

קובץ הרצאות

כנס להנדסת מכונות ולמכניקה

כנס שלישי להנדסת מכונות • כנס שבעה - עשר למכניקה עיונית ושמחושית

A NEW METHOD FOR OBTAINING LARGE CENTRIFUGAL ACCELERATIONS

D. BUSSO, N. BEN-AMOTZ

דרך חדשה להשגת תאוצות צנטריפוגליות גדולות

ד"ר דינו בוסו, נציבי בן-אמץ

המחלקה למכניקה, הטכניון, חיפה.

Abstract

In order to obtain centrifugal fields of over 1,000,000 g's very high rotational speeds are required. The design difficulties on this range are so great that there were only two methods of doing this: 1. a special hydrogen driven turbine 2. a magnetically suspended rotor electrically driven in high vacuum. A third method which is much cheaper has been shown to be feasible following experiments in the Dept. of Mechanics, Technion. The mechanical drive incorporates the belt suspension for the bearing-less rotor. Speeds of 740,000 r.p.m. and fields of 4,000,000 g's were attained. A theoretical model which explains the effects that were investigated experimentally, and which predicted results for those experiments which were not carried out, has also been developed. Various engineering applications of the drive are given.

השגת תאוצות גדולות, מעל $1,000,000\text{ g}$, מחיבת מהירויות סיבוב גבוהות מאוד. הקשיים הטכניים במהירויות סיבוב אלו כה גדולים, שעד עתה היו רק שתי דרכים להשיג תאוצות כאלו: 1. טורבינה מיוחדת מונעת ע"י מימן. 2. חליה מגנטית עם הנע חשמלי. דרך שלישית, זולה הרבה יותר, הוכחה כאפשרית בניסויים במחלקה למכניקה בטכניון. ההנעה היא מכנית, ע"י תמסורת רצועה, המשמשת גם כמתלה לרוטור, (ללא מיסוב). בסידרה ניסויים נמצאו התנאים הדרושים להגיע לתאוצות הנ"ל. הושגו מהירויות עד $740,000\text{ r.p.m.}$ וברוטור שנוסה במהירות זו התאוצה המקסימלית עלתה על $4,000,000\text{ g}$. פותח מודל תיאורטי המסביר את משמעות התוצאות, ומאפשר לאמוד תוצאות ניסויים נוספים. מוצעים שימושים המהאימים לניצול המכניזם החדש.

רשימת הסימנים

a - תאוצה צנטריפוגלית בהקף הרוטור.

g - תאוצה הכובד.

- h - קבוע.
- H - קבוע.
- M - מומנט.
- n - מהירות זויחית של הרוטור.
- p - לחץ הסביבה. (אבסולוטי).
- r - רדיוס החמסרת של הרוטור (ראה ציור 2).
- R - רדיוס הגלגל המניע (ראה ציור 1).
- T - כח מוגדר לפי $T = \frac{M}{r}$.
- u - היחס בין הרדיוס החיצוני של הרוטור לרדיוס החמסרת שלו ($u > 1$).
- (ur) - הרדיוס החיצוני של הרוטור (ראה ציור 2).
- V - מהירות הקפית של הרוטור.
- W - משקל הרוטור.
- γ - משקל סגולי.
- μ - מקדם פואסון.
- σ - מאמץ.
- ω - מהירות זויחית של הגלגל המניע.

מבוא

קיימות מעט מאד שיטות להשגת תאוצות גדולות, מעל $1,500,000 g$. תאוצות עד $1,000,000 g$ הושגו בצנטריפוגות בעלות רוטורים גדולים יחסית, שפתח לראשונה סודברג, וגם זאת רק על ידי שימוש במקדם בטחון נמוך מדי. הרוטור, בקוטר 10.4 ס"מ, סבב במהירות עד $160,000$ R.P.M. הרוטור היה נתון בואקום, והונע על ידי טורבינה שמן (סודברג) או טורבינה גז (אזיר או מימן) (פיקלס) (Svedberg, 1959). כיום משתמשים להנעת רוטורים בגודל כזה במנוע חשמלי מהיר, או במנוע חשמלי עם חמסרת גלגלי שנים המעלה את המהירות.

מגבלות החוזק של הרוטור מונעות השגת תאוצות גדולות ברוטורים גדולים, וחייבים להזדקק לרוטורים קטנים יותר, הסובבים במהירות סבוב גדולה יותר.

השיטה הראשונה בה הגיעו לתאוצות גדולות מ- $1,500,000 g$, היא הנעת טורבינה (ע"י הנריוט, 1925). הושגה מהירות של $1,200,000$ R.P.M. ותאוצה של כ- $7,000,000 g$ ברוטור בקוטר 9 מ"מ. שיטה זו מוזכרת במקומות רבים, בין השאר ב (Beams, 1961) וב (Svedberg, 1959). חסרונה, שקשה מאד להשתמש בשיטה זו בואקום, וכאשר הרוטור נמצא בלחץ

אטמוספרי, הוא מחמם באופן ניכר.

השיטה בה הושגו התאוצות והמהירויות הגדולות ביותר היא השיטה המשתמשת בתליה מגנטית, ואשר פותחה על ידי (Beams, 1961). הושגה מהירות של 90,000,000 R.P.M. ותאוצה של כ- 900,000,000g ברוטור בקוטר 0.2 מ"מ. המחלה המגנטית מחייב מערכת ויסות מיוחדת. הסבוב נעשה על ידי שדה סינכרוני מסתובב מואץ, כשהרוטור נתון בואקום גבוה מאד, על מנת למנוע חימומו כתוצאה מזרמי מערבולת. מרכז הרוטור נעשה בעזרת ליבת ברזל החלופה באמבט שמן מעל לרוטור. שיטה זו דורשת איפוא מערכות מסובכות ויקרות.

בולט העדרה של שיטה מכנית. מהירויות הסבוב הגבוהות הדרושות גורמות לשפשוף ולבלאי גדולים מאד, המונעים אפשרות שימוש במיסבים. קיימות אפשרויות אחרות להנע חיכוך ללא מיסבים. אך המגע בין חלקי ההנע הקשיחים, הנעים במהירויות גדולות, גורם לרעידות, קפיצות, שפשוף ובלאי גדול, השמים גבול נמוך לתוצאות שאפשר להגיע אליהן בהנע מכנית. גבול זה נמוך בהרבה מהתוצאות שהושגו בדרכים שתוארו לעיל.

חיבור זה בא לתאר הנע מכני ללא מיסוב, המאפשר להגיע לתאוצות הנ"ל. הנע זה הומצא על ידי בלוט, ולא נחקר עד כה. את תפקיד ההנע והמתלה לרוטור ממלאת רצועה שטוחה מפולימר גמיש. מכניזם זה יקרא להלן מה"ר (מחלה הנע רצועה). גמישות הרצועה מונעת מגע קשיח על חסרונותיו שנימנו לעיל.

וריאציות רבות אפשריות למה"ר, ורק אחת מהן נחקרה במסגרת חיבור זה, עבור רוטור סיבובי, להלן יקרא רוטור.

מכניזם המגלה דמיון מה לווריאציה זו מוזכר על ידי אינגליס (Ingles, 1963), אך לא הוצע למהירויות סבוב גבוהות, וגם אינו מתאים לכך כי הוא כולל מיסוב.

