

כשל של צינור אינקונל 600 מרוחק, במעגל הקירור
של כור גרעיני

ש' אדס, ב' הרמן, ג' כהן, א' רבילוביץ, ע' שטרן

טבת תשמ"ג - דצמבר 1982

English title and abstract included

LEGAL NOTICE

This publication is issued by the Nuclear Research Centre - Negev, Israel Atomic Energy Commission. Neither the Nuclear Research Centre - Negev, nor its controllers, nor any person acting on their behalf or on behalf of the Israel Atomic Energy Commission

make any warranty or representation, express or implied, with regard to the accuracy, completeness, or verifiability of the information contained in this publication, or that the use of any information, apparatus, method or process disclosed in this publication will not bring into private owned rights, or

assume any liability with respect to the use of, or for damages resulting from the use of any information, apparatus, method or process disclosed in this publication.

Names of commercial products, their manufacturers, or their suppliers in the publications shall not imply or constitute endorsement or disapproval of the products by the Nuclear Research Centre - Negev or by the Israel Atomic Energy Commission.

הודעה משפטית

פרסום זה נתון ללא עליון הקריה למחקר גרעיני - מרכז הוועדה למחקר אטומי של ישראל. הוועדה למחקר אטומי של ישראל, או גופים או מוסדות אחרים אשר פועלים בשמה או בשם של הוועדה למחקר אטומי של ישראל או בשם

אחד מהמוסדות או גופים אחרים או שירות כלשהו, לא יטול אחריות, ליתר, לשלמות ולדיוק של המידע המובא בפרסום זה או לכך שהמידע בכל מידע, מכשיר, שיטה או תהליך הודון בפרסום זה לא יגרום פגיעה בשירות של אחרים.

אנו מקבלים על עצמנו כל האחריות בענין שימוש או בקי המידע בכל מידע, מכשיר, שיטה או תהליך הודון בפרסום זה.

שמות של מוצרים מסוימים של יצרנים או של מייצרים אחרים או את שמות אלה המופיעים עליון הקריה למחקר גרעיני - מרכז הוועדה למחקר אטומי של ישראל.

This publication and more information about its subject matter may be obtained at the following address:

Scientific and Technical Information Department
Middle East Technical Centre - Negev
P. O. Box 100
at the Beer-Sheva, 84100.

ניתן לקבל את הפרטים והודעות בנושא זה באמצעות כתובת הבאה:

מחלקת מידע מדעי וטכני
מרכז המידע המזרחי - נגב
דואר 100
בירושלים 84100

כשל של צינור אינקונל 600 מרותך, במעגל הקירור של כור גרעיני

ש' אדס, ב' הרמו, ג' כהן, א' רבינוביץ, ע' שטרן

טבת תשמ"ג - דצמבר 1982

תקציר

בצינורות הכניסה והיציאה של מחליפי החום שבמעגל הקירור הראשוני של הכור הגרעיני בקמ"ג נתגלו סדקים. בעקבות זאת בוצעו בדיקות אל-הרסניות של הצנרת שכללו בדיקות אולטראסוניות, בדיקות עם נוזל חורר ורדיוגרפיה. לאחר החלפת קטע הצינור עם הכשל בוצעו עליו בדיקות מכניות. אזורי הסדקים נבדקו במיקרוסקופ אור ובמיקרוסקופ אלקטרוני סורק וכן נעשתה עליהם אנליזה כימית. המסקנה היא שהסדק התפתח לפי מנגנון של קורוזיית מאמצים עם תרומה מסויימת של התעיפות. ניתנות המלצות למניעת ההישנות של כשל דומה.

FAILURE OF WELDED INCONEL-600 PIPE IN THE COOLING SYSTEMS
OF A NUCLEAR REACTOR

Shimon ADDESS, Benyamin HERRMANN, Gabriel COHEN,
Elsa RABINOVITZ, and Adin STERN

December 1982

ABSTRACT

Serious leaks were detected in the inlet and outlet pipes of the heat exchangers in the primary cooling loop of the nuclear reactor in the NRCN. Non-destructive tests were conducted which included: ultrasonic testing, tests with dye penetrants and radiography. The flawed part was replaced and mechanical tests were performed on it. The crack areas of the Inconel-600 tube were examined using optical and scanning electron microscopy. Chemical analysis of both cracked and intact tubes were carried out. It is concluded that stress-corrosion cracking is the main mode of failure, while minor evidence of fatigue was encountered as well. Measures for the prevention of similar failure in the future are suggested.

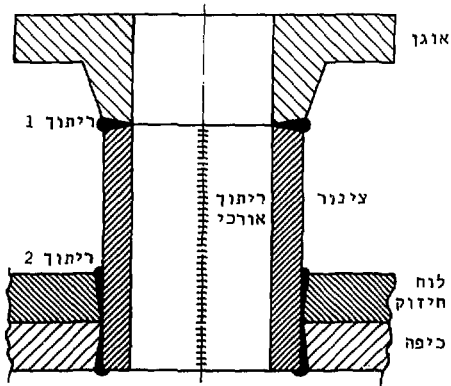
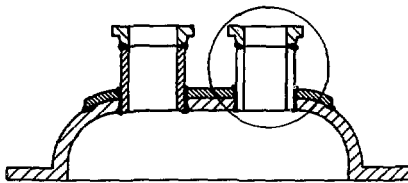
עמודתוכן העניינים

1	מבוא	1
2	סקר ספרות	2
5	תוצאות הבדיקות האל-הרסניות	3
9	תוצאות הבדיקות ההרסניות	4
10	תוצאות הבדיקות המכניות	4.1
10	מתיחה	4.1.1
11	התנגדות לכפיפה	4.1.2
12	קשיות	4.1.3
13	בדיקות מיבנה	4.2
18	פרקטוגרפיה	4.3
25	מטלוגרפיה SEM	4.4
30	אנליזה כימית	4.5
30	דיון	5
32	סיכום והמלצות	6
33	הבעת תודה	
34	סימוכין	

1 מבוא

במהלך כריקה של צנרת מחליפי החום במעגל הקירור הראשוני של הכור התגלתה דליפה של מיט כברים, המשמשים לקירור הכור. הדליפה אותרה בקירבת הכיפה של מחליף חום אחד. בעקבות זאת נבדקו הכיפות של מחליפי החום האחרים, כרי לעמוד על מידת הנזקים הקיימים בצנרת.

