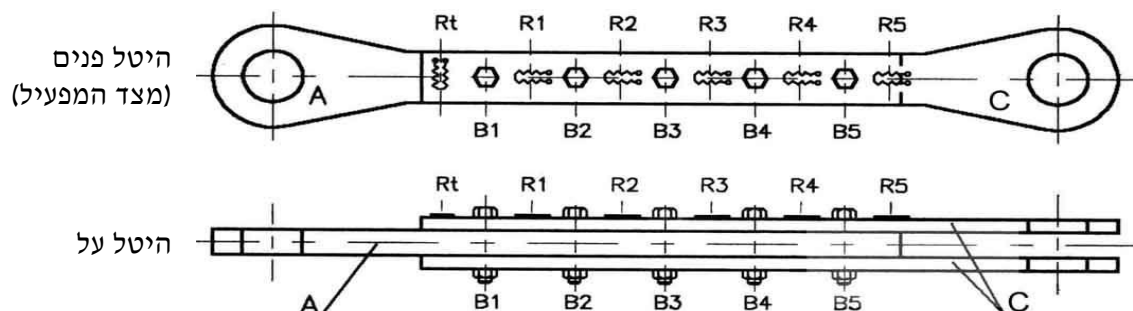
במכונת מתיחה (בתמונה) נתון מחבר בורגי טורי של 5 ברגים כמתואר להלן בסעיף ב'. הניסוי בא להמחיש מעשית את החלוקה של עומס מתיחה גדול בין 5 הברגים שבטור.

למראית עין הם אמורים לחלק ביניהם שווה את העומס, אבל לא כך קורה וזה בגלל השינויים האלסטיים בקטעי המחבר שבין הברגים.

מכונת המתיחה היא מבנה קשיח יחסית לחוזק המחבר. הכוחות הגדולים שהיא מספקת מקורם ידני. הגברת הכוח הידני לעומס הגדול הנדרש נעשית ב-2 דרגות: בורג מוליך ומנוף פשוט.

השילוב הזה מתאים מאד לניסוי הזה ולעבודות דומות שבהן מלבד הגברת כוח גדולה נדרשים גם בקרה ונעילה עצמית. אותם נותן הבורג בצורה טובה, אלא שבהגברת כוח נצילותו נמוכה מאד. למנוף לעומת זאת נצילות גבוהה מאד, אבל אין בו בקרת כוח ולא נעילה עצמית. ואותם מספק הבורג.

ב. המחבר בנוי באופן סימטרי משני אגפים:



- הלוח A מחובר לקצה הנייח של מיתקן המתיחה (בתמונה למעלה) והזוג C מחובר לזרוע הקצרה של המנוף.
- עובי הלוח A (נקבע לפי מעיכה ע"י הברגים) כפול מעובי כל אחד מהלוחות C, כך ששטחי החתך באגפים שווה.
- האזור המשותף באמצע מחובר ע"י טור של 5 ברגים (B1 עד B5). קטעי המחבר שביניהם שווי שטח חתך.
- הסימטריה לאורך המחבר מביאה לכך ששכום מומנטי הכפיפה עליו יתאפס. זה גורם לכך שגם בעומס מתיחה גדול על לוחות המחבר אין על המחבר וחלקיו שום מומנט כפיפה והם מוטרחים למתיחה בלבד.
- הברגים, מוטרחים לגזירה בלבד. הסימטריה מונעת גם בהם הטרחה נוספת למתיחה וכפיפה.

- הסימטריה נותנת גם הכפלה של שטחי הגזירה בברגים – כל בורג מוטרך לגזירה משני צידי הלוח A, שטח הגזירה כפול, מאמץ הגזירה יורד לחצי ומותר להשתמש בברגים פחות עבים לאותו מאמץ גזירה.
- הברגים מאותו סוג וגודל, אפוצים בקדחים עגולים, במרחקים שווים, מוטרחים כמעט רק לגזירה.

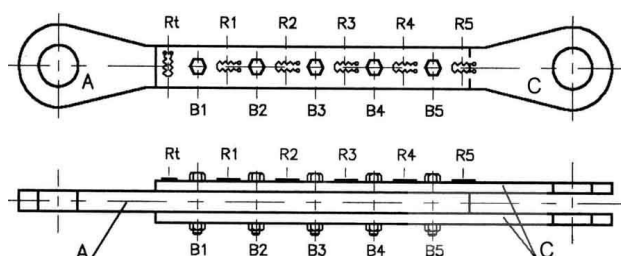


משימה ראשונה היא לקבוע את העומס הכללי על המחבר בדיוק הנדרש. לשם כך מוצאים את היתרון המכני של המנוף. הכוח הכללי הוא מכפלת היתרון המכני הזה בכוח הבורג שנמדד במד כוח אלסטי מעוין (תמונה).
למנוף נצילות גבוהה מאד ובהנחה שהפסדי המומנטים עליו זניחים מחשבים את היתרון לפי אורכי הזרועות בלבד, לפי השרטוט שבדף הניסוי.
כדי לחשב את הגברת הכוח ע"י המנוף יש לזהותו – "מוט הרמה" או "נדנדה" (פירוט בנספח) ולפי זה לקבוע את אורכי הזרועות שיש למדוד כדי לקבל בחישוב את יחס ההגברה.

ג. חלוקת העומס הכללי בין הברגים שבמחבר:

עומס הגזירה על בורג במחבר לא ניתן למדידה ישירה. הפתרון הוא מדידה עקיפה: מדידת כוח המתיחה באחד מאגפי המחבר לפני הבורג ואחריו. ההפרש בין הכוחות האלה נגרם ע"י הבורג ולכן שווה לעומס שעליו.

למדידת הכוח בקטע מסוים של המחבר משתמשים בחלק עצמו, במקרה זה אחד משני לוחות C במחבר כרכיב האלסטי (במקום קפיץ) של מד הכוח. שאליו מודבק חיישן שנקרא מד עיבור (Strain Gauge) שאופן פעולתו יוסבר בהמשך. חמשת הברגים מחלקים את המחבר לאורכו ל-6 קטעים:



■ בקטע שמימין לבורג B₅ כל העומס (נמדד ע"י R₅)

נמצא בלוחות החיצוניים C, קצה הלוח A לא עמוס.

■ הבורג B₅ מעביר חלק מהכוח מ-C ללוח האמצעי A

ולכן בקטע שבין בורג B₅ לבורג B₄ העומס בלוחות C

קטן יותר מאשר בקטע שמימין ל-B₅. יתרת הכוח

נמצאת בלוח A, אליו הועברה ע"י הבורג B₅.

■ הבורג B₄ מעביר עוד חלק מהעומס מהלוחות C ללוח האמצעי A ובחלק בינו לבין בורג B₃ יש עוד פחות

עומס בלוחות C ועוד יותר עומס בלוח A.

■ כך זה נמשך עד שמסמאל לבורג B₁ נמצא כל העומס בלוח A. ואין שום עומס בלוחות C.

ד. **מדידת הכוחות:** מדי העיבור מודבקים רק על אחד הלוחות החיצוניים C. כך ש-R₅ מודד את העומס

הכולל. R₄ מודד את הכוח שנשאר בלוחות החיצוניים אחרי שהבורג B₅ העביר חלק ממנו ללוח הפנימי.

R₃ מודד את הכוח שנשאר בלוחות החיצוניים אחרי שגם הבורג B₄ העביר עוד חלק ממנו ללוח הפנימי וכן

הלאה. R₁ מודד את הכוח שנשאר בלוחות החיצוניים לפני שהבורג B₁ יעביר את כל הכוח הנשאר.

R_t הוא מד עיבור שמודבק לרוחב וגם נמצא בקטע של הלוחות C שבו בשום מצב אין עומס. כדי לקבל

מדידה בחלוקה (רזולוציה) גבוהה לא נמדדת כל ההתנגדות של מד העיבור אלא רק הפרש ההתנגדות

שנוצר כתוצאה מעיוות לוח הפלדה. במכשיר המדידה זה נעשה ע"י "גשר ויטסטון" שמשווה בין מד העיבור

הנמדד למד העיבור R_t שעליו אין עומס והתנגדותו עלולה להשתנות רק בגלל שינויי טמפרטורה. לכן הוא

נקרא מדיד השוואה וגם פיצוי טמפרטורה. כי הטמפרטורה שלו אמורה להיות זהה לזו של הנמדד.

- מדידת הכוח בכל אחד מהקטעים נעשית בנפרד ע"י החלפת החיבור החשמלי (ידנית) כל פעם לחוט שמוביל ממד עיבור (נגד) אחר מתוך השישה :
 - השקע שמחובר אל R_5 – אדום. מחובר למעגל המדידה כל הזמן וממוספר (משום מה) 6.
 - השקע שמחובר אל מד העיבור R_5 כחול. הוא זה שמודד את העומס הכולל ולכן הוא שמחובר למעגל ונמדד בעת האיפוס, הכיול ובשלבים שבהם מתבצעים שינויי העומס.
 - יתר השקעים ממוספרים וצהובים. הם משמשים לקריאות הכוח בקטעים האחרים לאורך המחר.
- ה. איפוס וכיול הגשר הדיגיטלי: מבוצעים כאמור כאשר מעגל המדידה מחובר למד העיבור R_5 .
- איפוס (zero) הוא כיוון למצב שהמכשיר יראה 0 כאשר הערך הנמדד (כאן העומס הכולל) הוא 0.
 - האיפוס של R_5 לא מתאים ליתר מדי העיבור, כי קיימים הפרשי התנגדות קטנים בינו לבין שאר מדי העיבוד מהייצור. מכיוון שקריאת מכשיר המדידה עדינה מאד נקרא כל שינוי קטן כזה כהבדל כוחות ניכר.
 - כיול (span) שינוי רוחב הסקלה) הוא כיוון למצב שהמכשיר יראה מספרים שתואמים את יחידות המדידה. זהו למעשה קביעת מקדם (פקטור) שמקשר בין גודל העיוות הנמדד בקטע מסוים של לוח המחר לגודל הכוח שמטריח קטע זה. גודל המקדם תלוי לכן בשני גורמים קבועים: מודול האלסטיות E של חומר לוח המחר ושטח החתך A באותו מקום. מכפלתם היא האשינות (מידת ההתנגדות למעוות) למתיחה של המחר.
 - הכיול לפי R_5 טוב גם ליתר מדי העיבור כי הוא ביחס להתנגדות הכללית 120Ω וההפרשים הנ"ל זניחים.
1. מציאת העומסים על הברגים במחר: מבוצעים ע"י חישוב על פי הנתונים שהתקבלו במדידה.
- תיקון האיפוס ליתר מדי העיבור נעשים במעבר מטבלה 1 של הקריאות "ברוטו" לטבלה 2 של הכוחות "נטו" בקטעי C השונים. החישוב ע"י קיזוז (הפחתת הערך הנקרא בחתך ללא עומס מהערך הנקרא בעומס המסוים בחתך המסוים. בשלב זה יש גם להמיר לניוטון את הכוח מיחידת טון (המאולצת בגלל הצג המוגבל).
 - מילוי טבלה 3 - חישוב העומסים על הברגים כהפרשים בין הכוחות בקטעים של הלוחות C לפי ההסבר בסעיף ד' – השינוי בכוח בין 2 קטעים שכנים נגרם ע"י כך שהבורג מעביר חלק מהכוח ללוח הפנימי.
2. עריכת גרפים להמחשת חלוקת העומס בין הברגים:
- את נתוני טבלה 3 מעבירים ללוח גרפי אחד של הכוח על הבורג כפונקציה (ציר Y) של מיקום הבורג במחר.
 - לכל אחד מ-4 העומסים הכוללים יש לתאם קו שמחר בין 5 נקודות שהן העומסים על 5 הברגים באותו עומס.
- נספחים לתרגיל 2: הסבר נוסף, מדי מעוות, מנופים פשוטים, חלוקת העומס באום.
- א. לחלוקת העומס בין הברגים צורה אופיינית בגלל התכונות הבאות:
1. בורג, בניגוד למסמרה, אמור לתפקד רק בתחום האלסטי שלו ואין להביאו למאמצי עיוות פלסטי.
 2. הבורג מתנגד לתזוזה יחסית בין הלוחות במקום שהוא מהדק או אפוף (תקוע) בו. העומס עליו גדול ככל שהתזוזה האלסטית היחסית בין החלקים שהוא מחזיק גדולה יותר.
- חלוקת העומס בין הברגים כפי שמתוארת בסעיף ג' לעיל מביאה לידי כך שחלוקת העומס בין הברגים וכך גם הגרף של העומסים החלקיים בכל עומס כללי אמורה להיות סימטרית.
- ב. טכניקת מדי עיבור (או מדי מעוות, באנגלית Strain Gauge)
- 
- מדי מעוות הם נגדי חשמל קטנים ודקים כנייר שמשנים את התנגדותם עם כל שינוי זעיר במימדיהם. הם מודבקים לחלק המכונה הנבדק (במיתקן הניסוי הזה לוח המחר) כך שמקבלים בדיוק את אותו עיבור (דפורמציה יחסית) שנוצר בחלק בגלל העומס שבו הוא מוטרח. העיבור נמצא ביחס ישר למאמץ והפוך למודול יאנג E .

