



חומר ציפוי מבוסס סיליקון דוחה התקרחות לתעשיית התעופה

1. תקציר

בעיית הצטברות קרח במנועי מטוסים או בקצוות הכנפיים של כלל המטוסים בכל הגדלים מהווה מטרד המדיר שינה מתעשיית התעופה העולמית.

הצטברות קרח משפיעה לרעה על מגוון מאפייני תעופה קריטיים כגון: **עילוי, גרר, דחף.**

תחת הנחייתה של חברת Pratt & Whitney משנת 2004, ביצעה הזרוע הצבאית האמריקאית הידועה כ- CRREL או בשמה המלא: Cold Regions Research And Engineering Laboratory שמוקם מושבה ב-Hanover שבארה"ב, בדיקת כושר ההידבקות או Adhesion Strength שנועדה למדוד את כושר ההידבקות של קרח למגוון ציפויים מונעי הקרח הידועים היום בתעשיית התעופה. התוצאות הצביעו שהחומר הסיליקוני R-2180, החליש את כושר ההידבקות בפקטור של 40 ביחס למשטחי מתכת חשופה ואלומיניום. תוצאות אלו היו הנמוכות ביותר שארגון CRREL צפה ב-37kPa בזמן שטפולן היה בעבר בעל המקדם הנמוך ביותר שנמדד ב-238kPa.

2. מבוא

1.1 רקע. בקרת קרח הינה דאגה יסודית וחשובה החוצה תעשיות רבות. ע"מ להתמודד עם נושא מורכב זה, פרסם הצבא האמריקאי או ליתר דיוק, U.S. Army Corps of Engineers of the Department of the Army מדריך בין 20 פרקים בנושא חשוב זה ושמו: **Ice Engineering**, מדריך זה מכסה את תחום הצטברות הקרח בכניסות למערכות הידרו דינמיות, תעלות, ניווט, מערכות הידראוליות וכו'.

הנדסת קרח היא לא רק הנדסה מבנית הנוגעת לאזורים קרים אלא גם תחום מרכזי ובעל חשיבות בתעשיית התעופה עקב השפעתה על מאפייני טיסה מגוונים וחשובים לאין שיעור. לדוגמא, כאשר קרח מצטבר על כנפי מטוסים או על קצוות הכנפיים של כל סוגי המטוסים עלולה להתרחש ירידה בכושר העילוי ועליה בגרר (התנגדות האוויר). למעשה, מבחנים שנעשו במנהרות רוח הראו ששכבות דקות של יריעות קרח יכולות לפגוע בכושר העילוי עד רמה של 30% וגרר של 40%

תוצאות הצטברות הקרח מסוכנות ברמה קיצונית ויכולות להתרחש בכל עונות השנה, ובכל מקום נתון. במטרה למנוע מצבים מסוכנים הוציא ה-FAA או בשמו המלא Federal Aviation Administration מסמכים המוכרים כ-Ads או Airworthiness Directives ולדוגמא # FAA-2004-19078 שמתאר את המגבלות במטוסים מסחריים בהתייחס להצטברות קרח.

מניעת התקרחות במשטחים סטטיים אינה משימה פשוטה ומובנת מאליה כלל וכלל. ישנם מס' שיטות ודרכים לשליטה ובקרה על הצטברות קרח במטוסים ולעיתים קרובות משתמשים בצירוף של מס' שיטות להשגת יעילות מיטבית. הגישה היעילה ביותר היא לדאוג שטמפרטורת המשטחים תישאר מעל 0°C. לעיתים קרובות מטוסים מאוחסנים במוסכים מחוממים, אפשרות נוספת שמיושמת היא התקנת מחממים באזורים במטוס שמועדים להצטברות קרח.

כימיקלים כגון נגזרות של גליקול (נוזל צמיג המשמש לקירור) וגז אתר, משמשים לעיתים למניעת התקררות במטוסים וזאת עקב תכונתם ויכולתם להוריד את נקודת הקיפאון. לאחרונה אסרה ממשלת קנדה את השימוש בתמיסות אלו עקב השפעתם המזיקה לסביבה, למרבה הצער תמיסות אלו יקרות לשימוש ולא ישימות במקרים לא מעטים.