מגבלת החוזק של הרוטור הסובב

מגבלת החוזק של חומר הרוטור ממלאת תפקיד חשוב בכל שיטות ההנע למהירויות סבוב גבוהות.

תאור בעית המאמצים ברוטור סובב מופיע כמעט בכל ספר על חוזק מחקדם, ואף במאמרים רבים. נסחפק כאן רק בתאור משמעות מגבלת החוזק.

עבור כל רוטור סובב ניתן לרשום שהמאמץ המקסימלי

$$\sigma_{\max} = h \frac{\gamma}{g} n^2 (ur)^2 \quad (1)$$

כאשר h הוא קבוע החלוי בצורת הגוף.

לדוגמה: לסבוע דקה דופן $h = 1$; עבור דיסקה מלאה בעובי אחיד

$$h = \frac{M+3}{8} \approx 0.41 - 0.42$$

ניתן לרשום

$$\frac{g}{h} \frac{\sigma_{\max}}{\gamma} = n^2 (ur)^2 = v^2 \quad (2)$$

כאשר V היא המהירות הקוית בהקף, ומכאן שלרוטור בעל צורה נחונה נחונה וחומר נחון מגבלת החוזק קובעת את V המקסימלי שניתן להגיע אליו. ל- V המקסימלי הזה ניתן להגיע על ידי רוטור בעל רדיוס קטן ומהירות סבוב גבוהה, או על ידי רוטור בעל רדיוס גדול ומהירות סבוב קטנה

$$n_1 (ur)_1 = n_2 (ur)_2 = \dots = V \quad (3)$$

התאוצה הצנטריפוגלית בהקף

$$a = n^2 (ur) \quad (4)$$

מהצבה (4) ב (1) מתקבל

$$\sigma_{\max} = \frac{h}{g} \gamma a (ur) \quad (5)$$

אפשר לרשום זאת כך

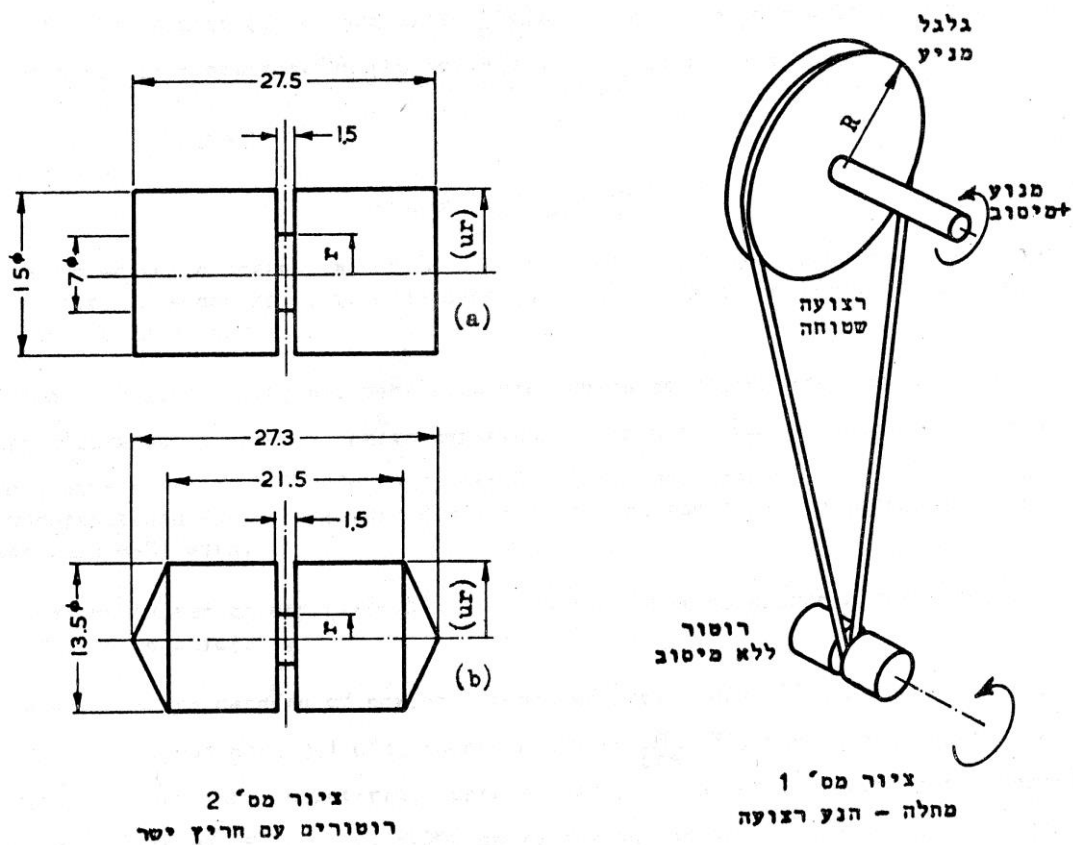
$$a = \frac{g}{h} \frac{\sigma_{\max}}{\gamma} \frac{1}{(ur)} \quad (6)$$

שפור צורת הרוטור (הקטנת h), ושפור חומר הרוטור (הגדלת $\frac{\sigma_{\max}}{\gamma}$) אינם כלולים במחקר זה, ומהווים את מגבלות החוזק של הרוטור. מכאן ניתן להסיק שעבור אותן מגבלות החוזק אפשר להגדיל את התאוצה הצנטריפוגלית המושגת על ידי הקטנת הרדיוס של הרוטור. יחד עם זאת יש להגדיל את מהירות הסבוב של הרוטור לפי (3).

הקשיים הטכניים הגדולים בהשגת מהירויות סבוב גבוהות הם שגרמו למספר הקטן של השיטות המאפשרות השגת מאוצות צנטריפוגליות גדולות של 1,500,000g ויותר.

תאור המה"ר

הוריאציה הפשוטה ביותר האפשרית מתוארת בציור 1. היא כוללת:



(א) גלגל מניע עליון, ממוסב ומונע ע"י מנוע חשמלי. בהקפו חריץ עבור הרצועה. במסגרת הנסיונות נוסו גלגלים בקטרים 11.4 ס"מ ו-17.5 ס"מ, ומהירויות סבוב עד 18,000 R.P.M.

(ב) רצועה שטוחה מחומר פולימרי. כדי שחיה לרצועה את הגמישות הדרושה, הפולימר צריך להיות בעל תכונות אלסטיות, וגם ויסקוזיות. הרצועה היא אינסוטית

(Seamless). נוסו רצועות בעובי כ-0.05 מ"מ, רוחב 1.5 - 0.5 מ"מ, אורך הקפי כולל עד כ-110 ס"מ. (מאמץ הקריעה של חומר הרצועה שנוסח $\frac{Kg}{mm^2}$ 20-30).

