מודל להערכת נזקי בליעת חול ואבק במדחס של טורבינת גז

אלברט לוי

יום העיון ה- 12 במנועי סילון וטורבינות גז

נובמבר 2013

כללי/רקע

- בטורבינות גז תעשייתיות המוצבות באזורים מדבריים או מזוהמי אוויר, חודרים גרגרי חול/אבק למנוע יחד עם האוויר וגורמים נזק מכני ללהבי המדחס, בעיקר בדרגה הראשונה.
- הנזק הנ"ל גורם לשחיקת הלהבים, עיוות הפרופילים האווירודינמיים שלהם ובסופו של דבר לכישלון מכני (שבירת להבים) או ירידה בביצועים ואף הזדקרות מדחס.
- אפשריים נזקים נוספים כמו סתימת חורי קירור להבים, משקעים על להבי טורבינה וכו'.
- בעיה דומה קיימת במנועי טורבינה של מסוקים מנמיכי טוס באזורים מדבריים.

כללי/רקע

- הפתרון המקובל הוא סינון האוויר, אבל הסינון כרוך בהפסדי לחץ בכניסה למנוע עם השלכות על הביצועים ואינו תמיד בר-מימוש. במנועי מסוקים משתמשים בסינון צנטריפוגלי עם מפל לחץ נמוך, אך עם רמת סינון נמוכה יחסית.
- גם כאשר מתבצע סינון יסודי יותר, למשל ע"י מסנני מחסום – Barrier Filters – המקובל בטורבינות תעשייתיות, כמות מסוימת של חול/אבק חודרת למנוע ולאורך זמן תגרום לנזקים.
- יש איפוא עניין במודל חישובי שיאפשר להעריך נזקי ארוזיה מצטברים לאורך זמן מאבק החודר למנוע.

בניית מודל כמותי

- הארוזיה המקומית על-פני להב המדחס נמדדת ב- mm/hr.
- מסקירת מאמרים שפורסמו בנושא זה בספרות המקצועית, הפרמטרים המשמעותיים ביותר הקובעים למידת הארוזיה הם:
  - קצב חדירת החול/אבק במנוע ב- g/s
  - פילוג גודל החלקיקים החודרים למנוע
  - קשיות חלקיקי החול וקשיות המתכת ממנה עשויה הלהב
  - זווית הפגיעה של החלקיקים בלהב
  - מהירות הפגיעה של החלקיקים בלהב

השפעת קצב חדירת החול במנוע

- מסקירת מאמרים עולה מסקנה שקצב הארוזיה של חומר הלהבים הנפגעים מחול עומד ביחס ישר לקצב חדירת החול במנוע כאשר מתעלמים מחלקיקים מתחת ל-5 מיקרון בגודל, לכן הנזק יחסי ישר לכמות החול שנבלעה.
- לפי זה אם ידוע ריכוז החול שחלקיקיו מעל 5 מיקרון באוויר C ב- mg/m^3 ואם ידועה בכל רגע ספיקת האוויר הנפחית של המנוע Q ב- m^3/s, ניתן להעריך את קצב הארוזיה המקומי בנקודה מסוימת בלהב E ב- mm/hr לפי נוסחה כדלקמן:

$$E = f_M \bullet f_V \bullet f_Q \bullet (Q \bullet C)$$

כאשר:

f_M – מקדם התלוי בחומר הלהב וקשיותו (כאשר לחול מניחים 50% קוורץ)

f_V – מקדם התלוי במהירות הפגיעה של חלקיקי האבק

f_Q – מקדם התלוי בזווית הפגיעה של חלקיקי האבק בלהב

הערכת ריכוז החול באוויר וספיקתו למנוע

- כיוון שיש לנו עניין בריכוז גרגרי חול מעל 5 מיקרון באוויר, יש חשיבות לא רק לכמות החול ליחידת נפח, אלא גם לפילוג הגדלים של הגרגרים.
- נקודת מוצא היא פילוג הגדלים באבק המצוי על הקרקע. אם ידוע הפילוג על הקרקע וניתן להעריך ממנו את הפילוג באוויר הנגזר ממנו, נוכל לחשב הפילוג החודר למנוע וכמותו.
- על-סמך פונקצית הסינון של המסנן ושקילת המסנן לפני ואחרי פעולת המנוע, אפשר לחשב את הכמות שחודרת למנוע ביחידת זמן.
- אם אין מסנן, קיימות שיטות אופטיות למדידה של ריכוז החול באוויר, אבל יישומן מסובך.