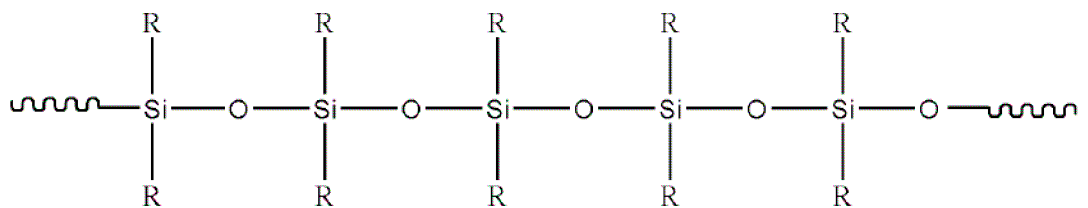
פתרון אידיאלי וחסכוני יותר יהיה ליישם חומר שמונע הצטברות קרח מלכתחילה מאשר הצורך לדאוג להסרת הקרח לאחר הצטברותו. אולם, מדובר בפעולה לא פשוטה כלל ועיקר בהתחשב שחוזק ההידבקות של הקרח חייב להיות פחות מחוזק הקריעה שהקרח מפעיל על המשטחים. באופן כללי הידבקות מוגדרת כחיבור פיסיקלואימי של שני מצעים. מצעים בעלי קבוצות פעילות זמינות לחיבור כגון: HO או C=O על זכוכית, פלסטיק, ואלומיניום מאפשרים משיכה כימית גדולה יותר דרך כוחות Van der Waals או משיכת מימן חלשה.

מצעים בעלי משטחי חיבור מוגבלים מקשים על כושר ההידבקות כגון: אצטל, ניילון 24, או PTFE. מגוון מצעים אחרים משתלבים בתוך תחום זה.

היום קיימים חומרים מסחריים זמינים המשווקים לתהליך מניעת הצטברות קרח או Ice-phobic. רבים מחומרים אלו נבחנו ודורגו תחת מחקרם של Haehnel and Mulherin משנת 1998.

בעבר הקרוב יותר, קבוצת חומרים נוספת נבחנה ודווחה למעבדות חברת Pratt & Whitney ב-CRREL, חומר ציפוי תוצרת חברת NuSil נכלל בבחינות אלו, LLC.

1.2 כימית סיליקון. סיליקון, או ביטוי נכון יותר "Polyorganosiloxanes" מוכרת זה למעלה מ-60 שנה, התרשים הבא מציג מבנה טיפוס, תמונה 1, קבוצות R מייצגות קבוצות אורגניות פעילות כמו Methyl, phenyl, trifluoropropyl.



תמונה 1

סיליקונים מתאפיינים בתכונות מאוד ייחודיות בהשוואה לגומי על בסיס אורגני. יכולות הסיליקונים לשמור על אלסטיות בטמפ' נמוכות ועמידות לשבירה בטמפ' גבוהות הביאו לבחירתן לשימוש בסביבות קיצוניות וקשות.

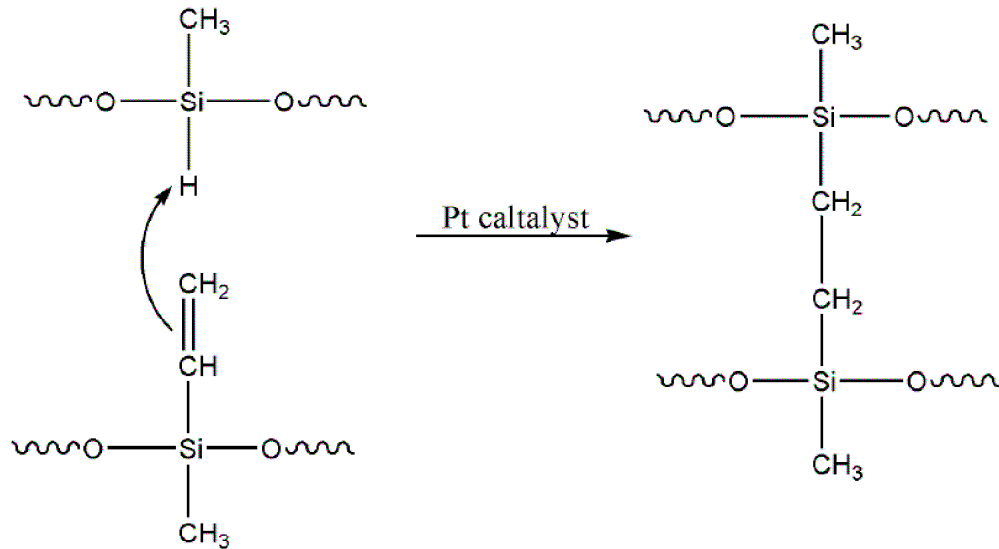
נקודת ה-Tg של סיליקונים רבים פחותה מ-115°C. תכונות אחרות של סיליקונים מציעים הם התנגדות ללחות (<0.4%), חוזק דיאלקטרי של 500 V/mil, מקדם התכווצות נמוך (<1%) תכולה יונית נמוכה (<20ppm) ובנוסף גמישות בבניית פורמולה.