(ג) רוטור תחתון (סיבובי). הרוטור אינו ממוסב. הוא חלוי על הרצועה בלבד, המשמש עבורו מתלה, מיסוב והנע בבת אחת. במרכזו של הרוטור חריץ, עבור הרצועה. הרוטור עשוי מתכת, ומלוטש כדי להקטין את הפסדי החיכוך באויר. במסגרת הנסיונות נוסו רוטורים מאלומיניום ומפלדות שונות, בקטרים 12-15 מ"מ ובמשקל עד 36 גרם. בעיקר נערכו הנסיונות ברוטורים מפלדת CRO 863 (חוזק כניעה $\frac{Kg}{mm^2}$ 93), בקוטר 13.5 מ"מ, ובמשקל 25 גרם (ראה ציור 2(b)). הרוטור הוא החלק המסתובב מהר שבמה"ר. נוסו מכניזמים עם יחס חמסרת חיאורטי $\frac{R}{T}$ בחושים 18 עד 58.

אפשרות נפילת הרוטור

במקרה של קריעת הרצועה, או של נטית הרוטור באלכסון בזווית גדולה כלפי המצב האפקי, הרוטור נופל. הוא מסתובב אז על רצפת החדר (או בחא מוגבל, במידה ויש). לא נגרם שום נזק, פרט לשפשוף הרוטור.

בנסיונות שנערכו בלחץ אטמוספרי נמצא שזמן החיים של הרצועה ארוך למדי. באחד הנסיונות נמצא שאורך החיים של רצועה שמהירותה ההקפית הייתה $\frac{m}{sec}$ 45, ונשאה רוטור במשקל 35 גרם, שסבב במהירות 120,000 R.P.M., היה 16 שעות. סיבת הקריעה - שפשוף. בהתחשב בכך שהרצועה ניתנת להחלפה בין נסוי לנסוי, הרי היא מתאימה כאמצעי הנע לנסויים שאורך כל אחד פחות מ-10 שעות.

נמצא שחריץ ישר ברוטור (ציור 2) ורצועה מותאמת אליו הם התנאים הדרושים למנוע קריעת הרצועה בטרם זמן.

חושבו המאמצים הפועלים על הרצועה: למקרה של רוטור השוקל 35 גרם, כשרוחב הרצועה 1.5 מ"מ, ורדיוס עקמומיות 1.5 מ"מ, והמהירות ההקפית $\frac{m}{sec}$ 150, מאמץ המתחה הכולל הוא $\frac{Kg}{mm^2}$ 5.5. גם כאשר מחשבים בתנודות, ומביאים בחשבון כפלים ממשקל הרוטור, עדיין מקבלים שהמאמץ אינו עולה על $\frac{Kg}{mm^2}$ 6, ז.א. כ-30% מחוזק הרצועה לקריעה, ובתחום בטוח.

חקירת התאוצות הצנטריפוגליות

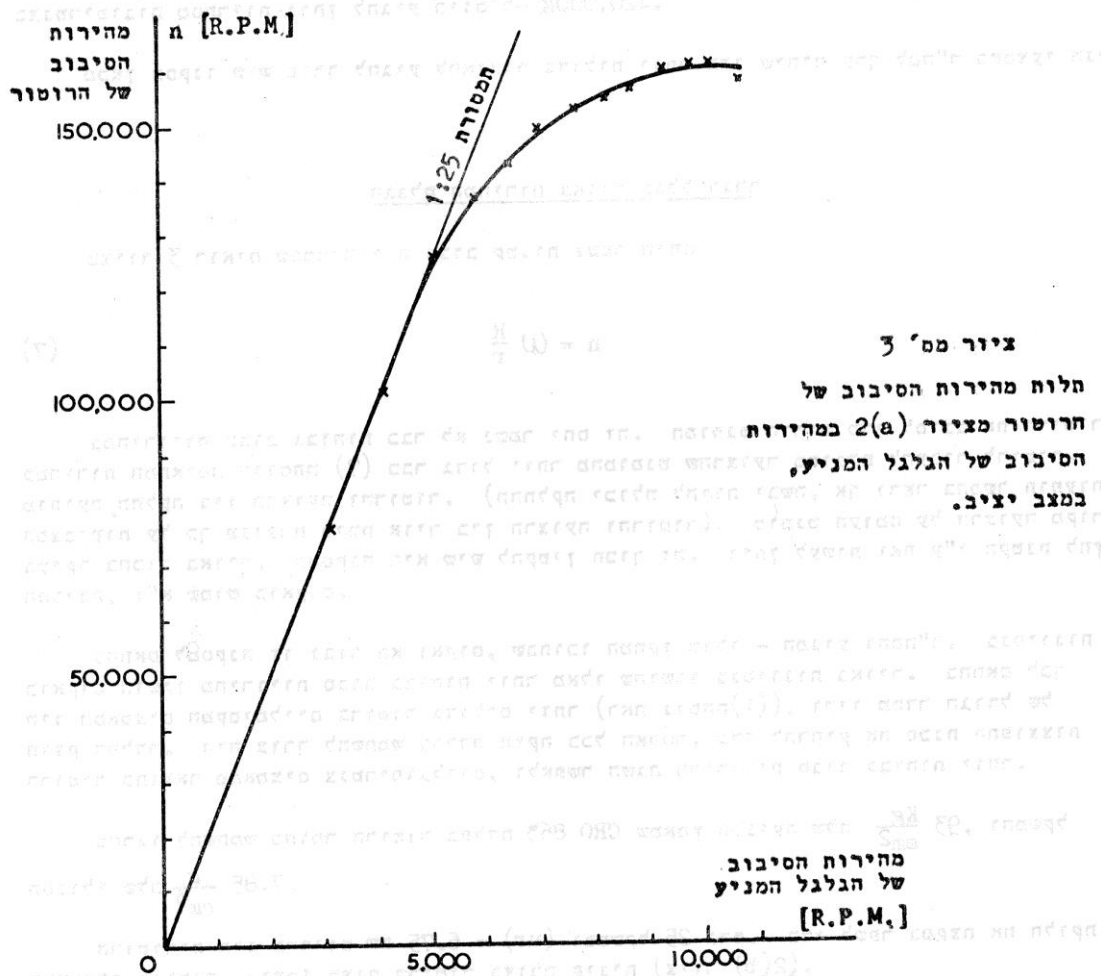
נחאר את המחקר שנעשה לבדוק אם המה"ר מחאים להשגת תאוצות צנטריפוגליות גדולות.

נסיונות בלחץ אטמוספרי(א) בדיקת מצבי מעבר

תנאי ההתחלה של נסיון מסוים הם: הגלגל המניע סובב במהירות ω ; הרוטור סובב במהירות n . (גדולה יותר מ- ω , בהתאם לחמסרת). כאשר מגבירים בבת אחת את מהירות הגלגל המניע ל- ω' , מקבלים שמהירות הרוטור n משתנה. מתקבל מצב מעבר, שבו n עולה בגרף אסימפטוטי לערך n' ומתיצבה.

(ב) בדיקת מצב יציב

כאשר בודקים את חלוח n' ב- ω' , מקבלים את הגרף לפי ציור 3. אין אפשרות להגדיל



את מהירות הסבוב של הרוטור m' ללא סוף ע"י הגדלת מהירות הסבוב של הגלגל המניע (U) . גם העקומה $f(U) = m'$ היא אסימפטוטית, ושואפת לערך מסוים של m שנכנה אותו m_g .