הערכת ריכוז החול באוויר וספיקתו למנוע (המשך)

- ניתן להעריך את ריכוז החול באוויר, הערכה גסה על סמך הראות*.

קיימות כמה נוסחאות אמפיריות הקושרות בין C לראות, למשל:

$$V = \frac{19400}{C^{0.75}}$$

כאשר:

הראות V ב- m

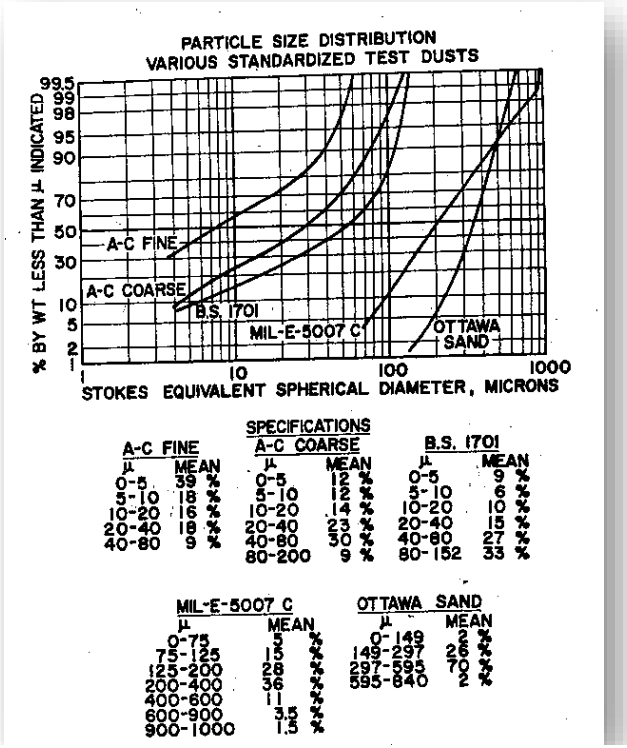
וריכוז החול C ב- mg/m^3

*מקורות

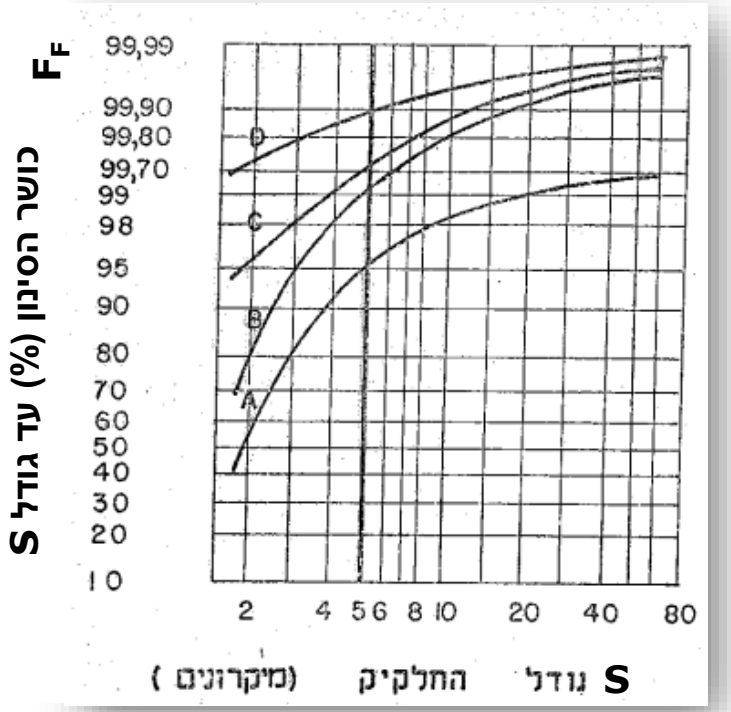
1) L.J. Hagen, E.L. Skidmore – Wind Erosion and Visibility Problems – Transactions of ASAF 1977.
2) L.J. Hagen, N.P. Woodruff – Air Pollution from Dust Storms in the Great Plains – Atmospheric 1973.