בתחילה מיוצר הפולימר הסיליקוני ובשלב שני מוסף הסיליקה כמילוי לחיזוק ושיפור התכונות הפיסיקליות של ה-elastomer. הרכב זה מכונה "הבסיס". סיליקה מחזקת את הסיליקון הפולימרי המוקשה דרך כוחות van der Waals וחיבור מימני בין קבוצות hydroxyl ע"פ משטח הסיליקה ו-siloxane של הפולימר. קשרים רופפים אלו מאפשרים לסיליקון המתקשה לספוג מאמצים כמו גם להעלות את הצמיגות של סיליקון לפני הקשיה דרך אותה פעולת גומלין של המילוי הפולימרי.

חומר הסיליקה מטופל בדרך כלל עם סיליקונים אורגנים כדרך להעלות ולשפר את התאימות של הסיליקה בפולימר, פעולה זו מייצבת את הצמיגות ומצמצמת את ה-crepe aging.

במערכת בעלת מרכיב אחד, catalyst ו-crosslinker מוספים לבסיס. למערכת בעלת שני מרכיבים, crosslinker ו-inhibitor מוספים לחצי כמות הבסיס ליצירת מרכיב B. מוספים זרז לחצי הבסיס הנותר ליצירת מרכיב A.

סיליקונים נוספים, מבוססים על מערכת מאיץ פלטינום דו-מרכיבית, לא דורשים לחות לטובת ההקשיה. ההקשיה מערבת באופן ישיר את vinyl functional crosslinker ל-ethylene bridge crosslinker (ראה תמונה 2)



תמונה 2

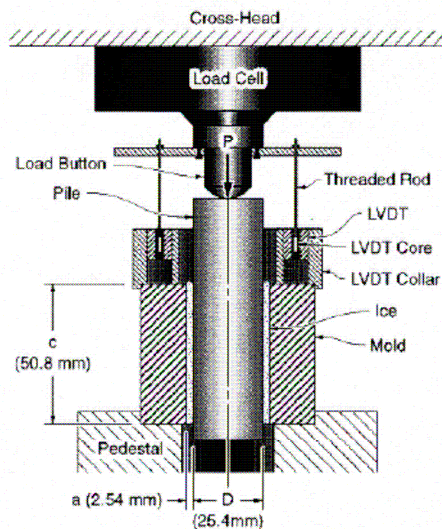
בשונה מדבק סיליקוני חד-מרכיבי, מכניזם זה לא מערב קבוצות עוזבות והקשיה מתקבלת בסביבה סגורה. רוב מערכות פלטינום מסוגלות להקשיה מלאה בטמפ' חדר תוך 24 שעות, או האצת ההקשיה עם עליית הטמפ'.

3. שלב ניסיוני

שנים עשר העתקים מכל אחד מ-6 סוגי ציפוי מונעי הצטברות קרח רוססו על משטחי אלומיניום. סוגי הציפוי השונים מובאים בטבלה 1. כל דגימה נשטפה לפחות פעמיים עם isopropyl alcohol להוציא תהליך ציפוי Microphase. התהליך התבסס על יצרניות הציפויים והמלצתם לפני קיום הבחינות.