למחליפי החום כיפות זהות העשויות מאינקונל 600 (ציור 1). כל כיפה כוללת לוח חיזוק המרוחק אליה באיזור החיבור של צינורות הכניסה והיציאה. כל צינור כולל ריתוך אורכי, ריתוך היקפי לאוגן (ריתוך 1) וריתוך היקפי לכיפה (ריתוך 2).



ציור 1 כיפת אינקונל של מחליף החום.

2 סקר ספרות

מרבית ניסויי העמידות של נתך אינקונול 600 כוצעו במים נטולי מינרלים, תוך פיקוח על הריכוז של אי-ניקיונות שונים, בטמפרטורה הקרובה ל- 300°C . תנאים אלה מתאימים לנחוני העבודה של כורי כוח, שבהם משמש האינקונול כחומר בנייה מקובל^(1,2).

העמידות הכימית של הנתך, כתנאי עבודה אלה, היא טובה מאוד⁽³⁾ וכל מיקרי הכשל של צנרת אינקונול בכורי כוח יורסו לקרוזיית מאמצים⁽⁴⁾. כל מיקרי הכשל, שדווחו בספרות, מתייחסים לעבודה בטמפרטורה של 300°C בקירוב, ולגבי כשל בטמפרטורות נמוכות לא נמצאו דיווחים.

תנאי הכרחי להפתחות של סדק במנגנון של קרוזיית מאמצים הוא קיום של סביבה קרוזיבית ושל מאמצי מתחה קבועים או מחזוריים. הגורמים המשפיעים על הרגישות כוללים את גורל מאמץ המתחה (או נחוני הגל במאמץ מחזורי), המבנה המטלורגי של הנתך, הרכב הסביבה ותנאי השימוש.

מאמצי המתחה, ההברזיים לקיום של קרוזיית המאמצים, יכולים להיות חיצוניים או פנימיים. המאמצים החיצוניים תלויים כתנאי העבודה, כרתימה של המערכת ובמבנה הגיאומטרי שלה. המאמצים הפנימיים נוצרים בשלכ היצור, ומקורם, בדרך-כלל, בתהליכים המלווים בשינויי טמפרטורה, כגון ריתוכים או טיפולים תרמיים. כאשר יש אפשרות של ויברציות, קיים גם סיכון של התפתחות סדק התעלפות או קרוזיית התעלפות.

בניסויים נמצא שקיימת תלות חזקה של הרגישות במאמץ המופעל⁽⁵⁾ ולא אותה נטייה לקבלת ערך סף שמתחתיו לא מתרחשת קרוזיית מאמצים באינקונול⁽⁶⁾.

ההשפעה של המבנה המטלורגי של הנתך על קרוזיית המאמצים היא חזקה, והניסויים מורים על תלות חריפה של הרגישות בהיסטוריה התרמית, ועל שיפור העמידות כעקבות טיפולים הגורמים להתבדלות קרבידים⁽⁶⁺¹¹⁾.

בגלל אופי ההתקפה נראה שיש חשיבות למצב בגבולות הכינגרעיניים ובקירבתם. אין תמימות דעים בקשר לגורמים המשפיעים, וקיימות הצעות שונות להסברת המימצאים הניסויים. הטיפול התרמי שמגדיל את רגישות הפלכ"ם האוסטניטי לקרוזיה בינגרעינית

משפר, בדרך-כלל, את עמידות האינקונל בפני קורוזיית מאמצים מסוג זה^(7,12). טיפול תרמי מסוג זה מגדיל את כמות המתברלים, המכילים בעיקר קרבידים של כרום, בגבולות הגרעינים, וגורם להקטנת ריכוז הכרום בקירבת הגבולות.

מאחר שהאמצעים, שמטרתם למנוע את ההתבדלות של קרבידי הכרום לגבולות (טיפול המסה, הוספת מייצבי קרבידים או הקטנת ריכוז הפחמן), אינם מקטינים את רגישות האינקונל לקורוזיית מאמצים, לא נראה שהתהליך נגרם על-ידי הימצאות אזורים עניים בכרום בקירבת הגבולות. השיפור בעמידות של האינקונל שמכיל מתבדלים של קרביד הכרום, מוסבר על-ידי כך שקרכירים אלה מפריעים לקיום התלקה של מישורים אטומיים⁽⁸⁾.

טיפול תרמי שגורם להתבדלות קרבידים מעלה גם את ריכוז הזרחן בגבולות הגרעינים⁽⁹⁾ וייתכן שזה קשור לשיפור העמידות של האינקונל שעבר טיפול כזה. ההשפעה של ריכוז הזרחן בנתך לא נבדקה, אך ירוע שהגדלת ריכוז הזרחן מקילה על התבדלות קרבידים של כרום בגבולות הגרעינים⁽⁷⁾, בדומה למצב בנחכים של פלבי"ם אוסטיטי.

ההסבר המקובל לקיום הרגישות של אינקונל לסדיקה בינגרעינית, במגנון של קורוזיית מאמצים, מבוסס על המסה סלקטיבית של תרכובות גופרית שעברו סגרגציה לגבולות הגרעינים⁽⁶⁾. תרכובות אלה עלולות ליצור סביבה "עוינת" במקומות שבהם אין חילוף של מים וכך לגרום לאיכול הגבולות של הגרעינים. מסקנה זו מבוססת גם על העובדה שעל פיאות הגרעינים, כפני השבר, קיימות תרכובות גופרית, בעוד שפני הדגם האחרים נקיים מתרכובות כאלה⁽⁶⁾.

בדרך-כלל מקובל להניח שבנחכי פלבי"ם אוסטיטיים הרגישות לקורוזיית מאמצים עולה עם העלייה בגודל הגרעינים. לגבי האינקונל אין מסקנות חד-משמעיות לגבי ההשפעה של גודל הגרעינים על הרגישות לקורוזיית מאמצים⁽¹²⁾, אך תיחך תלות עקיפה, מאחר שההליכים הגורמים לגודל גרעינים שונה משפיעים גם על פיזור המתבדלים ואופיים⁽⁷⁾.

