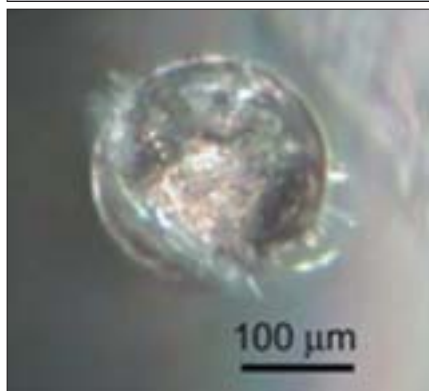
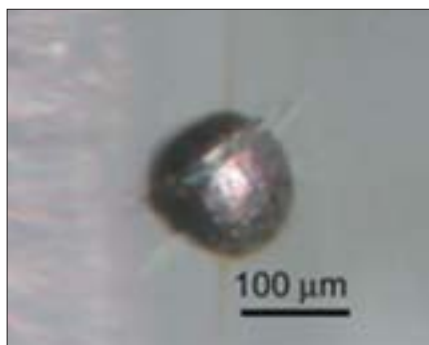


# עקב אכילס

אך מאחר שהוא קשור לשכבות החיצוניות שהתכווצו, אין לו אפשרות להתכווץ. משום כך הוא נותר במתיחה לעומת המצב הטבעי אליו היה מגיע אילולא היו השכבות החיצוניות צמודות אליו). פני השטח של הזכוכית המחוסמת נמצאים תחת השפעת כוחות דחיסה גדולים, המאזונים על-ידי כוחות המתיחה הגדולים של החלקים הפנימיים. תהליך ההקשחה הזה של הזכוכית הוא זה שמאפיין את זכוכית הביטחון.



ריכוזי ניקל סולפיד נמצאו בתוך זכוכית ביטחון שלא ניזוקה בתוך הזכוכית ישנם סדקים משמעותיים בסמיכות לניקל הסולפיד. במועד הצילום סדקים אלה עדיין לא היו קריטיים

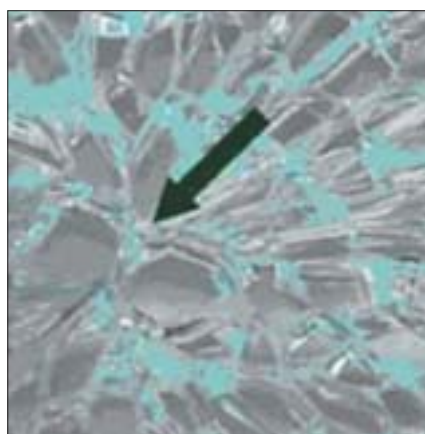
## מקורות הניקל בזכוכית

"איפיון" החומר משמעו חקר התכולה, המבנה והמראה שלו - איך נראה החומר, ממה הוא עשוי, איך הוא בנוי, איזה מזהמים ועקבות של אילו חומרים הוא מכיל ואיך הוא משפיע על סביבתו. איפיון הניקל הסולפיד ומזהמים אחרים בזכוכית יכול להוביל לגילוי מידע לגבי עצם נוכחותו של ניקל סולפיד בזכוכית, ואולי גם לדרך לסלק אותו. הגופרית (Sulphur) היא אחד המרכיבים שאותם מוסיפים בתהליך ייצור הזכוכית. מקורות הניקל בזכוכית אינם ידועים, ועל כן האיפיון ממוקד בזיהויים.