Sample Name	Manufacturer
MegaGuard LiquiCote	KissCote, Inc
Phasebreak B-2	Microphase Coatings
ESL	Microphase Coatings
RIP-4004	S&A Fernandina, Inc.
Urethane-51PC951	21 st Century
R-2180	NuSil Technology

חוזק ההדבקה של חומרי הציפוי מונעי הקרח המופיעים בטבלה נבחן והשווה תוך שימוש בשיטת בחינה של CRREL שפותחה לבחינת נקודות הדבקה. תאור סכמתי של מתקן הבחינה נראה בתמונה 3. קרח נבנה בין שני משטחי צילינדרים. הכוח הנדרש לדחוף את הצילינדר הפנימי מהקרח נמדד והוא אשר מציין את חוזק ההידבקות. טבעת עגולה מונחת בתחתית הצילינדר הפנימי, מונעת כל דליפת מים בתהליך ההקפאה. הדוגמאות מוקפאות למשך 8 שעות בטמפי של -10°C ולאחר מכן שלב מנוחה של 40 שעות. הדוגמאות נבחנות לאחר מכן באמצעות מערכת הצילינדרים תוך תנועת צילינדר בקצב של 0.06 מ"מ/דקה עד לנקודת השבירה.



תמונה 3

4. תוצאות ודיון

בדיקות מעבדה לחוזק הידבקות קרח לחומרי ציפוי מונעי הקרח, טבלה 1, נבחנו עבור חברת Pratt & Whitney.

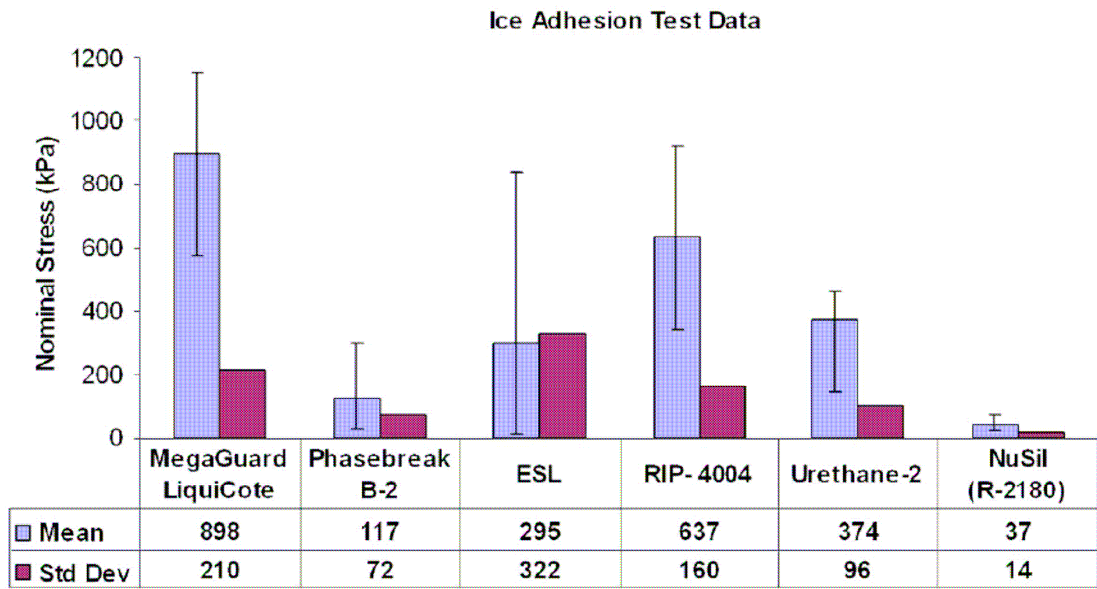
חומרים שנבחנו היו:

MegaGuard LiquiCote; Phasebreak B-2; Microphase ESL; RIP-4004, 51PC951; R-2180.

תוצאות בחינת העומסים נאספו וזמינים בדו"ח של CRREL. תמונה 5 מסכמת תוצאות אלו. ציר Y מתאר את כוח הגזירה לשחרור הקרח, הערך מחושב מעומס מירבי נדרש לגזירת הקרח ממשטח הבדיקה. ערכי סטיית ה-mean ו-standard הופקו מכל 12 המדגמים. קו השגיאה מציין את טווח המתיחה לכל קבוצה של דוגמאות.