בנסיונות באויר השתמשנו ברוטור מפלדה כסף, ברדיוס $ur = 7.5 \text{ mm}$ ובמשקל 36.5 גרם (ציור 2(a)). הגלגל העליון היה מאלומיניום, ברדיוס $R = 57 \text{ mm}$, ומהירות הסבוב שלו $(U) = 9,000 \text{ R.P.M.}$

הושגה מהירות סבוב של הרוטור החתוך עד $m_g = 180,000 \text{ R.P.M.}$ המאמץ המקסימלי ברוטור חושב בציר הרוטור $G_{\max} = 7 \frac{\text{Kg}}{\text{mm}^2}$. זהו מאמץ קטן בהרבה מהחוזק לכניעה של הפלדה. התאוצה הצנטריפוגלית המקסימלית חושבה בהיקף הרוטור, והיא $270,000g$. אמנם ברוטורים קטנים במקצת הושגו תאוצות קצת גדולות יותר. אלו תאוצות שאינן גדולות יחסית - בצנטריפוגות מסחריות ניתן להגיע כיום ל- $420,000g$.

מכאן הסקנו שיש צורך להגיע לתאוצות גדולות יותר כדי שיהיה ערך למה"ר כאמצעי הנע.

הגבלת המהירות באויר בגלל הגרר

בציור 3 רואים שבמהירויות סבוב קטנות נשמר היחס

$$n = U \frac{R}{r} \quad (7)$$

במהירויות סבוב גבוהות כבר לא נשמר יחס זה. המומנט הדרוש כדי לסובב את הרוטור במהירות המתאימה לנוסחה (7) כבר גדול יותר מהמומנט שהרצועה מסוגלת להעביר לרוטור. מופיעה החלקה בין הרצועה והרוטור. (ההחלקה יכולה להיות יבשה, אך נראה בהמשך תופעות המצביעות על כך שנוצרת סיכת אויר בין הרצועה והרוטור). מומנט העומס על הרצועה מקורו בעיקר בחכוך באויר. המסקנה היא שיש להקטין חכוך זה. ניתן לעשות זאת ע"י הקטנת לחץ הסביבה, ז"א שמוש בואקום.

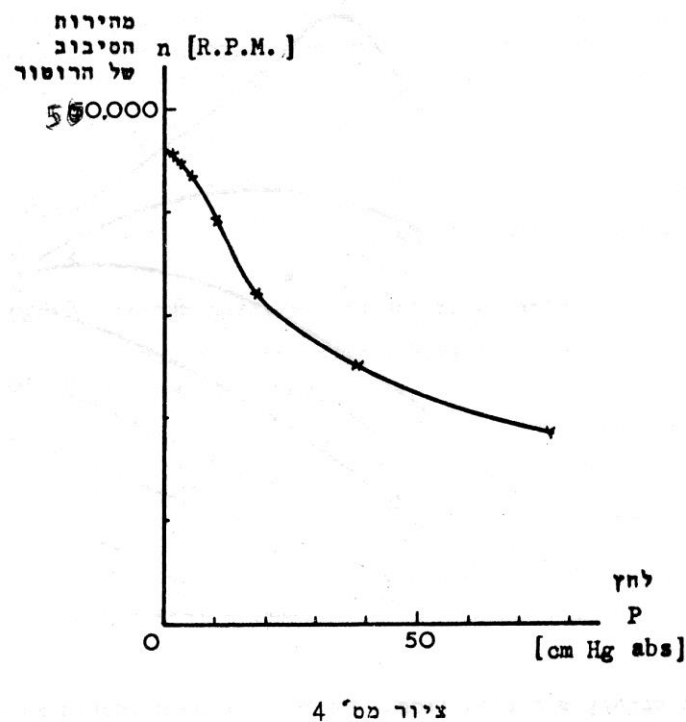
בהתאם למסקנה זו נבנה תא ואקום, שבתוכו המתקן כולו - המנוע והמה"ר. בנסיונות בואקום הושגו מהירויות סבוב גבוהות יותר מאלו שהושגו בנסיונות באויר. בהתאם לכך היו המאמצים המקסימליים ברוטור גדולים יותר (ראה נוסחה (1)), והיו מסדר הגודל של חוזק הפלדה. היה צורך להשתמש בפלדה חזקה ככל האפשר, כדי להרחיק את סכנת התפוצצות הרוטור כתוצאה ממאמצים צנטריפוגליים, ולאפשר השגת מהירויות סבוב גבוהות יותר.

בחרנו להשתמש כחומר הרוטור בפלדה CRO 863 שמאמץ הכניעה שלה $93 \frac{\text{Kg}}{\text{mm}^2}$, והמשקל הסגולי שלה $7.85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.

הרוטורים היו ברדיוס $ur = 6.75 \text{ mm}$ ובמשקל 25 גרם . כדי לשפר במקצת את חלוקת המאמצים ברוטור, יוצרו קצות הרוטור בצורה קונית (ציור 2(b)).

נסיונות בואקוםהקשר בין הלחץ ומהירות הרוטור (א)

כאשר מריצים רוטור מסוים בתנאי לחץ שונים, מתברר שמהירות הסבוב האסימפטוטית (n_a) המושגת שונה בכל מקרה. ככל שהלחץ נמוך יותר, מחבלת מהירות סבוב גבוהה יותר. אך זה לא יכול להמשך בלי סוף - כאשר לחץ הסביבה שואף לאפס, מהירות הרוטור אינה יכולה לעלות על המהירות המקסימלית האפשרית לפי תנאי התמסרת, המבוטאת בנוסחה (7). הקטנת הלחץ יכולה רק להקטין את ההחלקה בין הרוטור והרצועה. מחבל הגרף לפי ציור 4.