1. תחום המדידה של מד מעוות נמדד ביחידות μS -מיקרוסטריין – התארכות בתוספת של מיליונית האורך המקורי. בנתוני מאמץ זה מיליונית ממודול ינג. המדידה במדי העיבור כאן ליניארית בתחום של $20 \mu S$ עד $2000 \mu S$ (שזה 0.2% התארכות) כלומר חלק ניכר מתחום האלסטיות של פלדות ויותר מזה של פלדה רכה.

2. שינויי ההתנגדות: למדי המעוות בניסוי תחום התנגדות $120 \pm 0.2 \Omega$. תחום שינוי ההתנגדות בעומס ניסוי לא עולה על $\Delta R = 0.8 \Omega$. במצב כזה מדידת התנגדות פשוטה לא יכולה לתת את הדיוק הנדרש.



"גשר ויטסטון" (Wheatstone bridge) הוא מכשיר שלא מודד התנגדות אלא משווה בין שתי התנגדויות – זו של מד המעוות המועמס מול מד מעוות זהה בלתי מועמס. יתרונות השיטה:

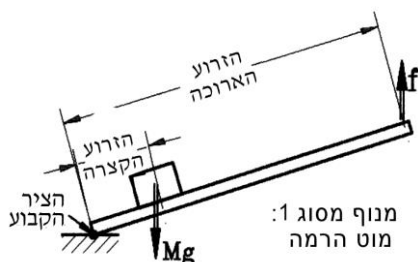
א. תחום ההתשתנות הזעיר לבדו תופס את רוב הסקלה (תחום המדידה או רוחב הפס) של המכשיר וכך נותן חלוקה (רזולוציה) טובה מאד, ברמה של μS בודדים.

ב. ההשוואה גם מקזזת שינויי התנגדות כתוצאה משינוי טמפרטורה – בתנאי ששני מדי המעוות מודבקים לאותו לוח מתכת. לכן מד המעוות המשווה R_t נקרא גם "פיצוי טמפרטורה" (Temperature compensation).

ב. גשר ויטסטון דיגיטלי ניתן לאיפוס (קיצוץ הפרש התנגדות ראשוני ללא עומס) וכיול (המרה נוחה באמצעות המכשיר מעיוות יחסי לגודל כוח ביחידות הרצויות) ע"י כיוון של נגדים משתנים. למעשה המכשיר קורא שינוי התנגדות שהוא ביחס ישר לעיבור, העיבור כפול E נותן את המאמץ וזה כפול שטח החתך נותן את הכוח. אבל כאמור הגשר במעבדה דיגיטלי והכיול נותן ישירות את הכוח ע"י הכפלה במקדם (פקטור) הכיול. התנאי לקריאת כוח נכונה הוא שחלקי המחובר עשויים מאותו חומר ויש להם שטח חתך אחיד.

ג. תוצאות ומסקנות:

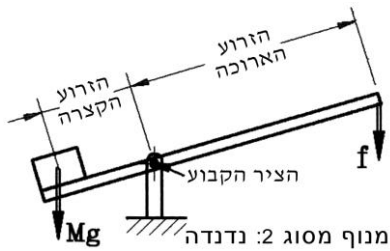
1. התפלגות העומס בין הברגים מסתדרת תאורטית בצורה סימטרית: הבדלי העיוות בין קטעי המחובר שבין הברגים גדולים בקצוות וקטנים יותר באמצע ולכן כך גם העמסים על הברגים.
2. בבניית מחבר מעשי מהסוג הזה אין טעם לחשב ברגים שונים לפי העומסים שעליהם ונהוג לחשב עומס משוער על בורג חיצוני ע"י הכפלת העומס הממוצע במקדמים נסיוניים. בבניה משתמשים בברגים שווים לפי החישוב המירבי כדי למנוע בילבול וסיבוך פעולות הקדיחה והסגירה. לחישוב הגברת הכוח ע"י המנוף יש לזהותו – מוט הרמה או "נדנדה". לפי זה לקבוע את הזרועות שיש למדוד כדי לקבל את יחס ההגברה. לפי זה יש לחשב את הכוח F שיש לקבל מהבורג (נמדד בדינמומטר המעויין) על מנת לקבל מהמנוף את כוח המתיחה הדרוש למחבר.



ד. המנוף הפשוט: ידוע מימי קדם. פועל על עיקרון שיוון מומנטים. יש שני סוגי מנופים פשוטים:

1. מוט הרמה - עם ציר בקצה המוט ויחס הגברה i כיחס בין אורך המוט כולו לזרוע הקצרה. מנוף כזה נותן תזוזה של העומס Mg הכבד בכיוון שווה לפעולת כוח היד f (לדוגמה הרמת מכונה כבדה בתנועת מוט המנוף כלפי מעלה).

2. "נדנדה" - עם ציר לא בקצה ויחס הגברה i כיחס בין אורכי הזרועות שמשני צידי הציר. העומס Mg מוזז בכיוון נגדי לכוח f .

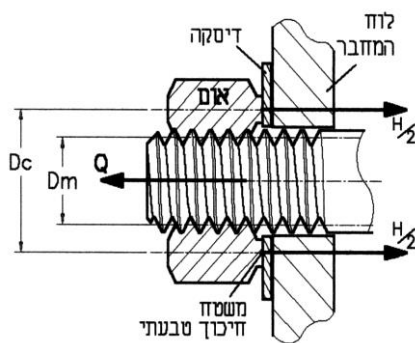


- במיתקן המתיחה שבניסוי המנוף הוא מהסוג השני: הציר אינו בקצה ולכן מתקבל כיוון תזוזה נגדי - מתיחת המחבר בכוח Q ע"י סגירת בורג לקבלת הכוח F .
3. בניסוי מתקבל ע"י הבורג הכוח F , מבוקר בדיוק מתאים עם נעילה טובה, אבל הנצילות שלו נמוכה ולכן הוא לא מספיק גדול.

הכוח הזה בקצה הזרוע הארוכה H_2 של המנוף יוצר מומנט. הכוח הנדרש Q מתקבל בקצה הזרוע הקצרה H_1 מהמומנט הנגדי והוא גדול פי $i = H_2/H_1$ (יחס ההגברה של המנוף). לעומת זאת, הדרך שעובר הכוח F ארוכה פי i מהתארכות המחבר שנגרמת ע"י הכוח המוגבר Q . (כך יוצא שכמות העבודה - מכפלת הכוח והדרך של הכוחות (כמעט) שווה (בהזנחת הפסדים).

4. נצילות המנוף גבוהה אבל ללא נעילה ובקרה. הפסדי מומנט נגרמים בצירים אם הם ללא גילגול והם גדלים ככל שגדול רדיוס הצירים. להקטנתם משתמשים בציר דק או במיסבי גילגול.
5. במיתקן המתיחה במעבדה למנוף צירים עבים (הרבה מעבר לנדרש) והנצילות המכנית בכל זאת כ-95%.
- בתרגיל אין להפסד המומנט שום השפעה על הניסוי העיקרי - יחס חלוקת העומס בין הברגים ולכן נזנח.

ה. השלכה לגבי חלוקת העומס בין הכריכות (ליפופים) בתבריג מהודק:



- אותה תופעה שמקורה בהפרשי אלסטיות גורמת לכך שהעומס בכריכות תבריג של בורג ואום מחולק באופן לא שווה.
- בניגוד למחבר שבו שני האגפים נמתחים, בבורג ואום הבורג נמתח ואילו האום נלחץ וחלוקת העומס בין הכריכות בתבריג יוצאת חד צדדית ולא סימטרית: הכריכה הראשונה נושאת בכמחצית העומס, השנייה בכרבע, השלישית בכששית והכריכה ה-5 כמעט חפשית מכל עומס.
- לכן אומים של ברגי הידוק מיוצרים בדרך כלל קצרים ולא כוללים יותר מ-6 כריכות.

הסיבה לשוני הזה בין מחבר מתיחה לבורג ואום:

- במחבר שני האגפים A ו-C מוטרחים למתיחה, שניהם מתארכים והתזוזות הן הפרשי התארכות.
- לעומת זאת בצמד בורג ואום, הבורג מוטרח למתיחה ומתארך, אבל האום מוטרח ללחיצה ומתקצר.
- וכשהסימן הפוך ההפרש המוחלט הוא סכום הערכים המוחלטים. זה ההסבר המתמטי.
- ההסבר הפיסיקלי הוא שהלחיצה מירבית באום היא בדופן שמהדקת את המחבר. ובבורג באותו מישור פועל כל כוח המתיחה.
- אחרי הכריכה הראשונה נותר פחות כוח ועיוות לחיצה באום ופחות מתיחה בבורג. בכריכה הבאה באום עוד פחות וכך הלאה ממישור ההידוק לתוך האום העיוות והעומס הולכים ופוחתים.

ניסוי מס' 3 : תנועה סיבובית ואיזון מסות סובבות

מטרות:

1. להכיר את בעיית אי האיזון בחלקי מכונות סובבים וסיבותיה.
2. להכיר את 3 הדרכים לאיזון (הפחתה, תוספת והזזה) ואת המקרים בהם משתמשים בהן.
3. להכיר את שתי השיטות לאיזון – הסטטית - מישורית והדינמית- מרחבית.
4. ליצור אי-איזון מכוון ולאזן אותו ע"י תוספת מסות מחושבות בשתי השיטות.

תופעות בתנועת חלקים סובבים: התמד צנטריפוגלי ואי-איזון

- א. בגוף סובב שואף כל חלקיק ממנו להתמיד בתנועה בקו ישר משיקי לתנועתו. חומר החלק קושר אותו שלא "יברח" בכוח צנטריפטלי, ששווה בגודל ומנוגד בכיוון להתמד הצנטריפוגלי.
 - ב. לכל גוף סובב יש מהירות סיבוב גבוהה שמעליה החוזק הפנימי לא מספיק והוא עלול להתפרק!
 - ג. ההתמד של כל חלקיק גורם במבנה למאמץ ובכך הוא משפיע על החלקים וסיבתם ממש כמו כוח אמיתי (עקרון ד'אלמבר) ולכן נהוג לקרוא לזה כוח צנטריפוגלי,
 - ד. גדלו של הכוח הצנטריפוגלי הוא $F_c = m \cdot r \cdot \omega^2$. ביחס ישר למסת החלקיק m , למרחקו מציר הסיבוב r ולריבוע מהירות הסיבוב.
- מהירות סיבוב נמדדת טכנית בסל"ד n , לעתים בתדירות f (סל"ש).
- ביחידות ISO היא נקראת מהירות זוויתית, מסומנת באות היוונית ω ונמדדת ברדיאן (זווית שאורך הקשת שלה שווה לרדיוס) לשניה.
- ה. כשכל היחידות הן של ISO מתקבל הכוח הצנטריפוגלי ישירות (ללא מקדם כלשהו) בניוטונים: המכפלה $m \cdot r$ של מסה חלקית במרחקה מציר הסיבוב המעשי היא וקטור שנקרא מומנט-מסה.
 - ו. במקום שבו הסכום הוקטורי של מומנטי המסה של כל חלקי הגוף מתאפס: $\sum m r = 0$ מצוי מרכז הכובד של אותו גוף, פשוט או מורכב, סובב או לא.
- כאשר גוף סובב חופשי הוא שואף לסוב סביב מרכז הכובד שלו, שנשאר במקום קבוע.
- ז. כאשר גוף סובב הוא חלק ממערכת מכנית, הוא סובב סביב ציר מאולץ – של גל, סרן או יד. אם מרכז הכובד של הגוף הסובב לא נמצא בדיוק על הציר המאולץ, הוא שואף לסוב סביב מרכז הכובד שלו ולקחת את הציר איתו. מכאן תופעת הרעידה במצב שמוגדרת כאי-איזון.
 - ח. אי-איזון במערכת סובבת יוצר מצב של רעידת המערכת בקצב הסיבוב.
 - ט. התופעה מזיקה ככל שאי האיזון חמור יותר (המרחק – אקסצנטריות - בין מרכז הכובד לציר המאולץ גדול יותר) וככל שמהירות הסיבוב קרובה למהירות הקריטית.
- מהירות קריטית היא מהירות מסוימת שבה מופיעה תהודה (רזוננס) והרעידות גוברות מעל ומעבר לאי האיזון עצמו ועלולה להיות הרסנית. מעל המהירות המסוימת הזו, נעלמת התהודה.
 - לחקירת נושא המהירות הקריטית יש תרגיל מיוחד במעבדה זו.
- ◀ במקרים קיצוניים של אי-איזון מופיעה "התעייפות החומר" מהירה ועלול להיגרם שבר פתאומי.
- ◀ במקרים פחות חמורים עומדים גג"ש ומיסבים בכוחות מתחלפים שלא תוכננו להם ואורך חייהם מתקצר באופן משמעותי. , כמו כן עלולה להופיע "התעייפות חומר" הדרגתית.
- ◀ במכונות עיבוד בכלל ועיבוד שבבי בפרט, גם רעידות שאינן מזיקות למכונה משבשות את תיפקודה: טיב העיבוד ירוד ואורך החיים של כלי עיבוד יקרים יורד גם אם התופעה לא מחמירה עד שחלקים במכונה עצמה ניזוקים.