הערכת גודל החלקיקים החודרים במנוע

פילוג גרגרי החול באוויר החודר למנוע ניתן להערכה ממדידת פילוג הגדלים בחול שנלכח במסנן ומפונקצית הסינון של המסנן:



פילוגים תקניים של אבק (החול במדבריות דרום הארץ בין AC Coarse ל- AC Fine)

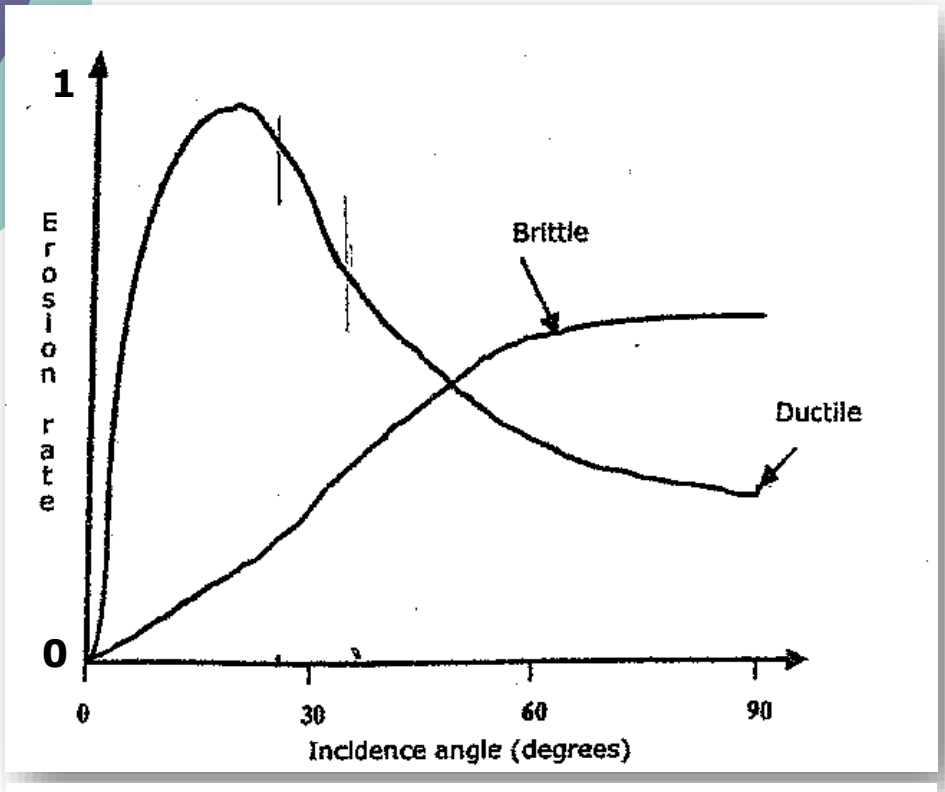


פונקציות סינון אופייניות למסננים

טבלה להערכת ריכוז חול באוויר

מקור ענן האבק	גודל חלקיקים	ריכוז אבק mg/m^3
מסוק	30-170	200-1000
רחפת	עד 100	5000-7000
כלי רכב זחלילי	0-80	200-9000
סופת חול	עד 200	1400-3500

השפעת זווית הפגיעה של הגרגרים



השפעת זווית הפגיעה על קצב השחיקה

מחקרים ניסיוניים מראים שלזווית הפגיעה יש השפעה על קצב הארוזיה השונה בין חומרים משיכים לחומרים פריכים.