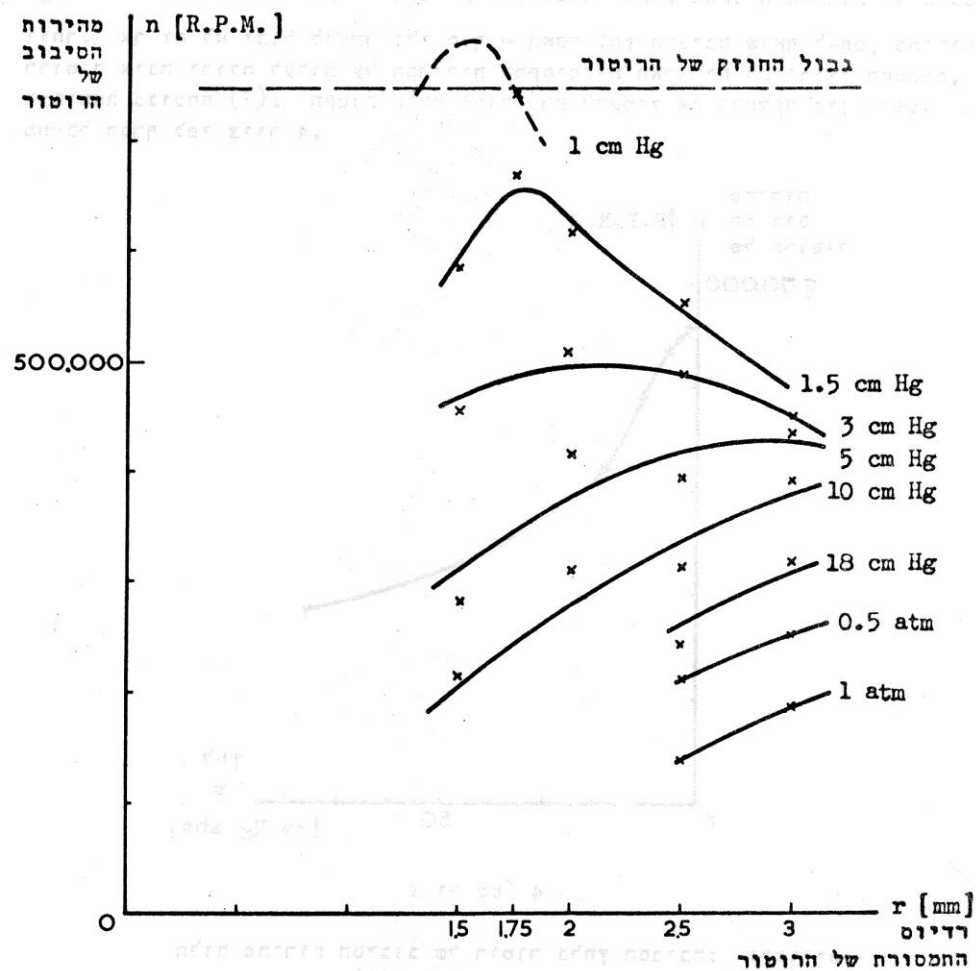


תלות מהירות הסיבוב של רוטור בלחץ הסביבה: ניסויים ברוטור מציור 2(b) עם רדיוס תמסורת 3 מ"מ (תמסורת 1:35).

המסקנה היא איפוא שבלחצים נמוכים ההחלקה קטנה, ואפשר להשתמש ביחס תמסרת גדול יותר, ז.א. ב-X קטן יותר.

(ב) הקשר בין הלחץ, רדיוס תמסורת הרוטור ומהירות הרוטור

בהתאם לכך יוצרה סדרה של רוטורים הזזהים בכל, פרט לרדיוס התמסורת r . בכל רוטור מהסדרה נערכה סדרת נסיונות במטרה למצוא את m_a בלחצים שונים. תוצאות הנסיונות מובאות בגרף בציור 5.



ציור מס' 5

תלות מהירות הסיבוב של הרוטור מציור 2(b) ברדיוס התמסורת ובלחץ.

רואים שבכל לחץ יש x אופטימלי, בו מושג m_a המקסימלית האפשרית בלחץ זה. ככל שהלחץ יותר קטן, מהירות הסבוב המקסימלית שניתנת להשגה גדולה יותר. ככל שהלחץ יותר קטן, אפשר להשיג מהירות סבוב m_a גבוהה יותר, וזאת ע"י שמוש ברוטור זה בעל x האופטימלי באותו לחץ. ככל שהלחץ יותר קטן, x האופטימלי באותו לחץ יותר קטן.

הפעם אין גבול למהירות הסבוב שניתן להשיג בדרך זו.

(ג) השגת תאוצות צנטריפוגליות גדולות

הנסיונות להגדלת מהירות הסבוב המושגת נפסקו לא מפני שאי אפשר היה להעלות את המהירות אלא מפני שהגענו לגבול החוזק של הרוטור, ז"א למהירות סבוב כה גבוהה, עד שלא היתה אפשרות להעלותה יותר בלי שהמאמצים ברוטור יעברו את הגבול הבטוח מפני התפוצצות הרוטור. נסיונות בפיצוץ רוטורים לא נכללו בתחום עבודת המחקר.

המהירות המקסימלית הושגה ברוטור בו $x = 1.75 \text{ mm}$, בלחץ 1 cm Hg (אבסולוטי). מהירות זו היתה $n = 740,000 \text{ R.P.M.}$. המהירות ההקפית בקצה הרוטור היתה $V = 530 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$. המהירות ההקפית של הרצועה לא עלתה על $v = 156 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$.

כשמחשבים את המאמצים ברוטור סובב במהירות זו בהנחה שהרוטור צילינדרי, מקבלים שבמרכזו המאמץ $93 \frac{\text{Kg}}{\text{mm}^2}$, ז"א שווה לחוזק לכניעה של חומר הרוטור.

מקדם הבטחון נגד פיצוץ הרוטור כלל:

(א) את היחס בין המאמץ במרכז הרוטור ברוטור צילינדרי, ובין המאמץ במרכז הרוטור שנוסה, אשר קצהו מיוצר בפרופיל קוני (ציור 2(b)).

(ב) את היחס בין המהירות בה קורה פיצוץ רוטור (לאחר שהמאמצים הגיעו לתחום הכניעה הפלסטי בכל הרוטור) ובין המהירות בה המאמץ במרכז הרוטור בלבד מגיע לתחום הכניעה הפלסטי.

לא נכלל במקדם הבטחון שום גורם נוסף. לא ראינו אפשרות להעלות את מהירות הסבוב בלי לסכן את המערכת, אשר לא חוכננה לפיצוץ רוטור. ניתן להעלות במידת מה את מהירות הסבוב ע"י שיפור צורת הרוטור – נושא אשר לא נכלל במחקר זה.

התאוצה הצנטריפוגלית המקסימלית שהושגה בהיקף הרוטור שסבב ב- $740,000 \text{ R.P.M.}$ היתה $4,150,000 g$ – תאוצה גדולה יחסית. זו התאוצה הצנטריפוגלית הגדולה ביותר שהושגה ע"י הנע מכני. שתי הדרכים בהן ניתן להגיע לתאוצות גדולות יותר אינן מכניות. ראה גם מבוא, וכן מראי מקום (Svedberg, Beams).

ההנע המכני מסוגל איפוא להגיע לגבול החוזק של הפלדה ברוטורים בקוטר 1.3 ס"מ ויותר, ממש כפי ששתי דרכי ההנעה האחרות מסוגלות לכך, ובכך הוא משחיה אליהן.

(התאוצות הגדולות יותר בשתי הדרכים האחרות הושגו ע"י שמוש ברוטורים קטנים יותר).

מודל תיאורטי

המודל התיאורטי פותח במטרה להסביר את תוצאות הנסויים שהובאו לעיל, וכדי לאפשר להסיק מחוצאות נסויים אלו גם על אותן אפשרויות שלא נבדקו, ז"א על אפשרות השמוש ברוטורים קטנים או גדולים יותר, וברוטורים המיוצרים מחומרים אחרים.

א. הנחות יסוד

1. המומנט המניע M המקסימלי האפשרי פרופורציוני ישר למכפלת כוח T ברדיוס התמסרת r .
 2. כוח T זה אינו תלוי ב- r , ומבטא את הכוח שהרצועה מסוגלת להעביר לרוטור, בהנחה שיש חיכוך יבש ביניהם.
 3. כוח T פרופורציוני ישר למשקל הרוטור W .
 4. מומנט העמס העיקרי נגרם ע"י הגרר באויר, הפרופורציוני לריבוע מהירות סבוב הרוטור ω .
 5. הגרר באויר פרופורציוני ישר ללחץ הסביבה p .
- מכל ההנחות הללו ההנחה האחרונה היא בלתי מדויקת, אולם היות ומומנט העומס קטן יותר ככל שלחץ הסביבה קטן יותר, אם גם לא ביחס פרופורציוני ישר, נסתפק בכך שהנחה זו נכונה איכותית.