כגלל תנאי העבודה שבהם משמש האינקונל בוצעו ניסויי העמידות במים נקיים^(3,7,12,13), תוך בדיקת ההשפעות של אי-ניקיונות שונים. מאחר שבשימוש מעשי ייתכנו מכגנונים של ריכוז מרכיבים שונים במקומות מוגדרים, בוצעו גם ניסויים בחמיסות ובעיקר כאלו של

NaOH (סימוכין 5,9). כמו-כן בוצעו ניסויים בתמיסות חומציות⁽¹³⁾, ובתמיסות שהכילו כלורידים^(6,13). הסק שמתפתח במנגנון של קורוזיית מאמצים הוא בינגרעיני⁽⁷⁾, פרט למיקרה שבו המים מכילים עופרה, שגורמת לשבר תוך-גרעיני⁽³⁾.

על-סמך הניסויים שבוצעו מתברר שהגורם העיקרי, מבחינת הרכב הסביבה, המגדיל את הרגישות לקורוזיית מאמצים, הוא נוכחות תמצן במים^(3,12). כאשר יש תמצן במים יש גם עלייה בריכוז הכרום השש-ערכי בתמיסה במשך הניסוי^(8,12). ההשפעה של כרום שש-ערכי במים על קורוזיה בינגרעינית נבדקה בסביבה חומצית⁽¹³⁾, ונמצא שהרגישות של אינקובל 600, כתנאים אלה, היא גדולה, בהשוואה לזו של פל"ם אוסטיני. נוכחות כלוריד במים, בשיעור של 1 g/l, גרמה לקורוזיית מאמצים של אינקובל 600, במסלול בינגרעיני, כאשר כתנאים זהים ובהעדר הכלוריד לא אותרה רגישות לתופעה זו⁽⁶⁾.

הטמפרטורה משפיעה על הרגישות לקורוזיית מאמצים⁽¹³⁾, ועלייה של 50°C (מ-290°C ל-340°C) מקצרת את הזמן עד לכשל, פי חמישה⁽⁸⁾. האקסטרופולציה לטמפרטורות נמוכות יותר אפשרית רק במידה שאין שינויים מטלורגיים בנתך שווה תקופות ארוכות בטמפרטורה הגבוהה של הניסוי. בכריקות שבוצעו במשך 10,000 שעות, בטמפרטורה של 300°C, לא אותרו, באמצעות מיקרוסקופ אלקטרוני חודר, שינויים משמעותיים בנתך⁽¹⁴⁾, אם כי המחברים לא מוציאים מכלל אפשרות השפעות עקיפות.

הרגישות של נתך אינקובל 600 לקורוזיית מאמצים היא נמוכה יחסית, והקריטריון לעמידות היה, ברוב המיקרים, הימצאות סדקים או היעדרם. בחהליכים של קורוזיית מאמצים יכולים לעבור פרקי זמן ארוכים יחסית עד לנוקליאציה של סדק, וגם מהירות ההתקדמות שלו, בשלבים הראשונים, יכולה להיות איטית ביותר. לכן, העובדה שבניסוי קצר לא אותרו סדקים אינה מבטיחה שבפרק זמן ארוך יותר הם לא יהפחחו. במיקרה אחד מדווח על סדק שהתפתח כעבור 14,000 שעות, כתנאים שבניסויים קצרים יותר לא נחשבו לתוקפניים⁽⁷⁾.

משך הניסויים במרבית הבדיקות המעבדתיות היה בסדר גודל של אלפי שעות, והם שימשו לבדיקה פרמטרים רבים של הנתך, הסביבה והתנאים. אין דעה אחידה בקשר לכל הגורמים המשפיעים, אך מקובלת ההנחה שהעלאת הטמפרטורה ונוכחות תמצן מגדילים את הרגישות וכן שקיימת השפעה רכה של תנאים מטלורגיים (הרכב הנתך, ההיסטוריה התרמית והעיבור המכני).

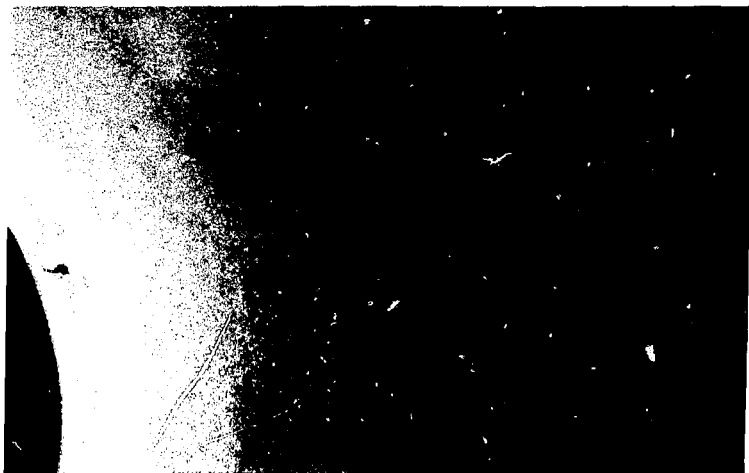
תופעת הכשל, שמרובר בה כאן, החרחשה בתנאים שונים מאלה המצוטטים בספרות. בהשוואת התנאים נראה שקיימים גורמים שהשפעתם הפוכה. טמפרטורה נמוכה מקטינה את הרגישות ונוכחות החמצן מגרילה אותה. סכיר להנחת שתנאי העבודה הקיימים גורמים לרגישות נמוכה יותר לקורוזיית מאמצים מאשר בכורי כוח. יחר עם זאת, יש לזכור ששימוש ממושך יכול לאפשר נוקליאציה של סרק למרות הרגישות הנמוכה.