במקרים מיוחדים משמשת מערכת לא מאוזנת במכוון כמערכת הרעדה במכונות לגימור שטח ופינות במוצרי מתכת, נפות, מכבשי דרכים ועוד. במקרים אלה מחושבים חלקי המערכת לכוחות שנגרמים ע"י אי האיזון.

במערכת שבניסוי וכמוה במכונת כביסה, המערכת הסובבת קשורה למסגרת שתלויה על קפיצים רכים, זה מאפשר לגוף הסובב לקחת איתו את הגל ויתר חלקי המערכת שתלויים על הקפיצים לסיבוב עם הגל והמסגרת סביב מרכז כובד משותף.

זה מפחית מאד את העמסת הגל והמיסבים בעומס מתחלף כי במקום כל הכוח הצנטריפוגלי מופיע רק כוח שגדלו $F=k \cdot \varepsilon$ שתלוי בגודל התנודה ומקדם הקפיץ (הנמוך יחסית בקפיץ רך).

דוגמת מכונת הכביסה, שאי האיזון בה בלתי צפוי ומשתנה אפשר להדגים באמצעים נוספים:

- ממסגרת יציבה תלוי הדוד על קפיצים רכים, ובתוכו התוף הסובב שבו כביסה כבדה ספוגת מים, ומחוצה לו מחובר אליו המנוע החשמלי שהוא כבד יחסית ולרוב גם משקולות נוספות.
- ריסון: ספיגת אנרגיה מהעזוועים ע"י רכיבים במערכת או שנמצאים במגע ישיר איתה כמו סמכים, ובעיקר "בולמי זעזועים" עשויה להקטין את עוצמת הרעידות.
- תוספת מסה: זו עשויה להקטין את גודל התנודה ע"י הקטנת האקסצנטריות והפחתת התאוצות. במכונת הכביסה משקולות כבדות מוצמדות לדוד שתלוי על הקפיצים הרכים ואינו סובב.

א' האיזון מוגדר בשתי הגדרות שונות אך שוות ערך מבחינה חישובית:

1. סכום הכוחות הצנטריפוגליים בעת סיבוב הגוף סביב ציר הסיבוב (הטכני, המאולץ) שונה מאפס.
2. ציר הסיבוב המעשי (המאולץ ע"י המיסבים) אינו עובר דרך מרכז הכובד של הגוף הסובב ויש מרחק e מסוים שנקרא אקסצנטריות (סטייה ממרכז) בין ציר הסיבוב למרכז הכובד.

משמעות הקשר הזה לגודל התנודות: כשבין מרכז הכובד של הגוף הסובב לציר הסיבוב יש מרחק מסוים e , גודלו של שקול הכוחות הצנטריפוגליים שמטריח את הציר (גל או סרן) שעליו סובב הגוף הוא $\Sigma f_c = \Sigma m \cdot r \cdot \omega^2 = M \cdot e \cdot \omega^2$ כאשר M הוא מסת המערכת הסובבת כולה ו- e נקרא אקסצנטריות. השוני בין ההגדרות בכך שמרכז כובד יש לכל גוף, סובב או לא ואילו כוח צנטריפוגלי מופיע רק בעת סיבוב. בתנועה סיבובית סביב ציר מאולץ הן קשורות זו לזו: אותו גורם – סכום מומנטי המסה סביב הציר המאולץ הוא שקובע את גודל האקסצנטריות והוא שקובע גם את גודל השקול הצנטריפוגלי:

כאשר $m r = 0$ ביחס לציר הגל, מרכז הכובד נמצא עליו. כשהוא במצב סיבוב גם סכום הכוחות הצנטריפוגליים $\Sigma m r \cdot \omega^2$ שווה אפס והגוף מאוזן בשתי ההגדרות.

י. הפרת האיזון והחזרת המערכת הסובבת לאיזון.

אם מוסיפים לגוף מאוזן מסה m במרחק מסוים r מציר הסיבוב, האיזון מופר וזו "הפרעת איזון".

על פי רוב אי-איזון בחלקי מכונות סובבים עלול להופיע כתוצאה מאי דיוק (סטייה ממרכזיות) בייצור, אי אחידות בחומר באופן השחזה. בעובי דופן בחלקי גומי כמו צמיגים ותוספות כמו סלילים ברוטור של מנוע חשמל. בחלקים כמו גלי ארכובה יש קטעים סוטים מהמרכז לצורך תיפקוד החלק.

פעולת האיזון היא הבאה למצב שבו מרכז הכובד של המערכת מובא אל הציר בדיוק הנדרש.

זה ניתן לביצוע ב-3 דרכים:

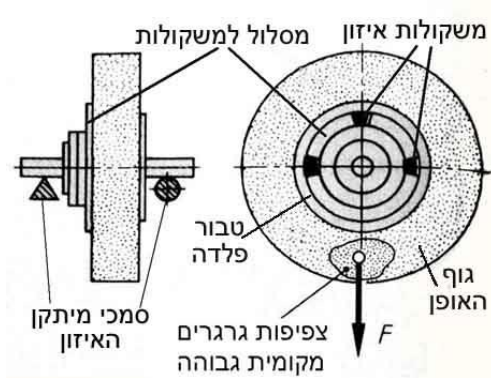
1. ע"י הוספת מסות מחושבות במיקום המתאים או הנוח ביותר בכיוון נגדי לשקול מומנטי המסה. הוספת עוד מסה $M1$ בכיוון הנגדי להפרעה במרחק $R1$ מהציר באופן שיזיז את מרכז הכובד חזרה

אל ציר הסיבוב.

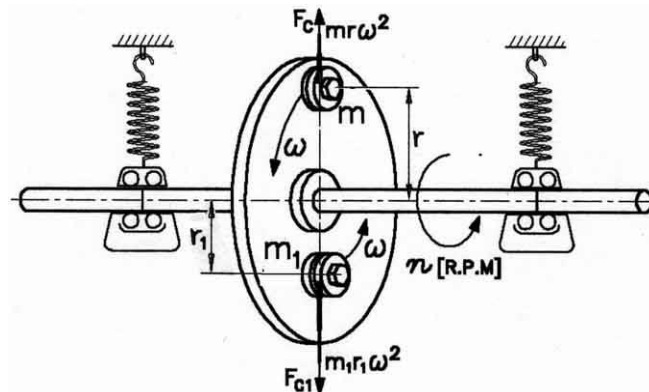
דבר זה נעשה בצורה פשוטה באיזון גלגלי רכב – הצמדת משקולות לחישוק (גינט) על הגלגל המורכב אחרי החלפת צמיג (שאינו מספיק מאוזן מטבעו בשל אי-אחידות קלה בחומר ובצורה). בתיקון תקר למעשה צריך לחזור על האיזון, אבל מתקני התקרים מצאו שיטה להימנע מכך – הם מסמנים לפני פירוק הצמיג את מיקומו (צד וזווית) על החישוק, ולפני הוספת הטלאי, שמפריע גם הוא לאיזון, יוצרים בהשחזה שקע ששווה פחות או יותר למסת הטלאי.

2. הפחתת מסה ע"י קדח, חריץ או "גילוח" חומר (במידה ולא נגרם מכך נזק) בכיוון זהה לכיוון ההפרעה. הפחתת מסה לא חיונית כך שמרכז הכובד יתקרב או יגיע לציר. זה נעשה בחלקי מתכת סובבים כמו רוטורים של מנועי חשמל ומפוחים, כנפי מאווררים וטורבינות וגלי ארכובה. לרוב נעשית הפחתת המסה ע"י קדיחת קדח, עיוור (לא חודר) או עובר. לקדיחה יש את היתרונות:

א. היא ניתן לביצוע מדויק מבחינת המיקום, הזווית וגודל המסה. כלומר מיקום הקדח, עומקו וקוטרו ניתנים לביצוע מדויק להפחתת מומנט המסה במידה הרצויה.



הזזת משקולות



הוספת מסה (משקולות)

ב. בהוספת מסה יש לחבר ולדאוג שהחיבור יהיה איתן לאורך זמן בתנאי סיבוב מהיר. קדח לעומת זאת אין סיכוי שיברח ממקומו בשום מצב ומהירות סיבוב.

ג. הקלה ממשקל גוף סובב מורידה את מומנט האינרציה שלו ומאפשרת האצה מהירה אם זה דרוש.

3. הזזת משקולות במסלול מוכן מראש בתוך המערכת: שינוי המיקום של משקולות שנמצאות במסלולים קבועים בחלק. שינוי זווית במסלול מעגלי (דוגמת אופן ההשחזה בתמונה) או שינוי מרחק במסלול רדיאלי. במערכות יקרות ורגישות מאד לשינויי איזון תוך עבודה יש גם מנגנונים להזזת משקולות לאורך מסלולים לאיזון אוטומטי תוך פעולת המכונה.

בניסוי במעבדה מבוצעים איזונים רק בתוספת מסות.

יש מקרים שבהם אין מאזנים, אם מפני שאין בכך טעם או שיש לכך שימוש

□ במכונת כביסה אין טעם לנסות לאיזן את תוף הכביסה ומעדיפים לקבל את יציבות המכונה

בשיטה של להניח לדוד להתנוודד כשהוא תלוי על קפיצים רכים.

□ במכונות כמו מכבש למדרכות יש מערכת ממונעת להרעדה (גם שהוא נגרר ידנית יש עליו מנוע)

ארכובה לא מאוזנת סובבת והכוחות הצנטריפוגליים פועלים בתדר שמתאים לכבישת אספלט.

□ בטלפונים סלולריים יש מערכת הרעדה זעירה כזו כדי לתת הרעדה של המכשיר בזמן קריאה.

איזון מעשי לא חייב להיות אידיאלי, מידת הדיוק הנדרשת היא כמו בכל סבולת - מאיזה גודל ומטה זניחה ההשפעה הרעה של אי האיזון.

חלקי מכוונות אחידים שמיועדים לתפקד סובבים מיוצרים כגוף סיבובי (בחריטה) או בעל סימטריה רדיאלית (מבנה חוזר על עצמו מסובב סביב הציר בחלוקת מעגל לזוויות שוות כמו גלגל שיניים) כך שהם בקירוב רב מאוזנים מטבעם.

בייצור מערכות סובבות **מורכבות** (כמו טורבינות, רוטור מנוע חשמלי, צמיג לרכב) בדרך כלל אין שליטה מספקת על חלוקה שווה של המסה במרחב והן אינן מאוזנות מטבען. איזון נעשה ע"י הסרה ו/או הוספה של אלמנטי מסה, כדי לגרום להזזת מרכז הכובד אל ציר הסיבוב. (להביא את ציר הסיבוב אל מרכז הכובד הרבה יותר קשה ולגמרי מיותר). האיזון חשוב רק לחלקים סובבים. לכן הוא מתבצע רק **לאחר גמר הייצור**, או לפני עיבוד שבו החלק צריך להסתובב בתוך העיבוד, כמו חריטה או השחזה גלילית ואסור שירעיד את מכוונת הייצור. לרוב מאזנים מערכות סובבות רק לאחר גמר ייצורם כדי שהתיפקוד המעשי שלהם יהיה תקין.