מקור:
A. Hamed, w. Tabakoff – Erosion and Deposition in Turbomachinery – Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, No. 2, March-April 2006

השפעת מהירות הפגיעה של החלקיקים בלהב

- סביר להניח שקצב הארוזיה יחסי ישר לריבוע מהירות הפגיעה מפני שזו מייצגת את האנרגיה הקינטית ליחידת מסה של החול הפוגע.
- תוצאות ניסויים שפורסמו במקורות שונים מצביעים על פרופורציונליות לחזקה 2, 2.5 ואף 3.33של המהירות.
- אנחנו נסתמך על המקור החדיש ביותר ונניח: $f_V = K_r \bullet V^{2.5}$

מקורות:

1) G. A. Malone (Bell Aerospace Textron) Development of Improved LACV-30 Propeller Blade Coatings for Protection against Sand and Rain Erosion and Marine Environment Corrosion – May 1983. Report DAAK70-82-C0017 – U. S. Army Mobility Equipment Research and Development Command AD – A132999.

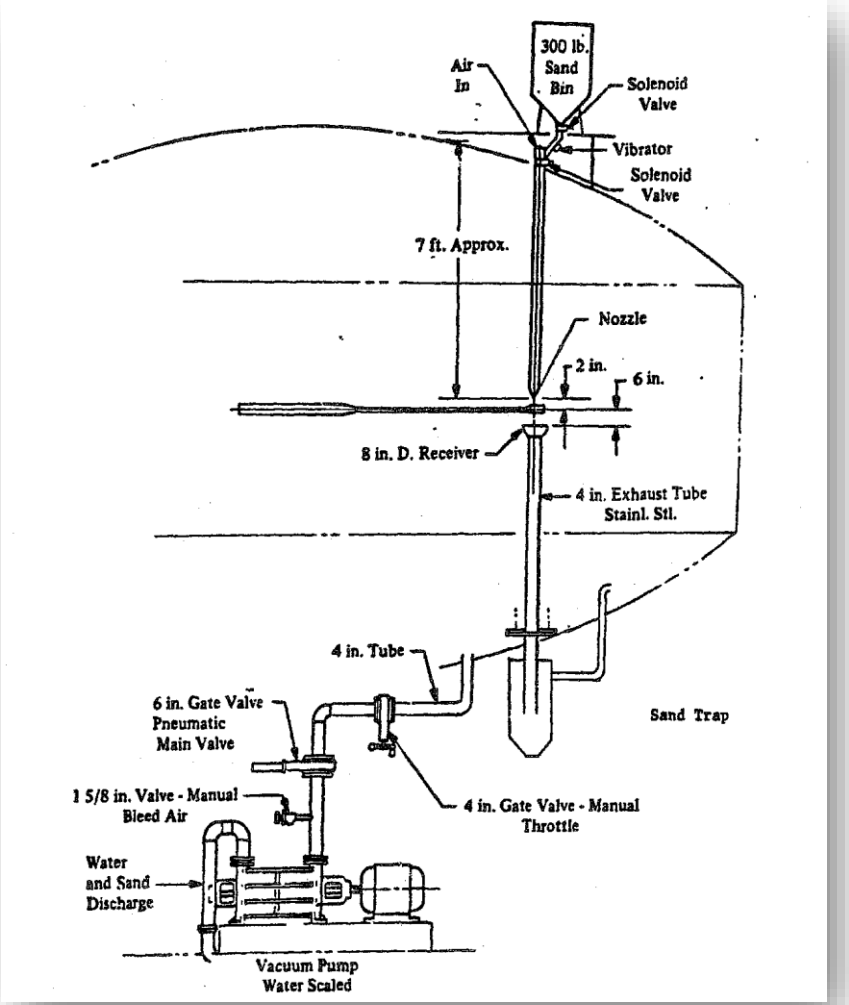
2) M. L. Atkin – Operation of an Open Cycle Gas Turbine Burning Pulverized Bituminous Coal – Australian Department of Supply, Aeronautical Research Laboratory, Mechanical Engineering Report No. 118, July 1967.