3 תוצאות הבדיקות האל-הרסניות

בציור 2 מובא צילום של הכיפה של מחליף החום בזמן הבדיקות. שלוש הכיפות של מחליפי החום עברו, עם פירוקן, סידרת בדיקות אל-הרסניות. הסידרה כללה בדיקה חזותית מבפנים ומבחוץ, בדיקה על-ירי "נוזל חודר", מבפנים כלפי חוץ, בדיקה אולטראסונית ורדיוגרפיה כקבני-x. שיטות הבדיקה השונות משלימות האחת את השנייה וטיכום התוצאות מובא בטבלה 1 עבור שני מחליפי חום (באור לא נמצאו תופעות חריגות). רוגמות אופייניות של סדקים שהובלטו על-ירי "נוזל חודר" מובאות בציורים 3 ו-4 ורדיוגרמות שלהם ניתנות בציור 5.



ציור 2 הכיפה של מחליף החום בזמן הבדיקות האל-הרסניות.



ציור 3 סדיקה היקפית בריתוך 1 וסדיקה אורכית בריתוך 2 של צינור יציאה של מחליף החום.



(ב)

(א)

ציור 4 סדיקה היקפית בריתוך 1 של צינור יציאה של מחליף החום.

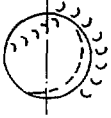
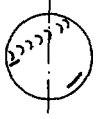
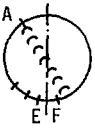
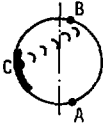
(א) הצד הפנימי של הצינור;

(ב) הצד החיצוני של הצינור.



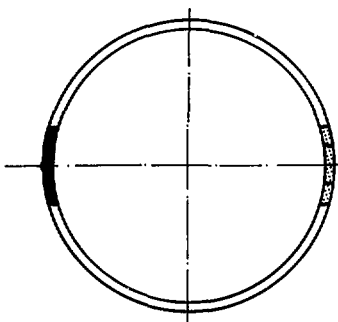
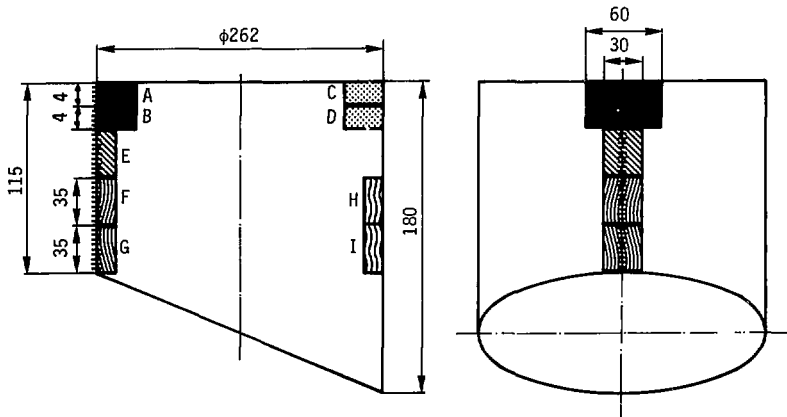
ציוד 5 צילומי רדיוגרפיה בקרני-x של ריתוך 1 של צינור יציאה של מחליף החום (החיצים מורים על הסדקים ההיקמיים).

טבלה 1 סיכום הממצאים של הבדיקות האל-הרסניות בשני מחלפי חום. במחליף חום שלישי לא נמצאו תופעות חריגות כלשהן.

מחליף חום II		מחליף חום I	
יציאה	כניסה	יציאה	כניסה
קיים סדק היקפי, מקביל לריתוך 1, במרחק של 15 ± 25 mm ממנו, בצד הפונה אל	קיימים שישה סדקים אורכיים באיזור של ריתוך 2. הסדקים נמצאים במרחקים שווים, בקירוב, האחד מהשני. ארבעה מהסדקים חוררים דרך הדופן. 5 mm הוא האורך של אחד מהם (A). שני הסדקים הנוספים (E,F) שאורכם, בצד הפנימי 20 mm, לא חודרים דרך הדופן והשני (B) אינו חודר. קיים סדק היקפי (C), שאורכו 180 mm, במקביל לריתוך 2.	 <p>קיים סדק היקפי מקביל לריתוך 1 (ציור 1), במרחק שלא עולה על 15 mm, בצד הפונה אל הכיפה. הסדק חודר דרך הדופן ואורכו 310 mm בצד הפנימי, ו-5 mm בצד החיצוני. קיים סדק, באורך של 20 mm, באיזור של ריתוך 2. התחלה הסדק היא בין הכיפה לבין לוח החיזוק.</p> 	 

4 תוצאות הבדיקות ההרסניות

הבדיקות בוצעו בקטע צינור שוחרף בגלל הסדקים החדרים. מאחר שהיה צורך לשמור על שלמות הכיפה ולהחליף רק את הצינור, לא היתה אפשרות להוציא לבדיקה את הקטעים שכללו את הסדקים בקירבת ריתוך 2 (ציור 1). הבדיקות מחייחסות לקטע מצינור היציאה של מחליף החום אשר תרשים שלו ניתן בציור 6.



- ד ג מ י כ פ ל פ ה
- A; B - עם ריתוך
 - C; D - בלי ריתוך
- ד ג מ ל מ ט ל ו ג ר פ ל ה
- E
- ד ג מ י מ ת ל ח ה
- F; G נחתכים לשלושה חלקים במקביל לציר הריתוך
 - H; I באיזור רחוק מהריתוך

ציור 6 תרשים של צינור יציאה של מחליף החום והדגמים שנלקחו לבדיקות (המידות ב-mm).

4.1 תוצאות הבדיקות המכניות

התכונות המכניות שנבדקו כללו: חוזק מתיחה וכניעה, התנגדות לכפיפה וקשיות. הבדיקות בוצעו על דגמיט שהוכנו מאיזור הריתוך האורכי, שבסביבתו לא אותרה כל פגיעה וכן מאיזור ללא ריתוך, שגם בו לא נתגלו סדקים. תוצאות אלה הושוו לנתונים המתאימים המופיעים בספרות, וזאת על-מנת לוודא שתכונות חומר המוצא אינן נופלות ברמתן מהמקובל לגבי אינקובל 600.