גל ארכובה של מכסחת דשא 1 בוכנה

גל ארכובה של מנוע רכב 4 בוכנות

חלקים כמו גלי ארכובה, אקסצנטרים וכו' מיועדים מראש לסוב סביב ציר מרוחק ממרכז הכובד. לכן הם בכלל אינם "מאוזנים מטבעם". הפתרון לגלי ארכובה כפול – בייצור עצמו מוסיפים להם "כרבולות" של מסה מאזנת בקירבת הארכובות לביטול גס של אי האיזון ובהמשך, לאחר תום הייצור, מבצעים איזון סופי עדין בהפחתה ע"י קדחים במיקום מדויק בראשי ה"כרבולות".

שתי שיטות האיזון:

מבחינת המורכבות הטכנית לבדיקת האיזון מבחינים בין שתי שיטות איזון:

1. איזון סטטי – מישורי - השיטה הפשוטה שבה האיזון ניתן לבדיקה גם ללא סיבוב מאולץ של הגוף. איזון זה מתייחס רק לסטיית מרכז הכובד מהציר (שיוצרת את השקול הצנטריפוגלי בעת סיבוב) בהזנחת מומנט הצמד שמופיע לאורך ציר הסיבוב בגלל מרחק (זרוע מומנט) בין קו הכוח (הניצב לציר) של ההפרעה - השקול הצנטריפוגלי (לפני האיזון) לקו של הכוח הצנטריפוגלי המאזן. איזון כזה הוא למעשה קירוב והוא טוב רק לגוף בצורת דיסקה בעובי קטן יחסית לרדיוס. במבנה כזה המרחקים בין קווי הכוחות האלה קטנים יחסית. איזון זה ניתן לביצוע כאמור גם באופן סטטי: החלק בצורת דיסקה עם גל בצירו מונח חפשי על מיתקן עם חיכוך זעיר, אם הוא לא מאוזן, הכבידה גורמת לה לסוב עד שמרכז הכובד מתייצב מתחת לציר. כך מוצאים את הכיוון שבו יש לגרוע או להוסיף מסה אחת כדי ליצור מומנט מסה מאפס (שווה ונגדי) לשקול הצנטריפוגלי.

2. איזון דינמי – מרחבי: השיטה הכללית שבה האיזון ניתן לבדיקה רק כאשר המערכת סובבת בפועל.

כאשר הגוף הסובב ארוך, כלומר קו הציר ארוך יחסית לרדיוס, המרחקים בין קווי הכוחות הצנטריפוגליים של אלמנטים שונים לאורך הציר הם זרועות של מומנטים ניכרים. כוחות שווים מקבילים ונגדיים יוצרים צמדי מומנטים שגורמים לטילטול הגוף הסובב לאורך הציר, לכן יש לדאוג לכך שבנוסף לצורך לאזן את הכוחות הצנטריפוגליים שמופיעים, הכרחי לאזן גם את המומנטים שהם יוצרים לאורך ציר הסיבוב.

זה נעשה ע"י הוספת (או הפחתת) לפחות שתי מסות, במקומות שבהם נוח ומותר לעשות זאת. התנאי לאיזון כזה הוא שסכום מומנטי המסות של המסות המתקנות משתווה לזה של המסה המפריעה ויחד עם זאת גם סכום המומנטים שהם יוצרים לאורך הציר יתאפס.

בחירת השיטה לאיזון:

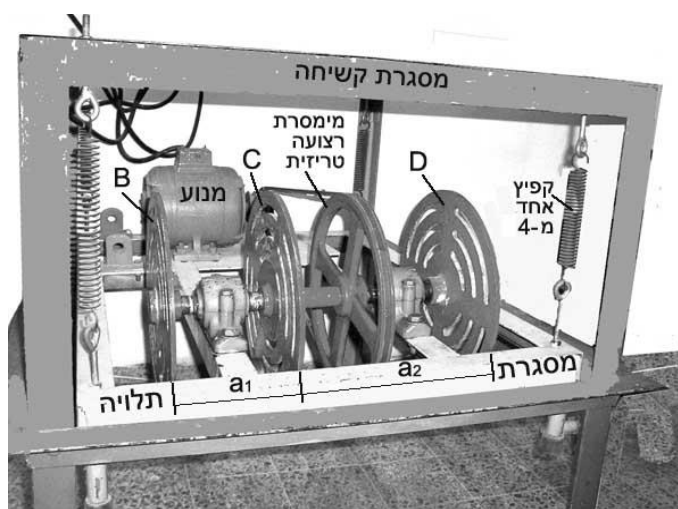
השיטה הסטטית (ללא סיבוב הגוף הנבדק) משמשת בכל מקרה שמומנט צמד הכוחות של ההפרעה והתיקון קטן והשפעתו זניחה.

בכל מקרה אחר, כולל פשוט כמו גלגל רכב עם צמיג לא אחיד, יש צורך באיזון דינמי.

כאשר הגוף הסובב רחב (עבה) יחסית לקוטרו, אפילו במקרה שבו ניתן להוסיף את המסה המאזנת בכל מקום על או בתוך הגוף הסובב, לא ניתן לבצע את הבדיקה איפה לאורך הציר נמצא קו הפעולה של שקול ההפרעה ללא סיבוב הגוף הנבדק. לאחר מכן אפשר במקרים הנדירים האלה לשים מסה מתקנת אחת ממול להפרעה.

מיתקן הניסוי במעבדה:

המערכת הסובבת במיתקן הניסוי כוללת 3 דיסקות: B, C ו-D. מורכבות על גל שמחובר במיסבים למסגרת תלויה על קפיצים רכים. תפקיד התליה על קפיצים לאפשר למערכת לנוע לפי נטייתה ולא להיבלם ע"י ריתום הגל והמיסבים למסגרת הקשיחה שמסביב. בין הדיסקות מרחקים שונים כמתואר באיור: a_1 הקצר, בין B ל-C ו- a_2 הארוך, בין C ל-D. המערכת הסובבת מונעת ע"י מנוע חשמלי באמצעות ממסרת רצועה טריזית. לממסרת



יחס הפחתה שגורם למערכת לסובב במהירות נמוכה בהרבה מזו של המנוע.

בדיסקות יש חריצים למיקום משקולות (מסות) ב-3 מרחקים (רדיוסים) אפשריים מציר הגל:

1 הוא הקצר, הפנימי, 2 הוא הבינוני ו-3 החיצוני. 3 הדיסקות הן באותן המידות.

ניסוי מס' 4: מהירות קריטית של גוף סובב על גל

מטרות:

1. להכיר את התופעה של תהודה בחלקי מכונות סובבים, גורמיה וסכנותיה.
2. להכיר את הקשרים בין מבנה מערכת לבין המהירות הקריטית שלה.
3. תירגול דרך החישוב למציאתה במערכת פשוטה.
4. הכרת פתרונות למניעת נזקים מהתופעה בתחום מהירויות העבודה של מכונות.

תיאוריה:

מהירות קריטית של גוף סובב על גל או סרן היא מהירות סיבוב מסוימת שבה ובתחום הקרוב לה נכנסים הגוף והגל לרעידה קשה. תופעה זו מזרזת מאד תופעות מזיקות כמו התעייפות החומר וייתכן אף הרס מהיר של החלק הסובב וסביבתו, לכן היא נקראת קריטית ויש להימנע ממנה.

- במכונות זהו תחום המהירות שבו מרגיש הנהג רעידה קשה בהגה בשל אי-איזון בגלגלים.
- גם במקרים קלים נגרמים רעשים ובלאי מואץ של חלקי מכונות כמו גלגלי שיניים ומיסבים.
- במכונות עיבוד שבבי גם אי-איזון קל פוגם בדיוק העיבוד, בטיב פני השטח ועלול לשבור חוד בכלי.
- בהשחזה זה מסכן את אופן (גלגל) ההשחזה להתרסקות.

גורמי התופעה הם:

- א. חוסר איזון של המערכת הסובבת.
 - ב. האלסטיות של הגל או הסמך של המערכת (מקדם הקפיציות שלה).
 - ג. מהירות הסיבוב, שהיא מחזורית ולה תופעות שקשורות לתדירות כמו שיש בגלי קול, אור ותנודות.
- חוסר איזון הוא מצב שבו ציר הסיבוב של גוף סובב לא עובר דרך מרכז הכובד שלו ולכן שקול הכוחות (למעשה התמדים) הצנטריפוגליים של כל חלקיו אינו מתאפס (מפורט בניסוי מס' 3 – איזון).
- האקסצנטריות e - המרחק בין מרכז הכובד של גוף סובב לציר הסיבוב הטכני, היא מדד לחוסר איזון. בגוף סובב לא מאוזן מופעל על הגל שקול הכוחות הצנטריפוגליים שגודלו $F_C = m \cdot e \cdot \omega^2$ [N] כאשר: m היא מסת המערכת הסובבת בקילוגרם (מסה).
- ω היא מהירות הסיבוב (זוויתית) ביחידות רדיאנים לשניה.
- $$\omega \left[\frac{rad}{sec} \right] = \frac{2 \cdot \pi \cdot n[R.P.M]}{60}$$
- הכוח הצנטריפוגלי השקול משנה את כיוונו במהירות הסיבוב וגורם להרעדת המערכת וסביבתה. בגוף סובב מאוזן לחלוטין (אידיאלי) מרכז הכובד נמצא בדיוק בציר הסיבוב המאולץ (ציר הגל או הסרן), כשזה כך אז $e=0$ וגם השקול (הסכום הוקטורי) של הכוחות הצנטריפוגליים אפס. מערכת טכנית לא ניתנת לייצור מאוזנת לגמרי, אבל יש תחום סביר של e שבו הכוח F_C זניח. זה נכון עד שמהירות הסיבוב נכנסת לתחום הקריטי שמקורו בתופעת **התהודה (רזוננס)**.

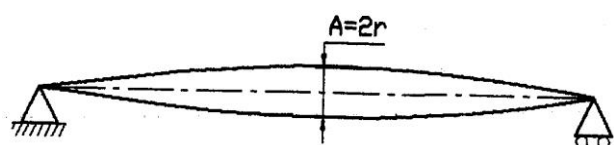
תהודה היא מצב שבו גל או כוח מחזורי שגורם תנודה מופיע בזמן ובכיוון זהה עם החזרה מהתנודה הקודמת. גודל התנודה או עוצמת הגל מתווספים לגודל התנודה החוזרת, התנועה החוזרת הבאה גדולה יותר ובתנודה הבאה מתווספת שוב. כך העוצמה גדלה ככל שרבות החזרות. זה מוכר לכל ילד בגן (שעשועים) – אם הוא מוסיף תנופה בעת ירידת הנדנדה, כל תנודה נוספת גדולה מהקודמת.

תדירות (תנודה) עצמית היא תנודה מחזורית בתדירות קבועה (תנועה הרמונית) לאחר שמערכת מקבלת דחיפה או מכה חד פעמית. התדר לא תלוי בעוצמת המכה או בגודל התנודה אלא קבוע כתכונה של מערכת שבה מסה נמצאת בתנועה מחזורית סביב מצב שיווי משקל. יש שני סוגים:

1. מטוטלת - משקולת על חוט או מוט כמו שיש בשעונים עתיקים. כך גם נדנדה על חבלים. הכוח המחזיר הוא מקדם כוח הכבידה g והתדירות היא תלות שלו ושל אורך החוט או המוט L . נוסחת התדירות העצמית היא $\omega = \sqrt{g/L}$ וגודל המסה לא קובע כל עוד מסת החוט זניחה יחסית אליה.
2. מערכת מסה וקפיץ, שבה הכוח המחזיר הוא של קפיץ והתדירות תלויה במקדם הקפיץ k ובגודל המסה m . נוסחת התדירות העצמית $\omega = \sqrt{k/m}$.

ריסון או בלימת זעזועים: במקרה של מכה בודדת יש מקרים שהתנודה העצמית של מערכת נמשכת לזמן ארוך יחסית כמו צילצול פעמון, קולן או מיתר של כלי נגינה ויש שהיא נפסקת מהר. זה לא קשור בתכונות הנ"ל אלא בנוכחות גורמים שסופגים או בולעים אנרגיה במערכת. ככל שאלסטיות המערכת גבוהה התנודה נמשכת יותר ולעומת זה אם במערכת יש או נוספו במתכוון גורמי ריסון התנודה נבלמת.

תנודות בחלקי מכוונות סובבים: לכל חלק סובב יש כמובן מסה. לגל ולסמכים שמחזיקים אותו במכונה יש קפיציות (אלסטיות) ושני אלו הגורמים לקצב התנודה האחד שלו לאחר שמכים בו. גוף סובב שואף לסוב סביב מרכז הכובד שלו. אם הוא לא מאוזן ומרכז הכובד אינו על ציר הגל. הוא מושך ומסיט בכוח צנטריפוגלי את הגל ממקומו. הגל המוסט מגיב בכוח הקפיציות שלו ונגרמת תנודה מחזורית לפי התדירות העצמית של המבנה שהוא מערכת בעלת מסה על קפיץ.