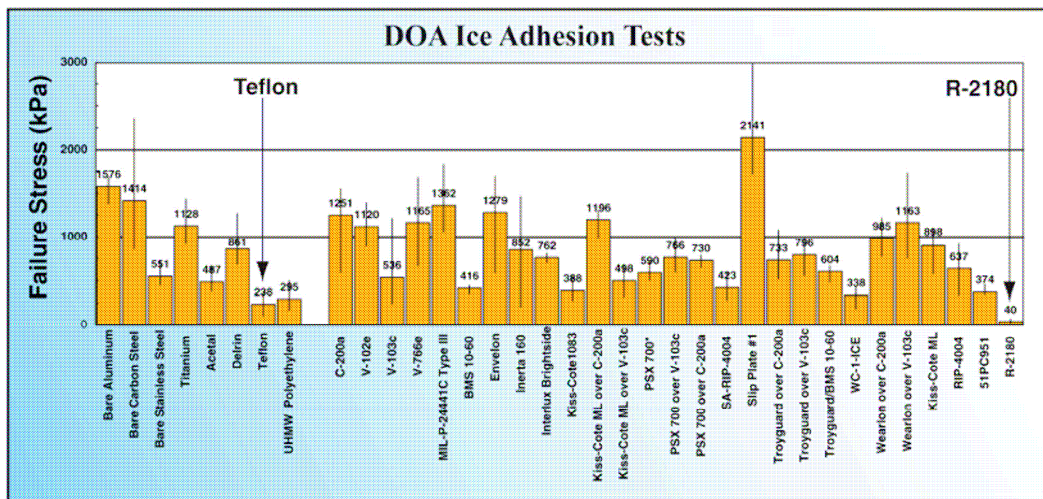
קודם לביצוע מחקר זה, טפלוני הציג את הערך הנמוך ביותר של 238kPa. אולם, ברור כעת שסיליקון פולימרי, R-2180 הפגין כוח את הגזירה הנמוך ביותר של 37kPa וזאת בהשוואה

לחומרי ציפוי מסחריים אחרים הזמינים ושנבחנו Phasebreak B2 ו-ESL גם הפגינו כוח הידבקות נמוך של 117kPa ו-295kPa בהתאמה. ואולם, שני חומרים אלו הפגינו רמה גבוהה של סטיות תקן. חוסר עקביות זה מיוחס באבחנה שהקרח היה במצבי הקשיה שונים. דבר זה אובחן בדו"ח CRREL שמתאר בדיקות של Phasebreak B-2 ו-ESL שהיו בהם עקבות נראים של מים נוזליים על פני משטחי הבדיקה (בחלקם העליון והתחתון). חומרים אלו חשודים בחוסר עקביות עקב גלישת תמיסה מהציפוי לתוך המים תוך הורדת נקודת הקיפאון. חשוב יהיה להגדיר אם ציפויים אלו יפגינו התייצבות במידה והבחינות יתקיימו תחת תנאי קיפאון מלא ובטמפ' נמוכה.



תמונה 4

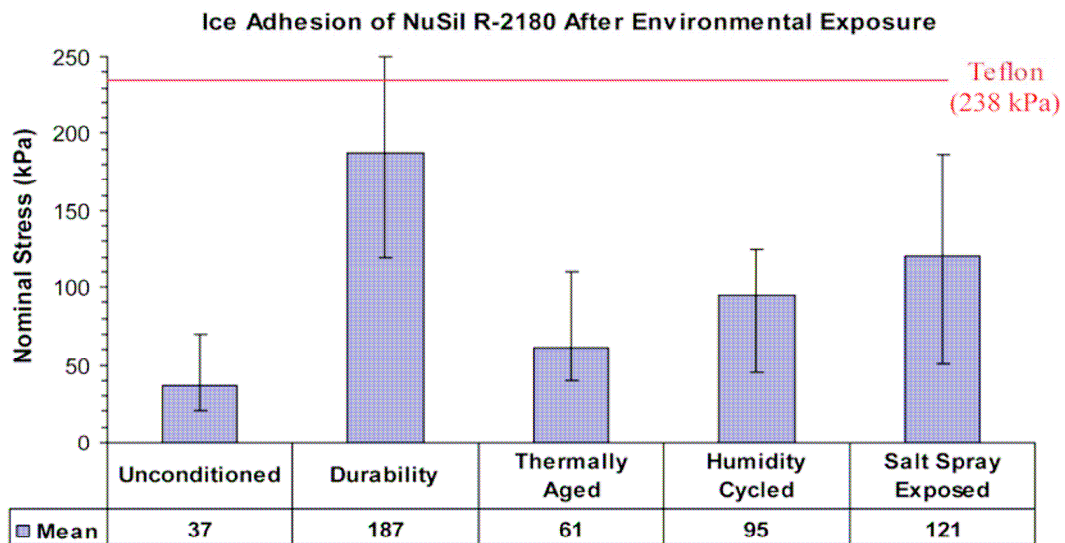
מחקר השוואתי שבוצע ע"י US Army Corps of Engineers of the Department of the Army בדק והעריך את חוזק ההידבקות של מבחר חומרים מסחריים הזמינים כיום, ציפויים וצבעים מוכרים כחומרים בעלי מקדם חיכוך נמוך או בעלי תכונות דחיייה (non-stick), ראה תמונה 5. בבדיקה זו חומרי הציפוי יושמו על דוגמאות שעברו צביעה קודמת ועמידה מאוד משום חוסר הסבירות שחומרי ציפוי בעלי חוזק הידבקות נמוך יחליפו למעשה את הצבעים הקיימים ויותר מכך שהם יושמו ישירות על צבעים צבאיים. בדומה לתוצאות המוצגות במאמר זה, R-2180 הציג שוב פעם עליונות ביחס לחומרי הציפוי האחרים שנבחנו ונבדקו. למעשה, חוזק ההידבקות נחלש וירד במתכת חשופה בפקטור 40.