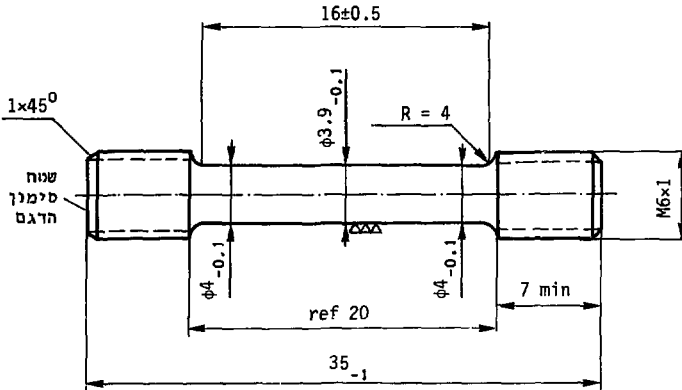
4.1.1 מתיחה

דגמי המתיחה נלקחו מאזורים המסומנים באותיות I, H, G, F בציר 6. הדגמים שנלקחו מאזורים F; G מכילים את הריתוך האורכי ואילו הדגמים שנלקחו מאזורים I, H אמורים לייצג את התכונות של חומר המוצא שלא הושפע מריתוך. ניסויי המתיחה בוצעו בדגם עגול שיוצר על-פי תקן מס' E-8 של ASTM (סימור 15). שרטוט סכימתי של הרגם מופיע בציר 7. מחיחת הדגמים בוצעה במכונת מתיחה סטנדרטית מתוצרת Instron והתוצאות מופיעות בטבלה 2.

טבלה 2 סיכום התוצאות של ניסויי המתיחה.

הדגם	מאמץ הכניעה 0.2% (kg/mm ²)	חוזק המתיחה (kg/mm ²)	ההתארכות (%)	מאמץ השבר (kg/mm ²)
ללא ריתוך	28.5	65.3	33.5	50.2
ללא ריתוך	25.4	61.1	34.7	45.1
עם ריתוך	46.5	66.1	28.7	--
עם ריתוך	34.3	63.6	33.0	--

רכיבים אופייניים המופיעים בספרות⁽¹⁶⁾ עבור חוזק כניעה הם 25.3 kg/mm² ועבור חוזק מתיחה הם 63.3 kg/mm².



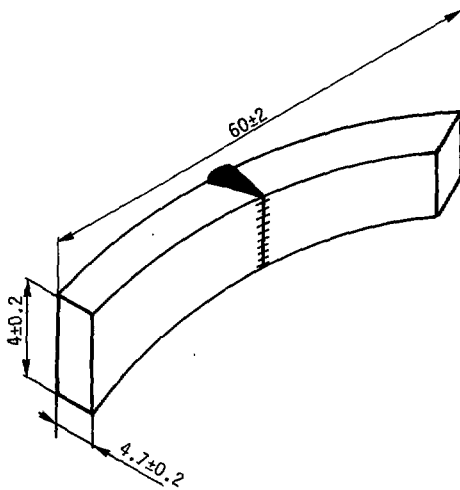
ציור 7 דגם המתיחה לפי ASTM-E-8.

4.1.2 התנגדות לכפיפה

דגמי הכפיפה בלקחו מאזורים המסומנים A, B, C, D, בציור 6. שרטוט סכימתי של הדגם מופיע בציור 8. הדגמים מאזורים A, B מכילים ריתוך בעוד שהדגמים מאזורים C, D לקוחים מאיזור שלא עבר ריתוך. תוצאות הבדיקות מופיעות בטבלה 3 ומהן נראה שהריתוך לא השפיע לרעה על גשיכות החומר.

טבלה 3 תוצאות ניסויי הכפיפה.

השקיעה (mm)	החוזק בכפיפה (kg/mm ²)	הדגם
5.5	30.7	עם ריתוך
8.4	32.0	עם ריתוך
7.2	25.7	ללא ריתוך
8.0	45.7	ללא ריתוך

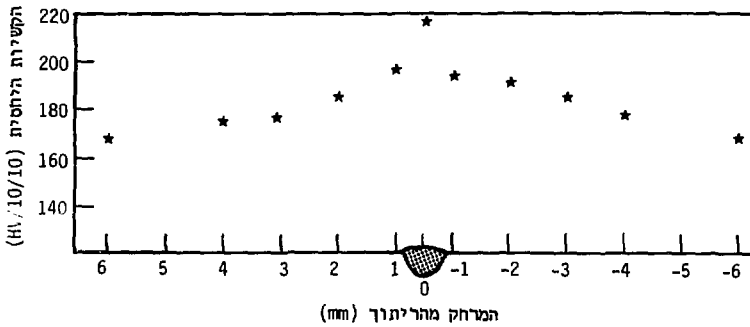


ציור 8

דגם הכפיה (המידות במ"מ).

4.1.3 קשיות

כדיקת הקשיות נערכה לפי שיטת Vickers בחלק המכיל אח איזור הריתוך האורכי. פילוג התוצאות בהתאם למרחק ממרכז הריתוך מופיע בציור 9. תוצאות הקשיות המתקבלות באיזור שאיננו מושפע מהריתוך אופייניות לאינקונל 600⁽¹⁶⁾, והעלייה בקשיות אופיינית לאיזור של ריתוך.



ציור 9 התלות של הקשיות במרחק ממרכז הריתוך (0 - מרכז הריתוך).

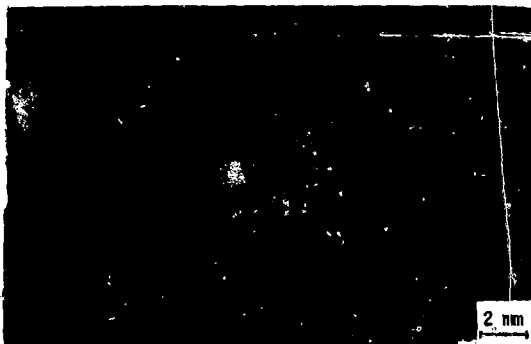
4.2 בדיקות מיבנה

בדיקות מיבנה נערכו בשלושה סוגי דגמים. האחד כלל חלק מהריתוך האורכי, שבו לא נחגלה כשל, השני כלל דגמי כפיפה לאחד הניסויים והשלישי כלל חלק מהריתוך ההיקפי (ריתוך 1) שליידו אותרו הסדקים.