שילוב שתי התנודות גורם לכך שמרכז הגל מוסט ממרכזיותו ונע במעגל שהרדיוס שלו r . שתאורטית גודל הרעידות מבוטא במשרעת (אמפליטודה) שגודלה $A=2r$. r הוא רדיוס מעגל התנודה.

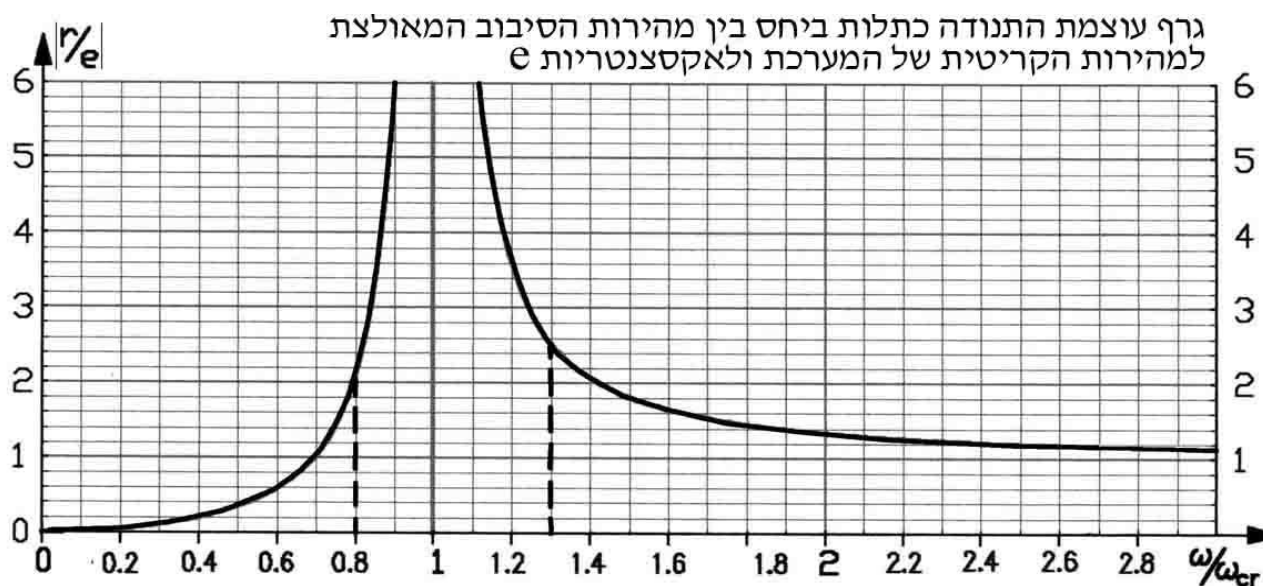
הכוחות על הגל והמיסבים: הגל במצב זה מפעיל כוח מתחלף על המיסבים בעוצמה $r \cdot k = F$.

k הוא מקדם הקפיץ של הגל שבדרך כלל קשיח ולכן k שלו גדול מאד יחסית לגודל המערכת.

תנודות גוף סובב בתחום המהירות הקריטית:

גרף עוצמת התנודה ממחיש את התחום המסוכן של המהירות הקריטית:

כאשר תדירות הסיבוב ואיתו שינוי הכיוון הרגעי של ההתמד הצנטריפוגלי משתווה לתדירות העצמית. $\omega_{CR} = \omega$, או קרוב לכך, הביטוי $(\omega_{CR} / \omega)^2$ שואף ל-1, המכנה של הנוסחה $r = \frac{e}{(\omega_{CR} / \omega)^2 - 1}$ שואף ל-0 והגודל r שואף לאינסופי.



בעוד שמחוץ לתחום הקריטי עוצמת התנודה המעשית מושפעת במידה רבה ע"י האקסצנטריות e . באזור הקריטי היא מושפעת בעיקר ממשך הזמן שהתהודה נמשכת והתנודות גדלות מסיבוב לסיבוב, במערכות סובבות מופיעה התהודה כשמהירות הסיבוב המאולצת ע"י מניע חיצוני משתווה לתדירות העצמית של המערכת, אשר תלויה רק במסה של המערכת ובקפיציות של הגל והסמכים שלה. (תלות זו מודגמת במיתקן הקפיץ והמשקולות).

ריסון בתחום הקריטי – כאשר e לא גדולה, התגברות הרעידה נבלמת ולא גורמת שבר, יש בליעה של חלק מאנרגיית הרעידות ע"י המערכת הסובבת עצמה והמכונה. זה מביא לכך שהרעידה יכולה להיות מוגבלת או **מרוסנת** גם בתחום הקריטי של מהירויות הסיבוב (וזה מה שיש בתרגיל המעבדה). גם במצב כזה אין להשאיר מעבר לשניות אחדות בגלל נזק מצטבר שעלול לגרום שבר התעייפות פתאומי (!) המסקנה מהאמור ומהגרף בעמוד הקודם היא שאסור להשאיר מערכת סובבת לעבוד בתחום שבין $0.8\omega_{CR}$ ל- $1.3\omega_{CR}$ ורצוי להימנע גם מקירבה לתחום המסוכן הזה.

התחום שמתחת למהירות הקריטית נחשב לתחום היציב. בתחום הנמוך ממש אין תנודות מורגשות גם במצב חוסר איזון ניכר. הגל וסמכיו מאלצים את המערכת הסובבת לסוב סביב ציר הגל. מערכת שמתוכננת לתפקד רק בתחום הזה אין סכנה שתגיע בטעות לתחום המסוכן.

בתחום שמעל המהירות הקריטית, לפי הנוסחה הערך $(\omega_{CR}/\omega)^2 < 1$ ואז F/e שלילי. לכך אין חשיבות טכנית אלא לערך המוחלט. ככל ש- ω גדולה מהערך הקריטי אז $|F/e| \gg 1$ (שואף ל-1 אבל גדול ממנו במקצת) כלומר הגוף הסובב מאלץ את ציר הגל לסוב איתו סביב מרכז הכובד ובכך כמעט למנוע כוחות ותנודה נוספים מעבר לנדרש לשם כך. לגרף הזה אופי של אסימפטוטה וזה נותן יציבות יחסית בעבודה בתחום רחב של מהירויות סיבוב. עם זאת חובה להישמר מפני האטה והתקרבות לתחום המסוכן.

משמעות מהירות הסיבוב הקריטית בתיכנון מערכות סובבות

כאשר מתכננים מערכת סובבת עושים קודם כל חישובים לחוזק. אבל לאחר כן יש לזהות גם את המהירות הקריטית הצפויה ובמידת האפשר ליזום שינויים בתיכנון שיביאו לידי כך שהתופעה לא תתרחש בתחום המהירויות שבו המכונה מתוכננת לעבוד. לצורך זה צריך להכיר את תכונות המערכת: מהו מקדם הקפיציות הקובע ומהי מסת החלק הסובב. לעתים קרובות המערכת הסובבת מרעידה מערכות אלסטיות שקשורות אליה וגם אותם יש לחשב לתנודה עצמית כי גם בהן עלולה להופיע תהודה. לדוגמא, מנוע רכב בנוי כך שתחום המהירויות הסיבוב של גל הארכובה בתיפקודו יהיה מתחת לאזור המהירות הקריטית של הגל הזה. הגל קל יחסית לעוביו. אבל הוא סובב בתוך המנוע הכבד שתלוי על תושבות (סוג סמכים) רכות יחסית. לכן יש להתאים את אלסטיות התושבות לכך שהמהירות הקריטית של המערכת מנוע-תושבות תהיה נמוכה ומתחת לכל מהירות עבודה של המנוע. זאת הסיבה לכך שמכונת רועדת חזק בעת המתנה לרמזור אם כיוון ה"גז מינימלי" בה נמוך מדי.

בניסוי במעבדה מבצעים חישוב ובדיקה של מערכת קיימת, שהיא הדרך ההפוכה מתיכנון.

- א. נוסחת התדירות העצמית $\omega = \sqrt{k/m}$, מגדירה את תלות התופעה באלסטיות ובמסה.
- במערכת מכנית פשוטה בתנועה סיבובית כמו בתרגיל, הגל האלסטי הוא ה"קפיץ" והמסה היא של החלק הסובב עם הגל. אם הקפיץ (או מערכת קפיצים) נושא מערכת נוספת שאינה סובבת (כמו הדוד במכונת כביסה), המסה כוללת את כל מה שתלוי על הקפיץ.

- תחילה יש למצוא בחישוב את מקדם הקפיץ k של המערכת האלסטית, במקרה הנדון גל שחתכו עגול. תחילה יש למדוד את מימדיו – הקוטר d ואורכי הקטעים a ו- b שבו.
- את המסה של הגוף הסובב ניתן לחשב לפי הנפח והחומר שממנו הגוף עשוי. בתרגיל היא נתונה. הבעייה היחידה שנשארת פתוחה היא טיב הסמכים שעליהם נשען הגל.
- החישוב בניסוי הוא לפי "נסה וטעה", מציבים את הנתונים הנ"ל ב-3 נוסחאות הנתונות בתרגיל שהשוני ביניהן הוא על פי אופי הסמכים שמחזיקים את הגל.
- מהנתונים המשותפים לנוסחאות החישוב ניתן ללמוד על השינויים האפשריים לשיפור המצב.
 - בניסוי הגל הוא כמו קורה בחתך עגול מלא ומומנט ההתנגדות $I = \pi d^4 / 64$ תלוי בקוטר בחזקת 4:
 - לפי נוסחות האלסטיות כמו $K = 6EI/a^3$ תלוי גם באורך הגל ביחס הפוך לחזקה שלישית,
 - כמסקנה מכך: הכפלת קוטר הגל d (בהזנחת משקלו) תגדיל את K פי 16 ואת ω פי 4.
 - קיצור אורך הגל a או L למחצית ארכו יגדיל את K פי 8 ואת ω פי $\sqrt{8} = 2.8$.

בנושא זה מבדילים בין מערכות סובבות קטנות לגדולות:

למכונות קטנות אופיינית מסה קטנה וציר קצר. לכן המהירות הקריטית שלה גבוהה יחסית מטבעה. במכונה כזו על פי התיכון המקורי (לפי שיקולי חוזק בלבד), סביר שתחום העבודה שלה יהיה מתחת לתחום המסוכן $\omega < 0.7\omega_{cr}$. עם זאת ייתכן שחלק מתחום העבודה שלה יהיה בתחום המסוכן. במערכת סובבת קטנה יש דרך פשוטה לפתור זאת: מכיוון שהמערכת קטנה, הגל שלה כפי שמתוכנן לחוזק אינו עבה מאד והמהירות הקריטית סביר שנמצאת באזור הגבוה של תחום מהירות העבודה. הגדלת קוטר הגל במידה סבירה תביא את $0.7\omega_{cr}$ אל מעל ומעבר לתחום העבודה. גם קיצור הגל במידה מסוימת, אם אפשרי, עשוי להועיל בכיוון זה.

גלי ארכובה במנועי רכב בנויים בעובי מוגדל מסיבה זו ואז ניתן לייצר אותם מחומר פשוט יחסית. יש מקרים שמעדיפים דווקא את קיצור הגל. דוגמא מוכרת היא מנוע V , צורה זו של הצבת הבוכנות בשני טורים עם זווית ביניהם במקום בטור אחד ארוך כרגיל בא בעיקר כדי לקצר את הגל ולתת יציבות משופרת נגד רעידות בלי תוספת (ויתכן עם הפחתה) של מימדים ומשקל.

המצב במכונות גדולות הוא הפוך. אופיינית להן מסה גדולה וגל יחסית ארוך. הגל גם עבה וכבד בגלל שיקולי חוזק. תחום המהירות הקריטית כולו אמור להופיע בהן בחלק התחתון של תחום העבודה ואז מתחתיו. להעברת המהירות הקריטית מהחלק התחתון של תחום מהירויות העבודה אל מעל ומעבר לתחום העבודה נדרשת הגדלת עובי בלתי סבירה ובלתי מועילה: תוספת עובי גורמת לתוספת מסה וזו משפיעה בכיוון הבלתי רצוי - הורדת המהירות הקריטית. במנועים כבדים כמו של קטר או ספינה תחום מהירויות הסיבוב בעבודה לא מאד צר והגדלה כזו של קוטר הגל העבה מאד לא יעילה. לעומת זאת ניתן לנצל את התופעה שבכל התחום הרחב שמעל למהירות הקריטית התופעה אינה חוזרת.