ב. תלות המהירות ברדיוס התמסורת

ניתן לבטא את מומנט העומס ע"י הנוסחה

$$M = H p n^2 \quad (8)$$

את המומנט המניע ניתן לבטא ע"י הגודל

$$M = T r \quad (9)$$

כדי שלא תהיה החלקה המומנט המניע חייב להיות גדול ממומנט העומס

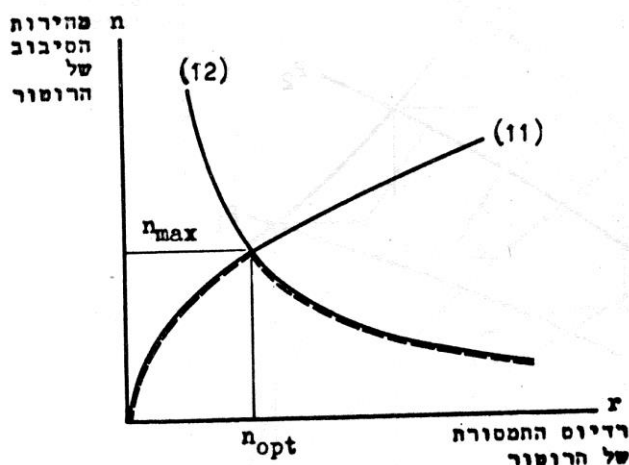
$$Tr > H pn^2 \quad (10)$$

ניתן לרשום שמשיקולי תנאי ההחלקה

$$n < \sqrt{\frac{T}{H p}} \sqrt{r} \quad (11)$$

משיקולי החמסרת אנו למדים ש

$$n < \frac{v}{T} \quad (12)$$



ציור מס. 6

מודל תיאורטי לחלות מהירות
הסיבוב של הרוטור ברדיוס החמסרת

נציר זאת בגרף המתאר את תלות
n ב-r כאשר כל שאר התנאים זהים
(ציור 6). כל תנאי פרושו על הגרף
ש-n אינו יכול להיות גבוה יותר
מאשר הקו המלא המיצג את אותו תנאי.
מכאן שצורף שני התנאים פרושו על
הגרף, ש-n אינו יכול להיות גבוה
יותר מאשר הקו השבור.

אנו רואים שעבור r אופטימלי
מסוים ניתן להשיג n מקסימלי, להלן
 n_{max} , תוצאות הנסויים אישרו ניתוח

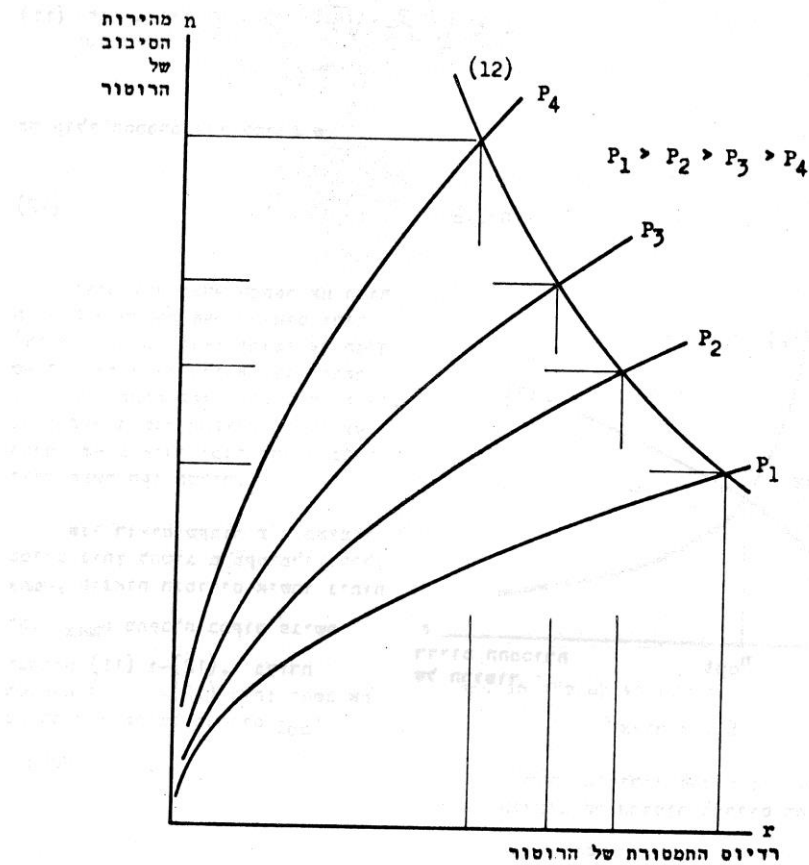
זה. n_{max} מחקבלת במקום פגישת

הגרפים (11) ו-(12). בעזרת
משוואות (11) ו-(12) ניתן לחשב את
נקודת הפגישה של הגרפים r_{opt}

ו- n_{max} .

(: תלות המהירות ברדיוס התמסורת ובלחץ

כשפועילים את תנאי (11) עבור לחצים שונים $p_1, p_2, p_3, p_4, \dots$ כאשר $p_1 > p_2 > p_3 > p_4 \dots$ מקבלים את התלות לפי ציור 7.



ציור מס. 7

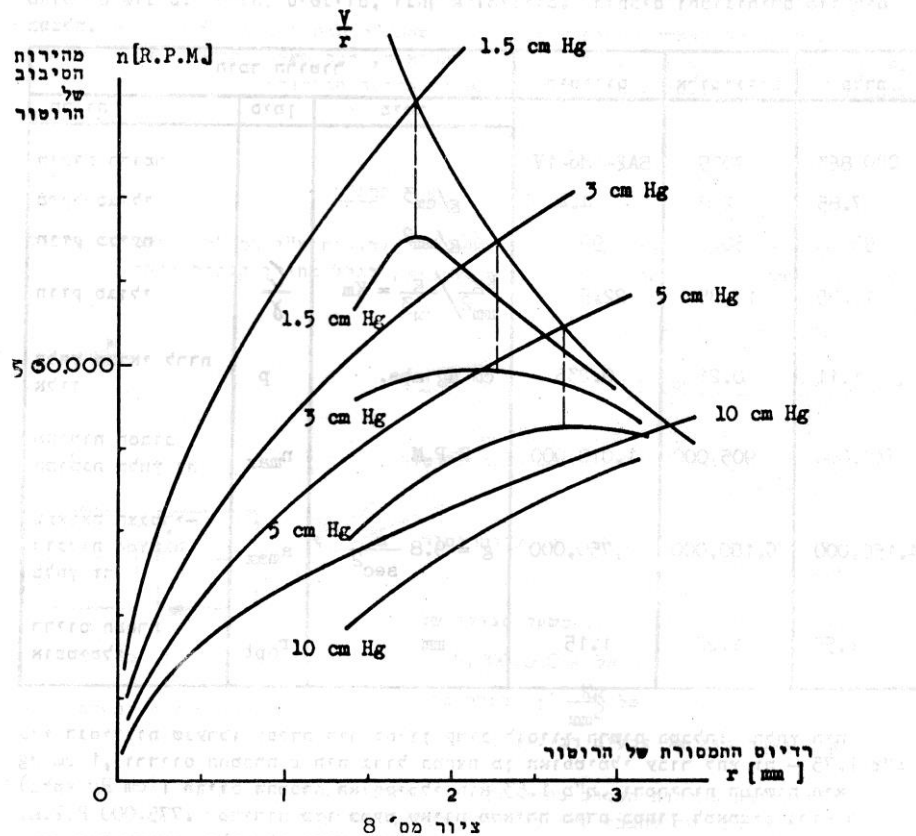
מודל תיאורטי לתלות מהירות הסיבוב של הרוטור ברדיוס התמסורת ובלחץ.