בציר 10 נראה מאקרומיבנה של איזור המכיל את הריתוך האורכי שבו לא אותרו סדקים (בלקח מאיזור E), ובציר 11 נראה דגם עם ריתוך אורכי לאחר ניסוי הכפיפה.

ציר 10

חתך מאוכל של איזור
המכיל את הריתוך האורכי
(x7.5).



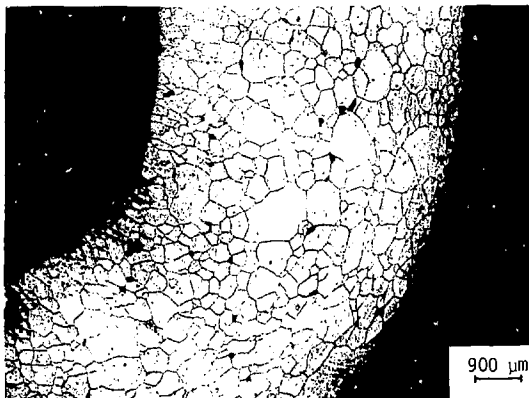
צילור 11 דגם כפיפה מאיזור המכיל ריתוך אורכי, לאחר הניסוי.

בצילור 12 מתואר מיקרומיבנה של דגם כפיפה המכיל ריתוך אורכי, לאחר הניסוי.
הצילום מתאר את איזור הריתוך.

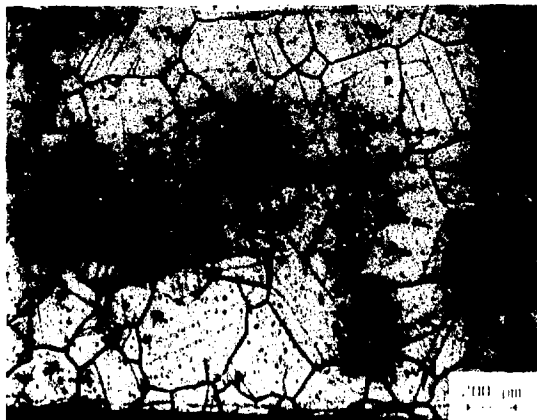


צילור 12 הריתוך האורכי בדגם כפיפה, לאחר הניסוי.

בציורים 13, 14 מתואר רגם ללא ריתוך, לאחר ניסוי כפיפה. ציור 13 מתאר את מרכז הדגם, שבו היתה הרפורמציה המרבית, וציור 14 מתאר איזור רחוק ממרכז הדגם, שבו הרפורמציה היתה מזערית.

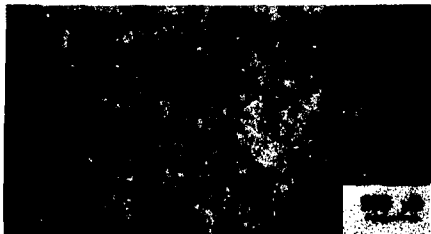


ציור 13 המרכז של דגם כפיפה ללא ריתוך, לאחר הניסוי.



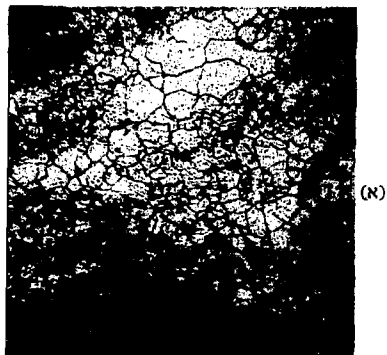
ציור 14 איזור מרוחק מהמרכז של דגם כפיפה ללא ריתוך, לאחר הניסוי.

בציור 15 מתואר חתך מלוטש של הצינור, שכולל את הסדק. בציור 16 נראה תרשים של הדגם המכיל את איזור הסדק ואת הריתוך ההיקפי (ריתוך 1). תמונות המיקרומיבנה מאפיינות אזורים שונים בדגם, כמפורט בתרשים.



ציור 15

חתך אורכי של הצינור המכיל את הסדק ההיקפי. הצד השמאלי הוא הצד הפנימי של הצינור.



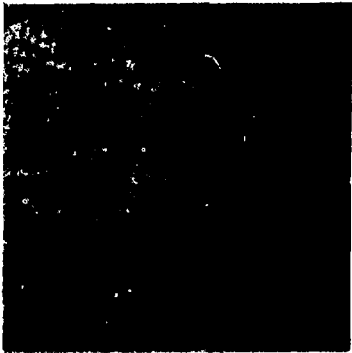
(א)

ציור 16

צילומי מיקרומיבנה באזורים שונים של הדגם שמכיל את הריתוך ההיקפי (ריתוך 1) ואת הסדק. (80x).
סכימה המאחרת את הצילומים על-גבי הדגם מובאת בעמוד הבא יחד עם הצילומים הנוותרים.



(ב)



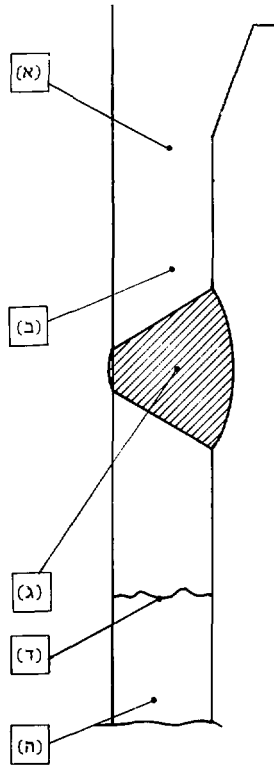
(א)



(ב)



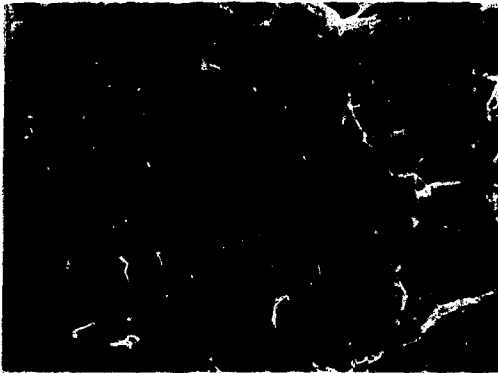
(ג)



4.3 פרקטוגרפיה

עבור הבדיקות המכניות הוכנו דגמי מתיחה מקטע צינור שהוצא מאיזור הכשל (ציור 6). דגמים אלה יוצרו כך שציר האורך שלהם מקביל לציר הצינור. מישטחי השבר של שני דגמי מתיחה כאלה נבדקו ב-SEM. דגם אחד נלקח מאיזור הרחוק מריתוך ודגם שני נלקח מאיזור הריתוך האורכי של הצינור.