קיימים שלושה מקורות אפשריים להימצאותו של ניקל בזכוכית:

1. חומרים המשמשים במהלך השינוע ובאחסון של חומרי הגלם;

הצברים של ניקל סולפיד הקיימים בייצור זכוכית רגילה אינם גורמים לבעיה מהסוג שתיארנו. בתהליך הייצור של זכוכית רגילה, המעבר ההדרגתי של ניקל סולפיד ממצב גבישי אחד למשנהו מתבצע תוך כדי תפיחה, אך מכיוון שהזכוכית מתקררת לאט ואינה קשיחה כל-כך - לא נגרם לה נזק. לעומת זאת, בייצור זכוכית ביטחון קירור הזכוכית הוא מהיר, ולכן הניקל הסולפיד נשאר, לאחר התקררותו, לכוד בתוך הזכוכית במצבו הדחוס, כפי שהיה במצב המותך של הזכוכית. רק לאחר מספר שנים, בהיותו בטמפרטורת החדר, הוא משנה לאיטו את צורתו הגבישית, תופח וגורם לשבירת הזכוכית.



תהליך אופייני של שבר 'ספונטני' בזכוכית ביטחון לחלונות: הניקל הסולפיד נמצא במוקד הכשל (במרכז, בצורת פרפר)

## השפעתו של ניקל סולפיד בייצור זכוכית ביטחון

תהליך החיסום של זכוכית שטוחה מתבצע בתנור הדומה למצנן (טוסטר) ענק. הזכוכית השטוחה מובלת אל תוך התנור על גבי גלילים ומשוונת באמצעותם בתוכו, קדימה ואחורה, כשהיא מחוממת לטמפרטורות של 600-700°C, עד לנקודה שבה היא מתרככת.

במצב זה היא מוסעת מתוך התנור על גבי הגלילים לתוך 'מקלחת' של אוויר, המצנן אותה במהירות משני צדיה. מכיוון שמוליכות החום של הזכוכית נמוכה - ליבת הזכוכית נשארת חמה ורכה, בעוד שפני השטח החיצוניים מתקררים, מתמצקים ומתכווצים.

לאחר ההוצאה מהתנור ליבת הזכוכית מתקררת באופן הדרגתי, מתמצקת ושואפת להתכווץ. אבל, מאחר שפני השטח החיצוניים התקררו כבר והתכווצו, בעוד שהחלק הפנימי עדיין מצוי בתהליך של התקררות והתמצקות, פועלים על החלק הפנימי כוחות מתיחה גדולים (החלק הפנימי שואף להתכווץ במהלך התקררותו שלו,

בשנים האחרונות התפרסמו בעולם ידיעות על אירועים שבהם היו מעורבים חלונות מזכוכית מחוסמת (מוקשחת), שהתנפצו ללא כל אזהרה מוקדמת ולוו במטח דקיך של רסיסי זכוכית שנשרו מבניינים רבי קומות. מה הקשר בין כשל זה ובין המלח ניקל סולפיד, ומה נעשה לתיקון המצב?

עיבד זהר שטרן

זכוכית "ביטחון", להבדיל מסוגי זכוכית אחרים, מאופיינת בתכונות חוזק גבוהות המוקנות לה בתהליכי חיסום (הקשחה) במהלך הייצור. מספר דיווחים שהתפרסמו בתקשורת התייחסו לאירועים שבהם התנפצו חלונות מזכוכית מחוסמת ללא כל אזהרה מוקדמת. למרות שהציבור נחשף רק לאחרונה לכשלים הספונטניים בזכוכית המחוסמת (זכוכית ביטחון), המכונים "כשלים פתאומיים", התופעה ידועה כבר מאז שנת 1960.

מתברר, שכשלים מסוג זה נגרמים בגלל נוכחותו של המלח ניקל סולפיד בהרכב הזכוכית. למעשה, נוכחותו בתוך זכוכית נדירה וכמותו בה אפסית. לשם המחשה: כמות ניקל סולפיד המעורבת בייצור טונה זכוכית טיפוסית מסתכמת בכמות זעירה של 5 מיקרוגרם.

עם זאת, למרות ריכוזו הנמוך מאד של הניקל הסולפיד בזכוכית, הוא מהווה מקור לדאגה ויש לו פוטנציאל סיכון בזכוכית ביטחון. הסיבה לדאגה נעוצה בגורם ההשהיה במעבר מפאזה מוצקה אחת של הניקל הסולפיד לפאזה מוצקה אחרת, תוך שינוי מבנה הגביש. בטמפרטורה גבוהה גבישי הניקל סולפיד צבורים בצפיפות גבוהה, ובהתקררם לטמפרטורות נמוכות יותר הם תופחים וצפיפותם פוחתת.