הפתרון המעשי הוא לכן להישאר בתיכון המקורי ולהקפיד על הוראת אזהרה למפעילים: מייד אחרי ההתנעה להעביר את פעולת המנוע בתאוצה מירבית (לקיצור זמן המעבר דרך התחום הקריטי) אל תחום מהירויות העבודה ולא לרדת אליו בשום אופן גם בהפעלת סרק. במכונות כאלה יש בתא המפעיל "שעון טורים" שמראה את מספר הסל"ד. תחום המהירות הקריטית מסומן כגיזרה אדומה לאזהרה.

בעת כיבוי המכונה להאט את המכונה עד מעל תחום הקריטי ואז לזרז את ההאטה דרך התחום המסוכן. אחת הדרכים לכך היא שימוש קצר בבלם. במכונות בינוניות בוחרים אחת משתי השיטות, לפי חישובי תכנון עלויות. בשימוש בשיטה השניה נפוץ תכנון המכונות לעבודה במהירויות מוגבהות בן היתר בגלל סיבה זו. תועלת נוספת של מהירויות סיבוב מוגבהות היא העברת הספק מוגדל במומנט מוקטן, מה שנותן אפשרות להקטין את המשקל. הגודל והמחיר של מכונות.

נושא ב': ממסרות

מימסרת היא מיתקן או מנגנון שתפקידו להעביר הספק וואו תנועה ממקור הינע סיבובי (מנוע) למכונת עבודה (צרכן), תוך שינוי בפרמטרים כמו מהירות הסיבוב, מומנט וואו בכיוון התנועה. עם שינוי המהירות משתנה המומנט ביחס הפוך, כי ההספק הוא מכפלתם.

ס'בת הצורך במימסרות:

מקורות ההינע וההספק למכונות הם לרוב מנועים מסוגים שונים – חשמליים, שריפה פנימית, טורבינה וכד', סובבים במהירויות גדולות יחסית – ממאות עד כמה אלפי סל"ד (סיבובים לדקה R.P.M). מנוע שסובב במהירות n סל"ד, כדי שיתן הספק P , צריך לפתח מומנט M .

$$P = M \cdot n \cdot \pi / 30 \text{ [Watt]}$$

לפי המשוואה:

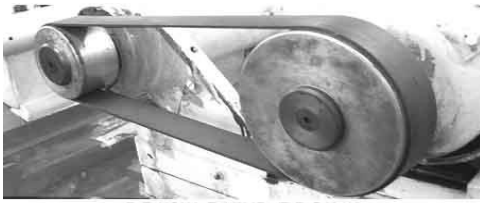
ככל שמנוע סובב מהר יותר הוא צריך לפתח מומנט M קטן יותר בשביל לתת את אותו ההספק P . כדי לפתח מומנט גדול צריך המנוע עצמו להיות חזק, כבד ויקר, כולל גל עבה יותר. במנוע חשמלי, שהוא המניע ברוב המכונות בתעשייה. למומנט מוגדל נדרשים רוטור וסטטור גדולים, שדות מגנטיים חזקים יותר וסלילי חשמל לזרמים גדולים יותר. לכן המנועים בנויים לרוב למהירות סיבוב גבוהה כדי לתת הספק גבוה יחסית ללא הגדלת המומנט ישירות במנוע. אותו עיקרון קיים גם במנועי בעירה פנימית (דיזל ואוטו) ובטורבינות. מכונות עבודה (צרכנים מכניים) צורכות את ההספק במהירויות סיבוב שמתאימות לסוג העבודה. במקרים רבים המהירות הזו שונה ממהירות המנוע, לרוב נמוכה יותר, ויש גם מקרים שבהם נדרש מגוון מהירויות עבודה רחב לעומת תחום צר של מהירויות מנוע (כמו בכלי רכב ומכונות עיבוד). לשם כך קיימות המימסרות – למסור למכונת העבודה את ההספק הנדרש בתחום מהירות הסיבוב המתאים לה, כאשר מקור ההספק - המנוע סובב במהירות אחרת, בה הוא יעיל ולא יקר.

א. סוגי מימסרות - מבנה ואופן פעולה.

בכל מימסרת גל כניסה שאותו מסובב המנוע וגל יציאה שתפקידו להניע גוף סובב במכונת עבודה. על הגלים שבמימסרת מורכבים רכיבי מסירה (העברת תנועה ומומנט). על פי רוב אלה גלגלים מצורות מסוימות: גלגלי חיכוך, גלגלי רצועה, גלגלי שרשרת או גלגלי שיניים (יוצא מהכלל חילזון). והם מחוזקים אל הגל לרוב בשגמים (אם כי אפשרי גם חיבור בתברג, בפין או בחיכוך בקונוס).

סיווג המימסרות הוא לפי רכיבי המסירה האלה :

1. מימסרות חיכוך ישיר - גלגלי חיכוך לחוצים זה אל זה.
2. מימסרות רצועה שונות : שטוחה, טריזית, משוננת, עגולה או אחרת.



מימסרת רצועה שטוחה
להעברת מומנטים קטנים במהירויות גבוהות



מימסרת רצועה טריזית של מקדחת שולחן עם החלפת הילוכים

3. מימסרות שרשרת שונות, השרשרות עשויות מחוליות מתכת וגלילים וכן פינים שמחברים ביניהם, רגילה, כפולה ורבת לוחיות. לגלגלים שיניים מותאמות בצורתן לגלילים ובגודל לפי אורך חוליות השרשרת. גודל חוליות השרשרת הוא לפי הכוחות והמומנטים המועברים ולפי גדלים סטנדרטיים.



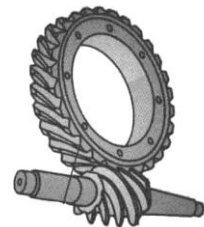
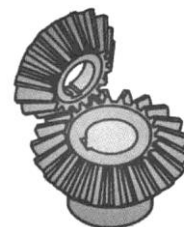
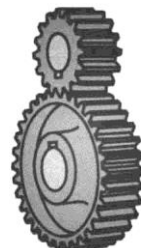
שרשרת רגילה - 2 שטחי חתך לפין



שרשרת כפולה - 4 שטחי חתך לפין



שרשרת רבת לוחיות - 22 שטחי חתך לפין



6

2

4. מימסרות גג"ש שונות (עם גג"ש גליליים ושיניים ישירות (1), משופעות (2), גג"ש קוניים (3) וכו'.
5. מימסרות חלזוניות שבהן גלגל שיניים מונע ע"י חילוץ דמוי בורג.
6. מימסרות פלנטריות שבהן שילוב מורכב של גלגלי שיניים נותן קומפקטיות ויעילות גבוהה.

ב. עקרונות פיסיקליים של פעולת מימסרת:

קינמטיקה - יחס התמסורת: זהו פרמטר עיקרי של מימסרת - היחס בין מהירות הסיבוב n_{out} של גל היציאה (אל המכונה - הגל המונע) למהירות הסיבוב n_{in} של גל הכניסה (מהמנוע - הגל המניע) הוא: $i = n_o / n_i$. כותבים את זה בצורה $n_o : n_i$. לאחר צימצום לשבר פשוט.

יחס קטן מ-1 הוא יחס הפחתה (רדוקציה) של מהירות הסיבוב. כלומר גל היציאה איטי מגל הכניסה. יחס תמסורת גדול מ-1 הוא של הגברה.

הערה: בשימוש טכני נפוץ השימוש במספר יחס שתמיד גדול מ-1 ומילת הבהרה: הפחתה או הגברה.

דוגמה : אם מימסרת מפחיתה מספר סל"ד מ1400- של המנוע ל400- סל"ד שמתאימה למכונה, יחס התמסורת הוא : $i = 400/1400 = 2 : 7$. הביטוי החליפי הוא : הפחתה פי 3.5.

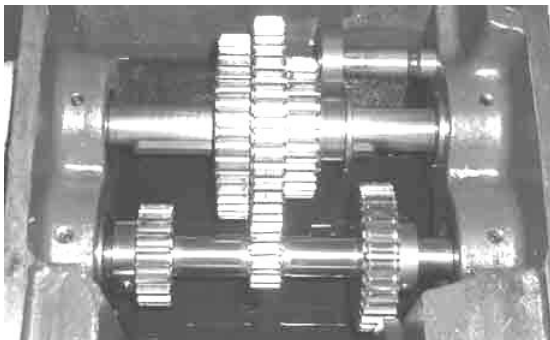
מימסרת פשוטה בנויה מזוג אחד של רכיבי מסירה שמחוברים לזוג גלים.

מיגבלת יחס התמסורת: לכל זוג של רכיבי מסירה מסוג מסוים יש תחום יחסי תמסורת שמתאים לו. יחס אחר מביא לאי יעילות מכנית ואף לבלאי מהיר של רכיבי המסירה.

טור מימסרות: כאשר נדרש יחס תמסורת שחורג מהתחום של זוג רכיבי מסירה אחד, ניתן לסדר בטור 2 או יותר מימסרות - גל היציאה ממימסרת אחת מניע את גל הכניסה לשניה וכן הלאה.

מימסרת מורכבת רב דרגית: במקום טור מימסרות אפשר לקבל כמה דרגות מסירה בגוף מימסרת אחד ובתוכו כמה גלים ועליהם זוגות רכיבי מסירה ביחסי תמסורת מתאימים, מסודרים באופן שנותן העברה בטור של המומנט והתנועה. כל זוג כזה נותן דרגת מסירה ויחס התמסורת הכללי מתקבל ע"י מכפלת יחסי התמסורת של הדרגות השונות, כלומר זוגות רכיבי המסירה. מימסרת כזו יקרה יחסית אבל יעילה (נצילות גבוהה יחסית) וקומפקטית (תופסת מרחב קטן) הרבה יותר מטור מימסרות. לכן השימוש בהן נפוץ, בעיקר במימסרות ג"ש (גלגלי שיניים) בכלי רכב וגם במכונות עבודה.

מימסרת מורכבת מקבילית: כאשר יש צורך לשנות את יחס התמסורת לעתים קרובות (החלפת הילוכים, כמו בכלי רכב ומכונות שיבוב) משתמשים במימסרת מורכבת שבה כמה זוגות רכיבי מסירה שניתן לבחור באחד מהם לפי הצורך. דוגמא פשוטה ומוכרת יש באופניים עם הילוכים – ניתן להעביר את השרשרת מזוג גלגלי שרשרת אחד לאחר, בין אם מחליפים רק אחד מהם או את שניהם.



במימסרת ג"ש סגורה (כמו ברכב ממונע) המבנה מורכב ויקר יותר, אבל עמיד וקומפקטי ובעל נצילות גבוהה.

בתמונה מימסרת מקבילית פשוטה עם 3 הילוכים.

שינוי ההילוכים מתבצע ע"י הזזת 3 גלגלי השיניים

הצמודים לאורך הגל שלהם כחלק אחד באופן שרק אחד

מהם ישתלב עם אחד מגלגלי השיניים שעל הגל השני.

בג"ש המגע ישיר ולא דרך אלמנט העברה כמו רצועה

או שרשרת. לכן יש במימסרת כזו מיגבלות של 3 הילוכים ויחסי תמסורת שניתן לקבל ע"י מספר קבוע

של שיניים לכל 3 זוגות גלגלי השיניים (בשל תלות בינו לבין המרחק בין הגלים).

להסרת המיגבלה הזו (כמו במימסרת של רכב) יש צורך בהוספת גלי ביניים וגלגלי שיניים מתווכים.

דינמיקה: העברת ההספק ע"י מימסרת: ההספק מועבר ע"י המימסרת בתנועה סיבובית שמאופיינת כאמור לעיל ע"י מהירות סיבוב וגודל מומנט.

בנוסחת ההספק הבסיסית מהפיסיקה: $P = F \cdot v$ וגם $P = W/t$

מציבים; $v = r \cdot \omega$ וגם $F = M/r$ מתקבל $P = F \cdot v = r \cdot \omega \cdot M/r = M \cdot \omega$ $[N \cdot m \cdot 1/sec = Watt]$

מהירות הסיבוב ביחידות ISO בפיסיקה מוגדרת כמהירות זוויתית ω ביחידות של רדיאנים בשניה.

בטכניקה היא נמדדת בסל"ד ומכיוון שבסיבוב אחד 2π רדיאנים ובדקה 60 שניות: $P = M \cdot n \cdot \pi_{30}$

לכן במימסרת המומנט משתנה ביחס הפוך למהירות הסיבוב וביחס ישר ליחס התמסורת.