בציור 17 נראים פני השבר של דגם שאינו מכיל ריתוך ובציור 18 נראים פני השבר של דגם המכיל ריתוך. בשני המיקרים היה השבר משיך.

ציור 17

פני השבר של דגם
מתיחה מאיזור ללא
ריתוך ($\times 1000$).

ציור 18

פני השבר של דגם
מתיחה מאיזור
הריתוך האורכי
($\times 1000$).

פני השבר של הסדק שנוצר בצינור האינקובל נבדקו ב-SEM ונמצא שהשבר הוא ביגריעיבי (ציור 19). גודל הגריעינים הוא כ-0.4 mm ופני השבר מכילים גם אלומיניום, כפי שנמצא בבדיקת EDAX. הדגם, שכלל סדק אשר חדר כמעט בכל החתך, הופרד במכשיר Instron בכוח של כ-60 kg, כאשר שטח החתך הכללי היה כ-1 cm².



(א)



(ב)

ציור 19 פני השבר של צינור האינקובל.

(א) הגדלה $\times 50$;

(ב) הגדלה $\times 200$.

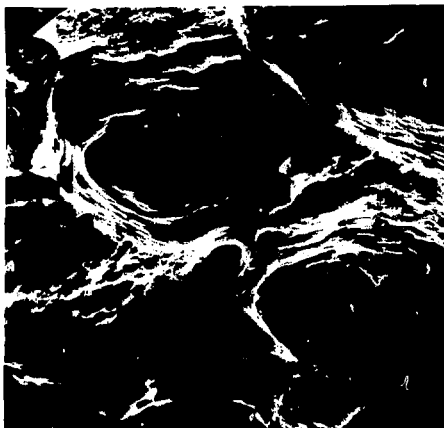
באזורים קטנים של שטח השבר הבינגרעיני נראים "איים" של שבר משיך שהתרחש בזמן ההפרדה של שני חלקי הדגם (ציור 20).



ציור 20

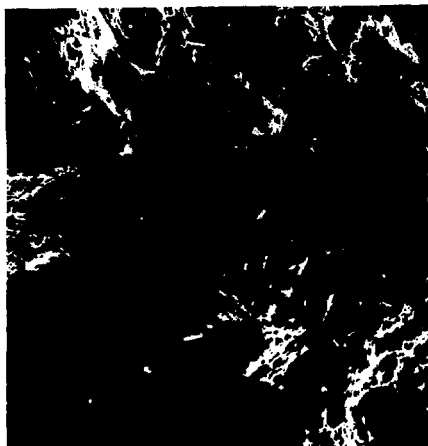
איזור משיך שנקרע בזמן
ההפרדה של שני חלקי הדגם
(x1000).

דגם שני, אשר הסדק המקורי חדר למחצית משטח החתך שלו, הופרד במכשיר Instron. פני השטח של השבר המכני דומים לאלה שהתקבלו בדגמי המתיחה (ציור 21). פני השבר הבינגרעיני של הסדק המקורי דומים לאלה שהתקבלו בדגם קק:ס, וניתן לראות גם את תמעבד בין שני סוגי השבר, המכני והמקורי (ציור 22).



ציור 21

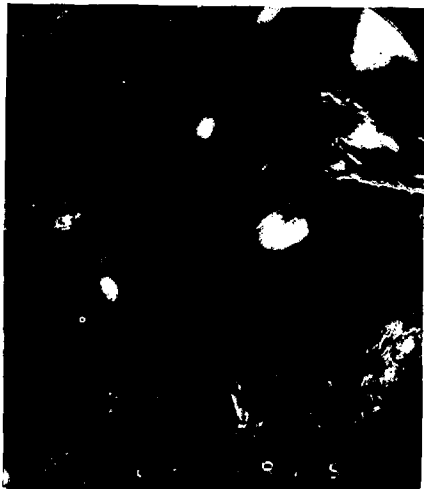
שטח הפנים של השבר
המכני (300X)



ציור 22

שטח הפנ במעבר בין
הסדק המקורי לשבר
המכני (150X).

על חלק מפיאות הגרעינים של פני השבר קיימות שכבות של מוצקים העשיריט באלומיניום (בבריקות EDAX נמצאו ריכוזים של עד 8 w/o). שכבות אלה נראו רציפות, בחלק מהמיקרים (ציור 23), ובמיקרים אחרים נראו השכבות סדוקות (ציור 24).



(א)



(ב)

ציור 23

פני השבר של הסדק המקורי
שחלקם מכוסים בשכבות
רציפות.

(א) פיאות גרעינים

; (x240)

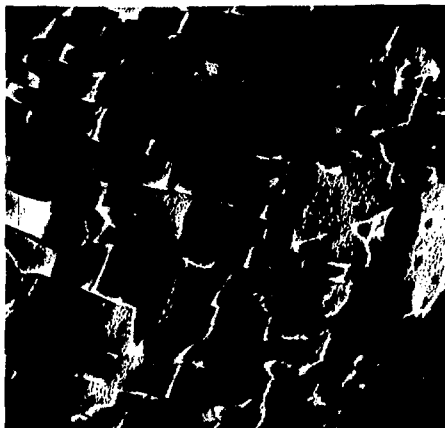
(ב) שכבת מוצרים על פאה

גרעין, בחלק הימני

של ציור (א) (x2000).



(א)



(ב)

ציור 24

פני השבר של הסדק
המקורי, שחלקם מכוסים
בשכבות סרוקות.