זהר שטרן הוא מידען במרכז המידע של המוסד לבטיחות ולגיהות

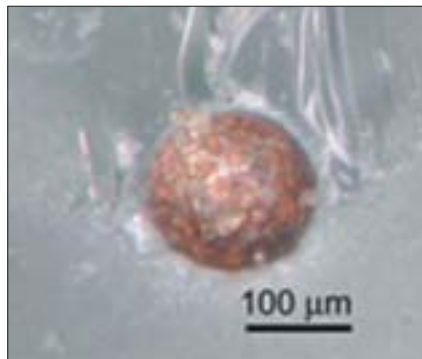
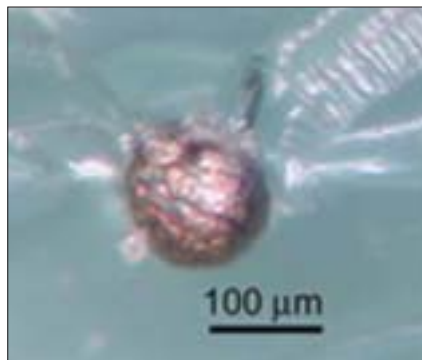
עובד על-פי המאמר

The Achille Heel of a Wonderful Material:  
Toughened Glass, שהתפרסם באתר  
[http://www.glassonweb.com  
\(/articles/article/330\)](http://www.glassonweb.com/articles/article/330)

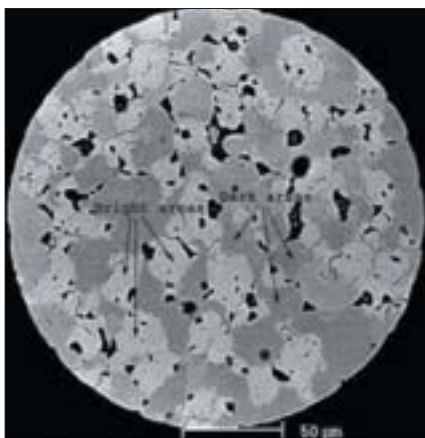
# של זכוכית הביטחון

● **מבחן הרס:** במקביל לעבודת האיפיון, פותח מבחן הרס הנקרא "השריה בחום". מטרתו: גילוי וניפוי של זכוכית 'בעייתית' המכילה ניקל סולפידי. בבדיקה זו מכניסים לתנור את לוחות הזכוכית המחוסמת כשהם מוערמים זה על גבי זה, מחממים בשנית לטמפרטורה של  $290^{\circ}\text{C}$  ומשהים אותה כך במשך מספר שעות. השהייה בחום גורמת לחלקיקי הניקל הסולפידי לעבור למצב הגבישי התפוח, האופייני להם בטמפרטורות הנמוכות, מה שגורם ללוחות הזכוכית הבעייתיים להיכשל. היתרון בתהליך זה הוא ניפוי של 95% מלוחות הזכוכית הבעייתיים, ללא השפעה משמעותית על התכונות שמקנה הטיפול התרמי הקודם, ההופך את הזכוכית למחוסמת. החסרונות בתהליך החימום הנוסף הם ייקור המוצר והיותו תהליך הורס. כמו כן, מכיוון שעיבוד צורתי של הזכוכית, כמו קידוח חורים וגימור, חייב

שנים לאחר ההתקנה ובמקרים רבים לאחר עשר שנים ויותר.