אנו רואים שעבור כל לחץ נתון p מקבלים כחוצאה r_{opt} אחר, ו- n_{max} אחר. ככל שהלחץ קטן יותר, r_{opt} קטן יותר, ו- n_{max} גדול יותר. גם תוצאה זו מתאימה היטב לתוצאות הנסויים.

(ד) השפעת סיכת האויר

כאשר משוים את הגרפים בציור 7, המבטאים את המודל התיאורטי לגרפים בציור 5, המבטאים את חוצאות הנסיונות, רואים שיש התאמה טובה ביניהם לגבי תלוח מהירות סבוב הרוטור מ בלחץ p וברדיוס התמסורת r .

אי התאמה העיקרית היא שהגרפים לפי המודל התיאורטי כוללים נקודה מעבר חדה, בעוד שבגרפים הנסיוניים אין מעבר חד, אלא הדרגתי (ציור 8). הסיבה לכך היא שהחלקה אינה מחילה בכח-אחת כפי שקורה כאשר החכוך יבש, אלא בהדרגה. מכאן אנו מסיקים שקיים אפקט של סיכת אויר בין הרצועה והרוטור, המופיע גם במהירויות סבוב קטנות יותר מאשר אלו שבהן צריכה להופיע החלקת חכוך יבש, וגורם להבדל הנ"ל בין המודל התיאורטי והמציאות.



השפעת סיכת האויר על מהירות הסיבוב של הרוטור

(י) חלות בין פרמטרים אחרים

המודל התיאורטי אפשר למצא את החלות בין התאוצה הצנטריפוגלית ובין רדיוס התמסורת, הרדיוס החיצוני, הלחץ וחומר הרוטור. הפרטים מופיעים ב- (BEN-AMOTS, 1969).

המודל התיאורטי אינו מותאם לחישובים כמותיים מדויקים, אך בכל זאת ניתן להשתמש בו בהגבלות מסוימות לבדיקת תוצאות כמותיות ללא דיוק. מחקבלת התאמה די טובה עם תוצאות הנסיונות.

ניתן גם להסיק במקורב על תוצאות נסיונות אשר לא נכללו במחקר. רשמנו בצורת טבלה השואה כמותית בין פרמטרים אחדים, עבור רוטורים צילינדריים בקוטר 13.5 מ"מ, מחומרים שונים: פלדה, טיטניום, ונחך אלומיניום. הנחכים ותכונותיהם מוגדרים בטבלה.

| פלדה | אלומיניום | טיטניום | חומר הרוטור | | |
|-----------|-----------|------------|---|--------------------|-------------------------------------|
| | | | מימד | סימן | חכונה |
| CRO 863 | 7075 | 8Al-1Mo-1V | | | טיפוס החומר |
| 7.85 | 2.8 | 4.4 | g/cm^3 | | משקל סגולי |
| 93 | 50 | 99 | Kg/mm^2 | | חוזק כניעה |
| 11.85 | 17.85 | 22.5 | $\frac{Kg}{mm^2} / \frac{g}{mm^3} = Km$ | $\frac{C}{\gamma}$ | חוזק סגולי |
| 1.11 | 0.21 | 0.235 | cm Hg abs. | p | הלחץ שכדאי לרדת אליו |
| 740,000 | 905,000 | 1,010,000 | R.P.M | n_{max} | מהירות הסבוב המושגת בלחץ זה |
| 4,150,000 | 6,180,000 | 7,750,000 | $g = 9.8 \frac{m}{sec^2}$ | a_{max} | התאוצה הצנטרי-פוגלית המושגת בלחץ זה |
| 1.59 | 1.28 | 1.15 | mm | r_{opt} | רדיוס תמסרת אופטימלי |

בין הנסיונות שנערכו בפלדה היה נסיון קרוב לנסיון הרשום בטבלה: הלחץ היה 1 cm Hg, ורדיוס התמסרת x היה גדול במקצת מן האופטימלי עבור לחץ זה - 1.75 מ"מ (בלחץ 1 cm Hg רדיוס התמסרת האופטימלי הוא 1.53 מ"מ, והמהירות המושגת היא 775,000 R.P.M. מהירות כזו כמעט שאינה מאירה מקדם בטחון למאמצים ברוטור והיא מעל המותר, ולכן לא נערך נסיון כזה).

מכאן שלרוטור במידות זהות לאלו שנוסו, בלחץ של כ- 1 cm Hg, כדאי להשתמש בחומר הרוטור פלדה. רק בלחץ של כ- 2-3 mm Hg כדאי להשתמש ברוטור מטיטניום או מנתך אלומיניום.

ניתן גם לאמוד תוצאות נסויים ברוטורים שצורתם זהה, אך קטריהם ואורכם גדולים או קטנים יותר, ובאותו יחס.

אומדן תוצאות נסויים ברוטורים שצורתם שונה נעשה באותה דרך, אך דורש נסיונות כיוול ברוטורים לפי הצורה הדרושה.

מובן שברוטורים השונים בגודל ו/או בצורה מאלו שנוסו יכולות להתקבל תוצאות כמותיות אחרות.

מסקנה נוספת שאפשר להסיק מהטבלה, היא שהמה"ר מאפשר ניצול היתרונות של מחכות כאלומיניום וטיטניום ע"י שמוש בהן כחומר הרוטור, דבר שאינו אפשרי בשיטת ההנעה שמחבסת על חליה מגנטית, המחייבת שמוש בפלדה כחומר הרוטור, ולחץ סביבה נמוך הרבה יותר.

הצעות לשימושים במה"ר

המחיר הזול של השגת תאוצות צנטריפוגליות גדולות ע"י המה"ר מאפשר את ניצולו גם לשימושים שדרכי ההנע האחרות אינן מתאימות להם, בגלל מחירן הגבוה יותר.

יפורטו שתי דוגמאות:

(א) אפשרות מדידה סטנדרטית לאדהזיה של צבעים

ניתן להפעיל תאוצות גדולות מאד עד $4-5,000,000 g$ על משטח צבוע בהקף הרוטור (ציור 9).

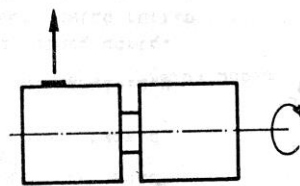
נחשב את מאמץ המתיחה בין הצבע והרוטור עבור מקרה מסוים.

עבור עובי צבע 0.1 מ"מ, משקל סגולי של

הצבע $2 \frac{g}{cm^3}$, ותאוצה של $5,000,000 g$

מתקבל מאמץ מתיחה של $1 \frac{Kg}{mm^2}$; בסדר גודל

אחד יותר מזה של צבעים רגילים.