השפעת החומר וקשיותו

- מניחים שהרכב החול קבוע (50-60% קוורץ) וקשיותו קבועה.
- לצורך הערכת חומר הלהב וקשיותו צריך להתבסס על ניסויים שנערכו באותו חומר ועם אותו סוג אבק. בהעדר ניסויים כאלה ניתן להסתמך על ניסויים שנערכו עם חומרים דומים.
- בניסוי שנערך לבחינת שחיקה של להב רוטור של הליקופטר שבוצע ב-1982, נמדדה הארוזיה ונתקבלו התוצאות הבאות עבור להב מנתך אלומיניום 7075-T651, YS 503 Mpa, UTS 572 MPa:
  - כמות שהותזה 2410g למשך שעה
  - שחיקת חומר בקצב 0.28 mm/hr
  - מהירות ההתזה 339.8 m/s
  - זווית הפגיעה 35.8^0

מקור:
G. A. Malone (Bell Aerospace Textron) Development of Improved LACV-30 Propeller Blade Coatings for Protection against Sand and Rain Erosion and Marine Environment Corrosion – May 1983. Report DAAK70-82-C0017 – U. S. Army Mobility Equipment Research and Development Command AD – A132999.

מתקן הניסוי לשחיקה להב רוטור של מסוק



נוסחה להערכת קצב השחיקה המקומי

אם מניחים שקצב השחיקה עומד ביחס הפוך ל- UTS של חומר הלהב, נוכל לבנות נוסחה להערכת קצב השחיקה המקומי בכל נקודת פגיעה בלהב, על-סמך תוצאות הניסוי:

$$E = 0.116\left(\frac{572}{UTS}\right)\bullet\left(\frac{V}{339.8}\right)^{2.5}\bullet\frac{K_\theta(i)}{K_\theta(35.8°)}(QC)$$

כאשר:

E ב- mm/hr – קצב השחיקה המקומי

UTS ב- MPa – חוזק לקריעה של חומר הלהב

V ב- m/s – מהירות הפגיעה המקומית

i ב- ^{0} – זווית הפגיעה בלהב

הפונקציה K_θ חסרת ממד, נלקחת מהגרף עבור חומר Ductile

יישום נוסחת קצב השחיקה למדחס מסוים

לצורך יישום הנוסחה למקרה ספציפי יש לפעול כדלקמן:

- ☑ הערכת ריכוז החול ב- g/m^3 החודר למנוע.
- ☑ חישוב ספיקת האוויר הנפחית Q במשטר פעולת המנוע.
- ☑ חישוב גודל וכיוון מהירות הפגיעה של החלקיקים יחסית ללהב (V, i)

במקרה של מדחס ללא להבי הכוונה סטטיים (I G V) מניחים שמהירות החלקיקים האבסולוטית כמהירות האוויר בכיוון ציר המנוע: $V_X = \frac{Q}{A}$

מהירות הפגיעה היחסית בחתך נתון של הלהב (ברדיוס R) היא: $V = \sqrt{\left(\frac{Q}{A}\right)^2 + (\omega R)^2}$

זווית הזרימה ביחס לציר המנוע: $\beta = arctg\frac{\omega R}{Q/A}$

יישום נוסחת קצב השחיקה למדחס מסוים (המשך)

- ☑ זווית הפגיעה בלהב בחתך נתון היא ההפרש בין זווית המיתר (Staggering Angle) לזווית β
- ☑ אם לחתך קמירות (Camber Angle) קטנה מתחת ל- 10^0, אפשר להתייחס ללהב כאל פלטה עם שחיקה אחידה. אחרת יש לדקדק ולבצע חישוב נפרד עבור שפת ההתקפה, שפת הזרימה ואזורי הביניים בפרופיל
- ☑ ביצוע החישוב עבור 5-8 חתכים לאורך הלהב יאפשר להעריך את עיוות הפרופיל לאחר שעת פעולה, 10 שעות, 100 וכו' ולחזות מתי נגיע לכשל מכני (על-סמך חישובי חוזק ב- FEM של פרופיל שחוק) או אווירודינמי (על-סמך חישובי CFD של זרימה סביב הפרופיל)

סיכום

1) ניתן הסבר על נזקי חדירת חול/אבק במנוע.

2) הוצגה שיטה אמפירית להערכה חישובית של הנזק הנגרם ללהבי הדרגה הראשונה במדחס ע"י חישוב כמות החומר הנשחקת מהלהב וההשלכות על הפרופיל בכל חתך וחתך.

3) צריך לזכור ששיטת החישוב אמפירית ואם תנאי התפעול שונים משמעותית מתנאי הניסוי עליו היא מבוססת, יש מקום לכייל אותה ע"י בדיקת הנזקים במדידה לאחר שעות פעולה מעטות.