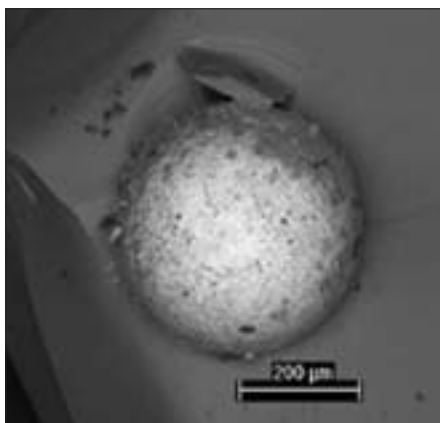
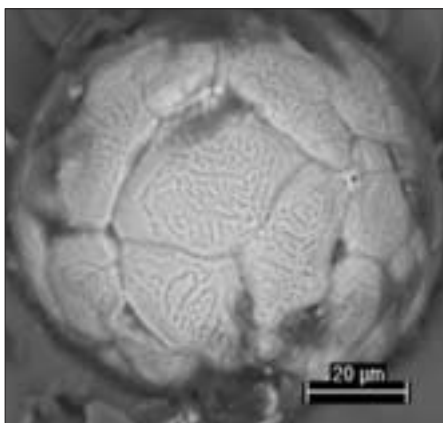
חלקיקי ניקל סולפידי שנמצאו על פני שבר זכוכית ביטחון לאחר כשל ספונטני



תמונה זו צולמה במיקרוסקופ אלקטרוני סורק בקטע של חתך מלוטש של ניקל סולפידי. ניתן לראות שהאזור מורכב ממספר פאזות של ניקל סולפידי ( $\text{Ni}_3\text{S}_2$ ) וגם של סולפידי אחר

## בחינה וגילוי לקראת תיקון המצב

יותר מ-45 שנה עברו מאז גילוי הסיבה לשבירה הספונטנית של זכוכית הביטחון. במשך השנים נעשו מספר ניסיונות כדי להתגבר על התופעה השלילית הזאת, והמאמצים התמקדו בשלושה מסלולים: כאמור איפיון, וכן מבחן הרס וגילוי מוקדם.



התמונות צולמו במיקרוסקופ אלקטרוני סורק ומראות חלקיקי ניקל סולפידי שנמצאו על פני השטח של שבר זכוכית: החלקיק הימני גדול (קוטר כ-400 מיקרון), החלקיק השמאלי קטן (קוטר כ-85 מיקרון)

2. זיהומים המגיעים לתוך הזכוכית המותכת במגע עם הלבנים של תנור ההתכה;  
3. מבערי החימום.

● **איפיון:** בעבודת איפיון מוקדמת התברר שדלק נוזלי (על בסיס חומרי נפט), המזין את המבערים, מכיל עקבות של ניקל, ולכן, כדי להימנע מנוכחותו בזכוכית, הוחלף סוג הדלק להפעלת המבערים מדלק נוזלי לגז טבעי. המעבר מדלק נוזלי לגז טבעי ושיפור במערכת שינוע חומרי הגלם שיפרו מאוד את המצב, אך עדיין לא פתרו את הבעיה. לאחרונה פורסמו מספר גילויים הקשורים למקורות הניקל (בהם נדון בהמשך).

במהלך התקררות איטית של ניקל סולפידי, מטמפרטורה גבוהה של מעל  $380^{\circ}\text{C}$  לטמפרטורת החדר, עובר הניקל הסולפידי ממצב גבישי אחד למצב גבישי אחר, תוך התפשטות (תפיחה) בשיעור של 4%.

בתהליך הכנת זכוכית ביטחון, הקירור מטמפרטורה גבוהה לטמפרטורת החדר נעשה באופן מהיר. כתוצאה מכך הניקל הסולפידי נשאר גם בטמפרטורת החדר זמן רב במצב הגבישי הדחוס בו התקיים בטמפרטורה הגבוהה. חלקיקי ניקל סולפידי מתפשטים לאחר זמן רב, ולכן הם עלולים לגרום לסדקים בזכוכית המקיפה אותם. החלקיקים, שקוטרים גדול מ-60 מיקרונים, הם אלה הגורמים לניפוץ הזכוכית.