ניסוי מס' 5: מימסרת חלזונית

נושא משני – תירגול אפיצויות
מטרות:

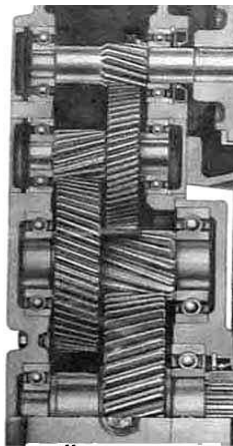
1. להכיר באופן מעשי את המבנה של ממסרת חלזונית וחלקיה ע"י פירוק והרכבה.
2. להבין את המיוחד במימסרת חלזונית – עקרונות המבנה והפעולה, יתרונות וחסרונות.
3. הכרת מיסבי גילגול, כדורי וקוני, אופן הפירוק וההרכבה שלהם לגל, התאמה ומדידה.
4. תירגול מעשי של אפיצויות - התאמות גלים וקדחים למיסבים במימסורת החלזונית.

תיאוריה:

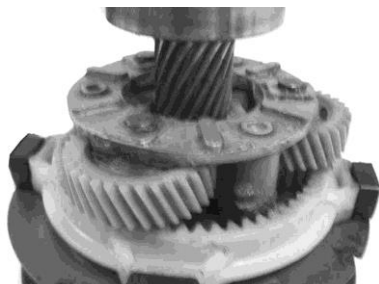


מימסרת חלזונית היא מימסרת שבה רכיב מסירת התנועה על הגל המניע אינו גלגל, אלא חילזון שדומה לבורג עם ליפוף אחד או מספר ליפופים מקבילים ולרוב לא יותר מ-6. קל לזהות את מספרם לפי ההתחלות שלהם שנמצאות בהיקף כל קצה של החילזון. הרכיב המונע הוא גלגל שיניים בעל צורת שיניים מיוחדת ומותאמת לשילוב עם החילזון. – השיניים משופעות בזווית שתואמת את זווית המעלה של החילזון הבורגי וכל אחת מהן שקועה במרכזת בצורה שדומה לקטע מהליפוף של תבריג פנימי כמו שיש באום.

החילזון הסובב יוצר כמו בורג תנועה קווית של דחיפה או משיכה, אבל במקום אום הוא מניע את היקף גלגל החילזון וגורם בכך לסיבובו. על כל סיבוב של החילזון נע היקף הגלגל מספר שיניים כמספר הליפופים (התחלות) של החילזון. התנועה העיקרית ביניהם היא בהחלקה.



מימסרת ג"ש
ב-3 דרגות



גלגלי השיניים במימסרת פלנטרית

סיבת הקיום של כל מערכת טכנית היא שילוב יתרונות שיש לה על מערכות אחרות שיכולות לבצע את אותו התפקיד. במימסרת חלזונית זהו יחס הפחתה גבוה עד גבוה מאד במבנה קומפקטי ולא יקר.

האלטרנטיבות הן:

1. מימסרת ג"ש רגילים עם כמה דרגות, שלה עמידות ונצילות גבוהה, אבל מורכבת, יקרה ופחות קומפקטית.

2. מימסרת פלנטרית שהיא קומפקטית, אבל מורכבת מגלגלי שיניים רבים ולכן יקרה.

יחס התמסורת וגם המבנה הקומפקטי והפשוט של המימסרת החלזונית מתקבלים משילוב של התכונות:

- א. שילוב החילזון בשיני הגלגל דומה לזה שבפס שיניים. זה נותן אורך שילוב מירבי בין ליפופי החילזון לשיני הגלגל. לכן אין צורך במספר שיניים מינימלי Z_{min} במניע וקטרי גלגלים מוגדלים במונע.
 - ב. יחס התימסורת, היחס בין מספר סיבובי המונע לסיבובי המניע $\frac{Z_0}{Z_1}$ הוא כמו במימסרת ג"ש. זהה ליחס ההפוך בין מספרי השיניים $\frac{Z_1}{Z_0}$. המיוחד בחילזון הוא מספר השיניים: כל התחלה היא של שן אחת שמקיפה את החילזון מספר ליפופים. לכן מספר השיניים בחילזון יכול להיות קטן ואפילו רק 1.
- ♦ כתוצאה מא' ו-ב' ניתן לקבל יחס תמסורת (הפחתה) גבוה בדרגה אחת. זה מאפשר מספר מינימלי של גלים ומיסבים ומורכבות מינימלית של מבנה בית המימסרת.

יתרונות נוספים של המיסרת החלזונית:

- א. פעולה שקטה ללא מכות ורעידות במעבר משן לשן. תברג החילזון הוא כמו שן רציפה והתנועה היחסית בינו לבין שיני הגלגל המונע היא החלקה מהירה של היקף החילזון לרוחב הגלגל תוך דחיפה איטית לאורך החילזון ללא החלפת שיניים כמו שיש בין שני גלגלי שיניים במיסרת ג"ש רגילה.
- ב. אפשרות נעילה עצמית: זהו מצב שבו כיוון התמסורת לא הפיך - המונע לא יכול לסובב את המניע. תכונה זו נפוצה ומוכרת בברגים והסיבה לתופעה היא זווית מעלה קטנה מזווית החיכוך. אפשרות זו אינה מופיעה מאליה במיסרת חלזונית אלא ביחסי הפחתה מעל 25, במיסרת שבמעבדה אין אותה, אבל ניתן לקבל אותה עם הקטנת זווית המעלה (ע"י הגדלת קוטר החילזון).
- הפסקת ההנעה מלווה בבלימה עצמית מיידית. תופעה זו חשובה במתקני שינוע בכלל ובעיקר בהרמה וחוסכת בלם (מעצור) אוטומטי שדרוש כאשר משתמשים במיסרת מסוג אחר.
- ג. תכונה נוספת של המיסרת החלזונית היא הניצבות בין גלי המניע והמונע. לעתים גם זה יתרון.
- חסרונות המיסרת החלזונית נובעים גם הם מכך שהתנועה היחסית העיקרית בין המניע למונע בהחלקה:
1. איבוד הספק בחיכוך בגלל תנועת ההחלקה. זה גורם לנצילות נמוכה יחסית אפילו לתמסורת ג"ש רב-דרגית מקבילה שבה הנצילות יורדת עם הגדלת מספר הדרגות ויחס ההפחתה.
 2. בלאי מוגבר - שבהחלקה (שפשוף) הוא גבוה הרבה יותר מאשר בגילגול.
 3. סכנת חימום יתר - שמזיק לחלקים ולסיכה, נגרם ע"י שילוב הנצילות הנמוכה (חימום מוגבר מהחיכוך) עם המבנה הקומפקטי (שטח פנים קטן ומעט שמן שלא מסייעים לסילוק חום טבעי).
- אופן התכנון והייצור של החילזון וגלגל החילזון נותן מענה מסוים לחסרונות:
1. בעיית הבלאי: בחירת חומרים לזוג רכיבי העברה בתמסורת ישירה נעשית לפי אחד משני עקרונות:
א. בלאי שווה, שבו בוחרים את החומרים כך שהבלאי מהעבודה יהיה הדדי ובמצב בלוי יוחלפו יחד שני רכיבי המסירה. ב. עקרון הבלאי של צד אחד, שבו משתדלים שבאחד מרכיבי המסירה יהיה בלאי אפסי וזניח לאורך כל חיי המיסרת ולכן רק השני הוא שיוחלף מדי פעם. במיסרת חלזונית, שבה תנאי העבודה של החילזון והגלגל שונים מאד, מועדף בלאי של צד אחד:
- את החילזון מייצרים כמו בורג מוליך, לרוב מפלדה מסוגסגת, מוקשית בטיפול תרמי לעמידות נגד שחיקה ומושחת לדיוק משופר ואת גלגל החילזון מייצרים ממתכת חלשה ופריכה יותר, לרוב פליז או ארד (ברונזה), בדומה לאוס של בורג מוליך.
- בגלגל החילזון הבלאי תחילה מהיר, עד שהפרופיל מתאים עצמו במדויק אל החילזון. התאמה מדויקת נותנת שטח מגע מירבי ולכן מאמץ מופחת שמאט מאד את הבלאי בהמשך. הבלאי בכל זאת נמשך ועם הזמן יש להחליף מדי פעם את גלגל החילזון הבלוי (למעשה רק את השיניים שלו).
- פליז ועוד יותר מכך ארד יקרים בהרבה מפלדה. אבל יש סיבה נוספת לבחירה בהם והיא שמקדם החיכוך ביניהם לפלדה, עם סיכה (שימון) טובה, נמוך בהרבה משל פלדה על פלדה.
- אם גלגל החילזון לא קטן מייצרים את גלגל החילזון משני רכיבים כדי לחסוך במחיר המתכות: טבור ממתכת פשוטה - פלדה ואפילו יצקת ברזל ורק "כתר" שהוא חישוק עם השיניים מהמתכת היקרה יחסית. כאשר תיפקוד השיניים נפגע מהבלאי מחליפים רק את ה"כתר".
2. לפתרון בעיית סילוק החום הוסיפו קירור מאולץ: בקצה הגל המניע מאיץ (גלגל עם כנפיים) שעם המכסה פועל כמשאבה צנטריפוגלית שדוחפת אוויר בין צלעות קירור משני צדי בית המיסרת.

השימוש במימסרת חלזונית נפוץ מאד במתקני שינוע והרמה קטנים. החיסרון העיקרי שלהן הוא כאמור נצילות נמוכה, שבהתקנים קטנים וקלים יש לה חשיבות משנית. השילוב של יחס הפחתה גבוה עם קומפקטיות, פעולה שקטה ונעילה עצמית בלי צורך בהתקנים נוספים עושה אותה הכדאית ביותר. ממסרות הפחתה כאלו נדרשות כדי להניע מכונות שעובדות במספר סל"ד נמוך מאד, כמו מסועים ומתקני הרמה, כאשר המנועים בנויים למהירויות סיבוב גבוהות. לרוב 1500 סל"ד. מנוע, ככל שמהירותו גבוהה עליו לתת מומנט קטן יותר לאותו הספק (לפי $P=M \cdot \omega$). הגודל, המשקל ובמידת מה גם המחיר של מנוע תלויים במומנט. ככל שמנוע מהיר הוא קל, קומפקטי וזול יותר. במימסרת חלזונית מקובלים רק יחסי הפחתה, החל מ-6 (או 1:6 לפי הגדרת יחס תמסורת), שהוא יחס הפחתה גדול מזה שבממסרת ג"ש רגילה ועד 60 (1:60). להפחתה ביחס גדול מ-60 מוסיפים לדרגה חלזונית דרגת ג"ש רגיל, ישר או משופע עד יחס של בערך 240 ומעבר לכך שתי דרגות חלזוניות. להגברת מהירות סיבוב אין שימוש במימסרת חלזונית. יחסי הגברה ממילא רובם בתחום של ג"ש רגילים. במקרים הנדירים בהם נדרשת מימסרת עם יחס הגברה גבוה מזה הנצילות של מימסרת חלזונית כל כך גרועה שמימסרת פלנטרית עדיפה בכל מקרה.

המיכלולים שמהם מורכבת מימסרת חלזונית:

1. החילזון (worm) שהוא הרכיב המניע בממסרת, הוא קטע בורגי מורכב על גל הכניסה לממסרת. בחילזון רגיל (גלילי) פרופיל השן טרפזי, כמו בבורג מוליך לעבודה ממושכת, עם ליפוף (התחלה) אחד או יותר, מספר הליפופים קובע (ביחס למספר שיני הגלגל המנוע) את יחס התמסורת.
- העומס העיקרי על החילזון הוא צירי (מקביל לציר הגל, כמו בבורג), ולכן הותאמו לגל שלו מיסבים קוניים, שמתאימים לעומס צירי בעיקרו.
- על גל החילזון גם שתי טבעות שממלאות 3 תפקידים: *עזר לחילוץ המיסב הקוני, *טבעת מירווח להתאמה פשוטה וזולה בין מידות הגל למידות בית המימסרת *מפזר שמן צנטריפוגלי.