תמונה 5

נושא קריטי נוסף שקיבל התייחסות, מה תהיה רמת הביצוע של תהליך הציפוי לאחר חשיפה לתנאי סביבה קיצוניים ושחיקה. תמונה 6 מציגה כיצד R-2180 מתפקד לאחר הציפוי שנעשה על משטח שעבר את התנאים הקיצוניים שכוללים שחיקה פיסית, מחזוריים טרמיים, מחזורי לחות, ומליחות.

עמידות משטח האלומיניום המצופה ב-R-2180 נבחנה ע"י חספוס המשטח בנייר זכוכית קודם לציפוי CRREL ע"מ לדמות את השפעות השחיקה. תמונה 6 מציגה שלמרות תוצאות ה-R-2180 על משטח שעבר שחיקה מוגברת אינן מזהירות כפי שנמצא בציפוי על משטח שלא עבר שחיקה ברמה כזו, עדיין התוצאות היו טובות יותר מטפלון. יותר מכך, כאשר משטח הציפוי נחשף לתנאי טמפ' קיצוניים, מחזורי לחות, וריסוס עם תמיסת מי מלח קודם לבחינת ההידבקות, R-2180 המשיך להפגין ביצועים טובים יותר מטפלון (תמונה 5).



תמונה 6

5. מסקנות

הצטברות קרח הינה בעיה עמוקה, רצינית, חובקת עולם ובעלת השפעה כלכלית על תעשיית התעופה וכתוצאה מכך המשאבים המושקעים בהבנת הבעיה. בחינות שבוצעו ע"י CRREL הראו שציפוי סיליקון R-2180 מנחית באופן משמעותי את כושר הידבקות הקרח כאשר החומר מיושם על משטחי אלומיניום וזאת בהשוואה לחומרי ציפוי מסחריים אחרים שמפגינים ביצועים נחותים יותר.

באופן מעשי, R-2180 מתפקד ברמה הקרובה לפי 10 טוב יותר מרבים מחומרי הציפוי הקיימים בשוק המשמשים בתעשיית התעופה, בנוסף, ציפוי סיליקון R-2180 ממשיך להפגין ולהציג ביצועים עדיפים גם לאחר שחיקה וחשיפה לתנאי סביבה קיצוניים כמו חום, לחות, ומי מלח. מקובל להאמין שרמת האנרגיה של החומר או הציפוי משפיעה ברמה דרמטית על רמת הידבקות הקרח ואולי קשרים מורכבים בין הקרח וציפוי הסיליקון שמורידים את רמת ההידבקות. כתוצאה מכך, מין הראוי והמומלץ במחקרים עתידיים למדוד את רמת האנרגיה במגוון חומרים לקביעת היחסים בין הידבקות הקרח ורמת האנרגיה של הציפוי.

מקורות.6

- (1) EM 1110-2-1612, Engineering and Design – Ice Engineering, U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, October 20, 2002, UPDATE VERSION September 2006.
- (2) Mulherin, ND, RB Haehnel, JF Jones (1998) Toward developing a standard shear test for ice adhesion. Proceedings, 8th International Workshop on Atmospheric Icing Structures, Reykjavik, Iceland, June 8-11, 1998. IWAIS '98.
- (3) CNN online, December 11, 2006, Canada Bans Ethylene Glycol Monomethyl Ether.
- (4) Laboratory Ice Adhesion test Results for Commercial Icephobic Coating for Pratt & Whitney, May 2004, CRREL.