את חוזקה הרב של זכוכית הביטחון מקנים לה המאמצים המתפתחים בחלקים החיצוניים והפנימיים שלה בתהליך הייצור. מאמצי הדחיסה בחלקים החיצוניים של זכוכית הביטחון גורמים לסגירת סדקים על פני שטח הזכוכית. כתוצאה מכך חוזקה גבוה פי 3 עד פי 5 מחוזקה של זכוכית רגילה. מאמצי המתיחה הפנימיים בזכוכית הביטחון מבטיחים, במקרה של שבירה, שהיא תתנפץ לרסיסים קטנים (הודות לשחרור המאמצים הללו), מה שמעלה את רמת הביטחון. אך הימצאותם של חלקיקי הניקל הסולפידי בליבת הזכוכית, באזור המתיחה, מהווה חיסרון. מאמצי המתיחה הופכים להיות נקודת התורפה (יעקב אכילס) של זכוכית הביטחון. חלקיקי הניקל הסולפידי תופחים ומחוללים סדקים בזכוכית, כך שנוכחותם באזור המתיחה גורמת לכשל כולל של הזכוכית. המעבר האיטי של הניקל הסולפידי ממצב מוצק אחד (לא יציב) למצב אחר (יציב) גורמת לדחייה בזמן בין ההקשחה המיידית של הזכוכית לבין הכשל שלה, המתרחש במועד מאוחר יותר. קשה לנבא מראש את המועד המדויק שבו תיכשל הזכוכית, מכיוון שתהליך המעבר של הניקל הסולפידי למצבו היציב שונה בין זכוכית שיוצרה במקום מסוים לבין זו שיוצרה במקום אחר. במקרים מסוימים מתרחש כשל הזכוכית חמש

נפחים גדולים מאוד של נתונים בזמן קצר יחסית. לצורך זיהוי הפגמים שתיארנו פותחה שיטת צילום הכוללת שלושה שלבים: צילום, בחינת הפילים ובדיקת הזכוכית. נבדקו, לדוגמה, 4,000 זוגיות של חלונות בשטח כולל של כ-15,000 מ"ר. ב-280 חלונות נמצאו כ-300 מוקדים משמעותיים של ניקל סולפיד. בדוגמה נמצאו אמנם כ-50,000 מוקדי זיהום, אך רק כ-300 מתוכם נחשבים 'קטלניים' (בעלי גוון חום-זהוב, האופייני לניקל סולפיד). רק זיהום הנמצא בקרבת מרכז העובי של לוח הזכוכית (האזור שבו פועלים מאמצי המתיחה) נחשב למסוכן. זיהומים הנמצאים בקרבת החלק החיצוני של הזכוכית אינם יכולים, בדרך-כלל, לגרום לשבירה ספונטנית של הזכוכית. ■

שעברה שבר ספונטני נמצא שמוקדי הזיהום העיקריים של ניקל סולפיד, שגרמו להתחלת השבירה, היו בקוטר של 100 עד 200 מיקרון. במקרים מסוימים קוטרם היה קטן אף יותר (כ-70 מיקרון בלבד). משמעותו של היחס בין מידותיהם הזעירות של הפגמים לבין מימדיהם הגדולים של החלונות הוא, שכדי להגיע לאמינות סבירה בשיטת הגילוי נדרש עיבוד ממוחשב של נתונים רבים. לדוגמה: כדי לאחסן בקבצי מחשב את מיקומו של מוקד זיהום בקוטר של 70 מיקרון, נדרש פיקסל בגודל של 35 מיקרון. לכן, דימוי דיגיטלי של שטח בגודל 3 מ"ר ברזולוציה של 35 מיקרונים דורש אחסון מידע בהיקף של 3 גיגה-בייטים. מבלי להתייחס לסוג טכניקת הגילוי או לרגישותה - האתגר ביישומה הוא היכולת להיות מסוגלים לעבד