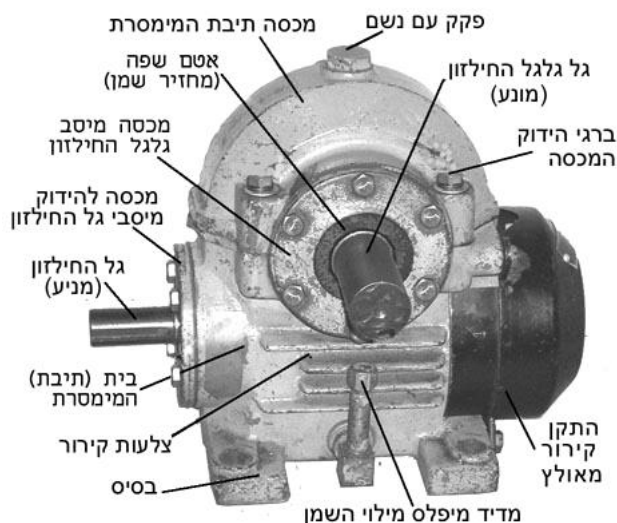
- כאשר קוטר החילזון גדול רק במקצת מקוטר הגל שלו עדיף לייצר אותם מגלם אחד כדי לחסוך מחיר עיבוד שבבי יקר. הטיב והמחיר של חומר החילזון הם מעבר לנדרש לייצור גל.

2. גלגל החילזון (worm wheel) שהוא הרכיב המנוע, הוא גלגל

שיניים מיוחד לשילוב עם חילזון. השילוב בין הגלגל לחילזון בזווית 90° ולכן השיניים משופעות לפי זווית המעלה של החילזון. השיניים מיוצרות ע"י כלי כירסום בדמות החילזון המתאים ומרכזן שקוע בהתאם לרדיוס שלו.

- הגלגל אפוף לגל היציאה. הגל עבה יותר מגל החילזון לפי ההבדל בין מומנטי הפיתול על כל אחד מהם. יחס המומנטים הפוך ליחס מהירויות הסיבוב לפי הנוסחה $P=M \cdot \omega$.

- רכיב העומס העיקרי על הגל רדיאלי (ניצב לציר בכיוון הרדיוס) ולכן הותאמו לו מיסבי כדורים.
- בין טבור הגלגל למיסבים מותאמות טבעות. כאן הן משמשות למירווח בלבד.



3. בית המימסרת הוא המסגרת של המימסרת למיקום קבוע של החילזון, הגלגל והגלים בעזרת המיסבים שמאפשרים להם רק דרגת חופש אחת להסתובב סביב ציריהם. ממסרת סגורה שבה הבית מספק לחלקים הנעים סביבה מוגנת מאבק וסיכה בשמן נוזלי (לעומת גריז בממסרת לא סגורה). עפ"ר הוא עשוי מתכת יצוקה, לרוב יצקת ברזל או חמרן (אלומיניום). בית המימסרת במעבדה עשוי מיצקת ברזל אפורה, מורכב עם מכסה ואוגנים פריקים. קירור מאולץ: בצידי גוף המימסרת צלעות קירור להרחבת שטח הפנים של בית הממסרת ועל הקצה השני של הגל המניע מורכבת שבשבת. מכסה הפח שעליה הופך אותה למשאבת אוויר צנטריפוגלית שמזרימה אוויר מהפתח המרכזי במיכסה ולהזרמת אוויר אל בין צלעות הקירור.

אפיצויות

אפיצות היא התאמת סבולות בין שני חלקים שמתוכננים להיות צמודים במיכלול באופן שהאחד ייכנס לשקע או קדח בשני. לכן מזהים אחד מהם כגל לפי אופיו ואת השני כקדח. כאשר יש עניין שהם יהיו צמודים כחלק מאוחד יש להגדיל את קוטר הגל או להפחית את קוטר הקדח, כך נוצר מידחק – עודף חומר שנדחק בעת החיבור בכוח, גורם עיוות אלסטי ונותן הצמדה חזקה. כאשר יש עניין שישאר ביניהם חופש מסוים יש להפחית מקוטר הגל או להוסיף לקוטר הקדח ובכך ליצור מירווח (חופש) בין הקדח לגל. בין שדה אפיצויות המירווח לשדה האפיצות ההדוקה הברורה יש תחום של "אפיצויות ביניים" שבהן בגלל הסבולות (הסטיות המותרות) ייתכן שיהיה מירווח וייתכן שיהיה מידחק. ככל שההצמדה הנדרשת הדוקה יותר יש לתת עודף חומר גדול יותר ולבצע את ההצמדה בכוח רב בעזרת פטיש, מכבש או שיטה תרמית – חימום הקדח שיגדל בהתפשטות טרמית או הקפאת הגל להקטנתו (ולעתים גם זה וגם זה) כדי לקבל את ההצמדה החזקה ללא צורך שימוש בכוח שעלול להזיק. גישה טכנית מחלקת את שדה האפיצויות אחרת – לפי תוצאה או אופי ביצוע: אפיצות חופש – שמורגש חופש גם להחלקת הגל לאורך הקדח וגם "משחק" לרוחב. אפיצות החלקה – שמורגש חופש רק להחלקת הגל לאורך הקדח. אפיצות לחץ קל – שניתן במכות קלות להכניס את הגל לקדח. אפיצות לחץ בינוני – שנידרש פטיש או מכבש קל להכניס את הגל לקדח. וכן הלאה עד אפיצות לחיבור תרמי בלבד, שללא הרחבה ואו והתכווצות תרמית לא ניתן "להלביש" את הקדח על הגל.

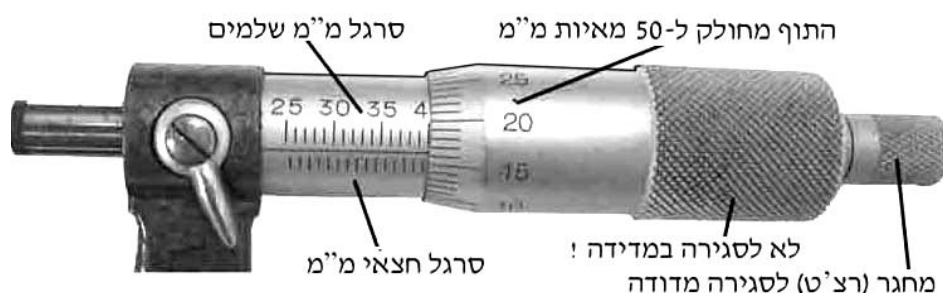
שיטת הגל האחד ושיטת הקדח האחד:

בטכנולוגיה קיימת שאיפה לייצר ולשווק חלקים נפוצים של מוצרים בצורה אחידה (סטנדרטית) בייצור המוני שמאפשר הוזלה עם שיפור האיכות בגיוון הכרחי ומספיק של פריטים. השימוש בחלקים סטנדרטיים מוכנים מפשט ומוזיל את התכנון והייצור של מוצרים מורכבים. גם השיווק של חלקים סטנדרטיים מסודר ופשוט ומאפשר החזקת מלאים יעילה יותר.

- גם כלי עיבוד שלא ניתן לכוונון מעדיפים לייצר בגדלים סטנדרטיים ואחידים ובכל מקרה הסטנדרטיים שביניהם באים מייצור המוני והם, באותה איכות ודיוק, יותר זולים.
- אין שום מניעה לקבל כל אפיצות נדרשת ככל שנדרש כאשר אחד החלקים, הגל או הקדח, מידתו אחידה ועגולה וסוג האפיצה (חופש או הידוק) נקבע ע"י תחום הסבולת של החלק השני.
- לכן נקבע בתקן שאחד הרכיבים, הגל או הקדח, יהיה במידה האחידה (סטנדרטית) ואילו את השני יש להתאים אליו ע"י ייצורו בסבולת שמותאמת לאפיצה הרצויה.
- התקן קובע שכל מידה שקשורה לאפיצות מוגדרת ע"י:
- א. הקוטר הנומינלי (מספר שלם),
 - ב. תחום או שדה הסבולת, שגודלו נקבע על פי רמת הדיוק הנדרשת לפי תקן IT.
 - ג. תנוחת הסבולת – מידת הריחוק של שדה הסבולת מהמידה הנומינלית.
- גם שדה הסבולת וגם מידת התנוחה משתנים על פי רמת הדיוק הנדרשת ועל פי סדר הגודל של החלק, לחלק קטן תנוחת המידה וגם הסבולת קטנות ולהיפך.
- לכן למציאת גודל הסבולות בייצור על פי התקן הזה משתמשים על פי רוב בלוחות מוכנים לאפיצויות מומלצות כמו שיש במעבדה.
- למציאת כל אפשרויות האפיצה התקנית יש להשתמש בלוח IT וגם בלוח מידות התנוחה הבסיסיות, שגם הן תלויות בסדר הגודל של החלק וברמת הדיוק הנדרשת.
- הקודים:** תנוחות המידה התקניות מסומנות באותיות לטיניות - גדולות לקדח וקטנות לגל.
- בחלק שמידתו אחידה (סטנדרטית) מידת הבסיס היא המידה הנומינלית בדיוק.
- בתקן זה מסומן באות H לקדח אחיד ובאות h לגל האחיד. מידת הבסיס בגל אחיד היא הגבול העליון של הסבולת ואילו בקדח היא הגבול התחתון שלה.
- לאפיצות מרווח שבהן "פחות חומר" בחלק המותאם נקבעו האותיות שלפני H, כמו G, f, D.
 - לאפיצויות מדחק שבהן "יותר חומר" בחלק המותאם נקבעו האותיות שאחרי H, כמו Z, t, k, J.
- כללי הבחירה בין השיטות:
1. כאשר חלק מייצור המוני סטנדרטי יש בו גל וגם קדח, ושניהם יהיו אפוצים במיכלול, כמו מיסב למשל, הגל שבו הוא גל אחיד והקדח שבו הוא קדח אחיד. את החלק המיוצר במקום יש לייצר בסבולת ותנוחת מידה לא אחידה לפי האפיצות המומלצות.
 2. אם הגל וגם הקדח מיוצרים באותו מקום, מועדפת שיטת הקדח האחיד מכיוון שכלי ייצור לקדחים פחות קלים לכוונון (וחלקם בכלל לא ניתנים) מאשר כלי הייצור לגלים. לפיכך הקדח ייוצר אחיד ע"י הכלי הסטנדרטי והגל, יהיה החלק המתואם שמיוצר בכיוונון הכלי.
- אפיצות מדודה לעומת אפיצות תיקנית:**
1. אפיצות תיקנית היא הוראת ייצור של שני חלקים כדי שתהיה התאמה ביניהם לפי מירווח רצוי. היא מבוטאת באותיות ומספרים שמתורגמים לסבולות מותרות לייצור.
 2. אפיצות מדודה היא מקרה ספציפי של שתי מידות ממוצעות קיימות בחלקים. זה נרשם בצורת הקוטר הנומינלי ושתי הסטיות הממוצעות (ב- μm) של שתי המידות הנ"ל ממנו.
 3. המעבר בטבלה שבניסוי לאפיצות תקנית לפי ISO נעשה בעזרת טבלת האפיצויות המומלצות:
- א. להניח לפי הכללים הנ"ל אם האפיצות המסוימת היא לפי גל אחיד או קדח אחיד.
 - ב. לאשר התאמת החלק האחיד לפי הקוטר הנומינלי לטור המתאים בלוח האפיצויות.
 - ג. לחפש באותה שורה את מידת החלק הלא-אחיד ולרשום בטבלה את הקוד שבראש הטור.

נספח:

מיקרומטרים למדידה בדיוק הנדרש לסבולות אפיציות – אלפיות מ"מ



הערכת אלפיות המ"מ 40.163

מיקרומטר חיצוני – לשים לב לתוף: עם הסגירה המידה בסרגל ובתוף יורדת



קריאת אלפיות במיקרומטר קדחים: המידה 69.687

מיקרומטר קדחים עגולים – לשים לב לתוף: עם הסגירה המידה בסרגל ובתוף עולה

* מנועים חשמליים אסינכרוניים:

המנועים החשמליים הנפוצים ביותר בתעשייה הם מנועים אסינכרוניים תלת פזיים בגלל האמינות הגבוהה, המיבנה הפשוט והמחיר הזול שלהם. מנוע כזה סובב במהירות די קבועה, אבל ככל שהעומס עליו גדול הוא מאט במידת מה את מהירות סיבובו. ההאטה גורמת למנוע להגביר מאד את המומנט שהוא יכול לתת ועם זה לצרוך זרמים חשמליים חזקים כדי לספק שדה מגנטי חזק יותר. בהאטה מעל 10-15% יש סיכון להרס המנוע מחום.

מנוע אסינכרוני עוקב אחר תדירות זרם החילופין של רשת החשמל, שהיא בארץ 50 הרץ, שפירושו 3000 חילופים בדקה. לכן המנוע המהיר ביותר מסוג זה סובב קצת פחות מ-3000 סל"ד. המנוע הנפוץ ביותר מסוג זה שואף ל-1500 סל"ד (חצי תדר הרשת). יש מנועים כאלה גם בחלוקות נוספות, 1000, 750 סל"ד וכו' אבל ככל שהוא יותר איטי הוא פחות נפוץ בגלל הגודל והמחיר.