ציור מס. 9

מדידת הדבקת צבע למחכת בעזרת מה"ר

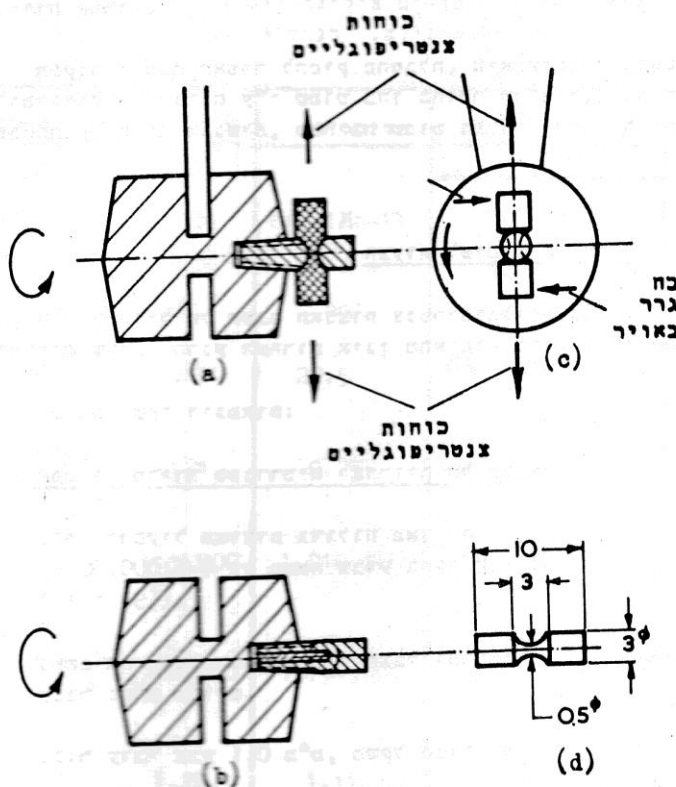
ע"י מדידת מהירות הסבוב בה ניתן הצבע מהרוטור, וידיעת קוטר הרוטור, ניתן לחשב את מאמץ המתיחה שהצבע עמד בו ברגע שניתק מהרוטור. מדידת המאמץ הזה לצבעים שונים יכולה להשוות את האדהזיה של כל צבע לחומר הרוטור.

חומר הרוטור צריך להיות בעל יחס $\frac{\sigma}{\gamma}$ מותר (חוזק סגולי) גבוה.

(ב) בדיקת חוזק למתיחה של מדגמים קטנים מאד

למכשירים הסטנדרטיים למדידת החוזק למתיחה יש חסרון חשוב: הדגם צריך להיות גדול מספיק, כדי שתהיה אפשרות לחפס אותו בקצותיו. התפיסה צריכה להיות מרוחקת במידה מסוימת מהאזור בו נמדד החוזק למתיחה, ולא - המאמצים המקומיים שהיא יוצרת באזור התפיסה משנים בהרבה את פילוג המאמצים באזור מדידת החוזק למתיחה.

ניתן להתגבר על חסרון זה כאשר כוחות המתיחה הם צנטריפוגליים, לפי ציור 10(a). הציור מדגים את העקרון בלבד.



ציור מס. 10.
מדידת חוזק בעזרת מה"ר (סכימה עקרונית)

נחשב את מאמץ המתיחה במרכז עבור מקרה אופייני.

עבור משקל סגולי

$$1, \frac{g}{cm^3}, \text{ מהירות סבוב}$$

$$n = 350,000 \text{ R.P.M.}$$

ומידות לפי ציור

10(d), מחקבל מאמץ

$$\sigma = 55 \frac{Kg}{mm^2}$$

המאמץ המתקבל גדול

יותר ככל שהמשקל

הסגולי של הדגם גדול

יותר. באותם נחונים

כאשר המשקל הסגולי

$$8, \frac{g}{cm^3}, \text{ המאמץ יהיה}$$

$$.440 \frac{Kg}{mm^2}, \text{ מאמצים}$$

גדולים יותר אפשר

לקבל ע"י דגמים גדולים

יותר או בעלי צואר

דק יותר. מדגמים

שחוזקם קטן יותר

יכולים להיות קטנים

יותר, או בעלי צואר

עבה יותר.

מהירות הסבוב בה נשבר הדגם מאפשרת לחשב את מאמץ הכניעה שלו. באם אין לחומר אזור כניעה, נמצא את מאמץ ההרס.

כן יש לשים לב לכך שדרוש שימוש בואקום גבוה יותר, וזאת מפני שהצורה הבלתי סיבובית של הרוטור גורמת לחיכוך נוסף במדיום הסביבה. ראה ציור 10(c). על-מנת להגיע למהירות הסבוב הדרושה, דרוש להקטין את לחץ הסביבה. האומדן הוא שואקום עד 0.1 mm Hg abs. יספיק, ומכאן שדי יהיה במשאבת ואקום פרימרית בעלת שתי דרגות. אך הקביעה הסופית חוכל להעשות רק לאחר ניסויים.

על הדגם להיות קטן יחסית לרוטור.

סכום

המודל התיאורטי שפורט בסעיפים הקודמים מסביר את תוצאות הנסיונות, ומראה את תלות מהירות הסבוב והתאוצה הצנטריפוגלית, בהן אנו מעוניינים, בפרמטרים העיקריים, וזאת גם באותם מקרים שלא נכללו בנסיונות שנערכו.

המודל התיאורטי מסוגל להצביע בדיוק על איכות התוצאות שיש לצפות להן מהנסיונות. הוא מסוגל, בהגבלות מסוימות, לאמוד גם תוצאות כמותיות מקורבות עבור נסיונות כאלו.

הנסיונות שנערכו, יחד עם המודל התיאורטי שפוחח, מאפשרים שליטה טובה בגורמים הקובעים את התאוצה המושגת. הוכח בנסיונות שניתן להגיע ע"י שמוש במה"ר לתאוצות צנטריפוגליות גדולות יותר מכל אלו שהושגו ע"י הנע מכני אחר עד כה.

הוצעו שימושים היכולים לנצל את המה"ר.

ניתן לאמר שמטרות המחקר בנושא זה הושגו. אך עם זאת יש מקום רב למחקר נוסף בנושא, בתחומים שלא נחקרו, ואף למחקר כמותי מדויק באותם תחומים שנחקרו איכותית.

בעיקר יש מקום למצא שימושים נוספים לניצול האפשרויות הגלומות במה"ר.

ה ע ר ה : המחקר נעשה במסגרת חבור לשם קבלת חוזה מגיסטר למדעים (BEN-AMOTS, 1969) בהדרכתו של ד"ר ד. בוסט במחלקה למכניקה.

1. Periodicals and Reports:

BEAMS, J. W., 1961. Ultrahigh-speed rotation. Scient. Am. 204, No. 4, 134-147.

BEN-AMOTS, N., 1969. The dynamic behaviour of a rotor on a belt suspension drive. M. Sc. Thesis, Technion, Haifa. (in Hebrew).

2. Books:

INGLIS, C., 1963. Applied Mechanics for Engineers. 1st ed. p.139, Dover, New York.

SVEDBERG, T., and PEDERSEN O., 1959. The Ultracentrifuge. Johnson Reprint, New-York.

PREPRINTS



CONFERENCE ON MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS, 1969