להתבצע לפני החיסום, נגרם הפסד של לוחות זכוכית מוכנים להרכבה בתהליך הבדיקה ההורסת הזאת, בגלל בזבוז של זמן ייצור שהושקע בעיבוד הצורתי של הזכוכית. בנוסף לכך, מכיוון שהלוחות מוערמים זה על גבי זה, כשל של אחד מהם גורם לא פעם לנזק ללוחות הסמוכים לו. ● **גילוי מוקדם של ניקל סולפיד:** המסלול השלישי לפתרון בעיית ההתרסקות הספונטנית של זכוכית הביטחון הוא גילוי מוקדם. לגילוי ישנם מספר יתרונות על פני מבחן ההרס. למרות שמבחן ההשריה בחום יעיל, יש לו שני חסרונות: האחד - שהוא בזבזני, והשני - לא ניתן ליישמו בקלות בלוח זכוכית שכבר הותקן ויש חשד לנוכחות של ניקל סולפיד בתוכו. בכל אופן, גילוי מוקדם הזיהום הוא משימה מאתגרת, מכיוון שהם זעירים מאד. כאשר בודקים זכוכית

מנגנון ההכיה האלקטרוני של Speedglas SL מתאים למירב תהליכי הריתוך: TIG, MAG, MIG, MMA, ולריתוכי פלזמה.

לפרטים נוספים בדבר המסיכה ומוצרי החברה ניתן לפנות אל ניר מנירב בחברת 3M, טל' 09-9615000; טל' ישר 09-9615063; טל' נייד 054-4999078; דוא"ל: nmenirav@mmm.com וכן באתרי האינטרנט <http://www.3m.com> ו-<http://www.speedglas.com>



## חידושים בבטיחות

אין בדיעות המתפרסמות במדור זה משום המלצה על טיב המכשירים והציוד או המלצה לרכישתם. המדור הוא רק שירות מידע לקורא. המכשירים לא נבדקו על ידינו וכל האמור כאן הוא על אחריות הספקים בלבד.

### 3M משיקה: מסיכת ריתוך אלקטרונית קלה במיוחד

באמצעות שימוש בטכניקות ייצור מתקדמות של מסכי LCD, הצליחה חברת 3M לייצר את Speedglas SL - מסיכת ריתוך עם מנגנון הכהיה קל במיוחד. משקל המסיכה, כולל מנגנון ההכיה, 360 גרם בלבד. מנגנון ההכיה פועל באופן אוטומטי, תוך 0.1 אלפיות השנייה, בארבע דרגות רגישות וחמש רמות הכהיה (8-12). המנגנון מכוון מראש על-ידי הרתך, בהתאם לצורך, ומעניק לו רמת הגנה גבוהה ביותר.

המשתתף שצבר את המספר הגבוה ביותר של זוגות משלימים מוכרז 'אלוף הבטיחות'.

לפרטים ולהזמנות: ד"ר יוסי טוביאנה, טל: 03-9339147, 052-2781568 או בדוא"ל [yosita@m-zahav.com](mailto:yosita@m-zahav.com)



### 'בטיחות בריבוע' - משחק לכל המשפחה להטמעת כללי בטיחות

'בטיחות בריבוע' הוא משחק קופסה ידידותי ומאתגר לכל משפחה. תפקידו לעזור ללמוד ולהטמיע כללי בטיחות עיקריים בדרכים, בבית, בעבודה ובסביבה בכלל. חשיבותו בכך שהוא מעורר תקשורת יעילה בין בני המשפחה לגבי דרכי ההתמודדות עם מפגעי בטיחות ובריאות שונים בבית ומחוצה לו.

המשחק מעודד חינוך לתרבות של בטיחות כוללת. 'בטיחות בריבוע' פועל כמשחק זיכרון שבו על המשתתפים לאתר זוגות של קלפים משלימים - נכון/לא נכון מבחינה בריאותית/בטיחותית. יש 84 קלפי משחק המאוירים בהומור ובחן. 'אביר הבטיחות', קלף מדליק במיוחד, משמש כעין ג'וקר ויכול להצטרף לכל כרטיס כדי ליצור צמד.