(א) פיאזת הגרעינים
; (×100)

(ב) שכבה מוצרים על
פאת גדעון, המסומן

בציור (א)

. (×500)

ניתן להבחין באיכול מקומי של פיאות הגרעינים. בציור 25 מתוארים חורים שצורתם מתאימה לאיכול נקודתי של פאת גביש יחיד בכיוון קריסטלוגרפי מוגדר. באיזור אחד על-פני השבר נמצא שפני השטח אופייניים להתפתחות של שבר התעיפות (ציור 26).



ציור 25

חורים בעלי צורה גיאומטרית מוגדרת בפאת גרעין ($\times 1000$).



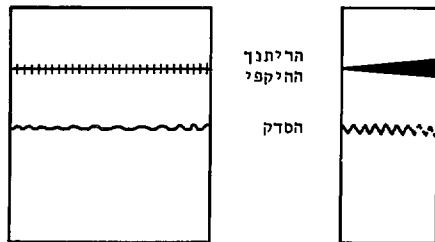
ציור 26

איזור אופייני לשבר התעיפות בפני השטח של הסדק המקורי ($\times 3000$).

4.4 מטלוגרפיית SEM

מקטע של צינור היציאה של מחליף החום שהוחלף בגלל הסדק, נחתך דגם אשר כלל קטע מהריתוך ההיקפי ומהסדק שהתפחח במקביל אליו. הסדק עובר לכל רוחב הדגם, מצידו הפנימי של הצינור, וחודר במספר מקומות גם לצידו החיצוני.

שני מישטחים של הדגם לוטשו, אוכלו ונבדקו ב-SEM. מישטח אחד כלל את השטח הפנימי של הצינור המקורי והמישטח השני היה במישור שכלל את ציר הצינור (ציר 27).



ציר 27 המישטחים שנבדקו ב-SEM.

הבדיקות של שני המישטחים מוכיחות בבירור את העובדה שהסדק שהתפתח הוא בינגרעיני (ציר 28). בדומה למה שנמצא בבדיקות של מישטחי השבר, אותרו גם כאן נקודות של התקפה מקומית על פיאות הגרעינים שנחשפו בזמן התפתחות הסדק. בצילומים שבציר 29 נראית "צומת" של הסדק הבינגרעיני בהגדלות שונות, כאשר בציר 29(ב) ניתן להבחין בפאת הגרעין שהותקפה בצורה חריפה ובפיאות אחרות שעליהן קיימת התקפה נקודתית.



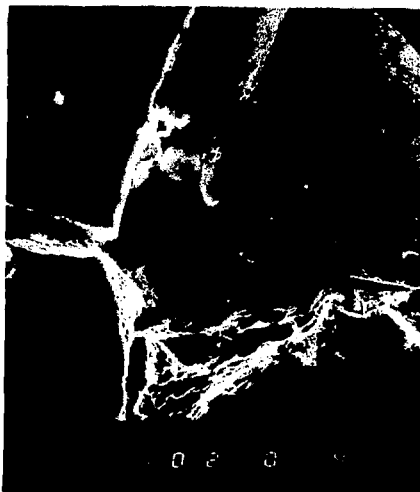
צילור 28

חתך מלוטש של הדגם
עם הסדק, במישטח (א)
. (x50)



צילור 29

"צומת" של הסדק בחתך
מלוטש במישטח (א).
(א) הגדלה x300;



ציור 29 (המשך) (ב) פגיעות נקודתיות ואיכול בפירות הגרעיניים של מישטח השכר ($\times 1000$).

במספר מיקרים (למשל בציור 30) אותרו בגבולות הבינגרעיניים חלקיקים העשירים בכרום. בבדיקות EDAX נמצאו עבור שניים מהם ההרכבים הניתנים בטבלה 4 ועבור שלישי נמצא הרכב דומה (בגלל מספר מניות קטן התוצאה היא איכותית כלכד).

טבלה 4 הרכב של החלקיקים העשירים בכרום שבגבולות הגרעיניים.

הרכיב w/o-								החלקיק
Ni	Cr	Fe	Si	Ti	Al	Cl	S	
26.0	44.6	19.0	0.9	0.3	2.9	3.9	2.2	1
31.4	52.6	5.9	0.9	0.8	2.2	3.4	2.9	2

על-סמך הבדיקות נראה שבגבולות הגרעיניים קיימים מתבדלים של כרום, הקשורים בנראה לגופריח ו/או לפחמן.

עובדות נוספות שיש לשים אליהן לב הן החלוקה החצויה בציר 30 (שנשבר בחמשך לשבר שחתפה בגבולות הבינגרעיניים) והשכבות הדקות הממלאות את הסדק.



(א)

ציר 30

מתבדל בסדק הבינגרעיני
 בחתך מלוטש במישטח (א).
 (א) הגדלה $\times 1000$;
 (ב) הגדלה $\times 2400$.



(ב)

בבדיקות שכוצעו כאזורים שונים של הדגם נמצאו גרעינים בגדלים שונים. כציור 31(א) מתואר איזור הגבול בין הריתוך לבין הצינור, בצד הקרוב לכיפה, וכציור 31(ב) מתואר הגבול בצד הקרוב לאוגן. מצילומים אלה ברור שקיים הכדל משמעותי בגודל הגרעינים משני צידי הריתוך, כאשר בצד שפונה לעבר הכיפה הגרעינים גדולים בהרבה מאלה שבצד הפונה לאוגן.



(א)



(ב)

ציור 31

המיכנה בקירבת איזור

הריתוך (x50).

(א) הצד הפונה אל האוגן;

(ב) הצד הפונה אל הכיפה.

בבדיקות EDAX נמצא שהרכב האיזור של גבולות הגרעינים, בצד שפונה אל האוגן, עשיר בכרום, יחסית להרכב המתכת. באיזור זה כל הגבולות עשירים בכרום, ברציפות. לעומת-זאת, בצד השני קיימים במקומות מסויימים בגבולות הגרעינים חלקיקים בודדים, גדולים יחסית, עשירים בכרום.

על-סמך תוצאות אלה נראה שמקור ההבדלים בגודל הגרעינים ובאופי הגבולות יכול להיות קצב שונה של סילוק החום הרב בשלב הריחוך.

4.5 אנליזה כימית

באנליזות כימיות נמצא שהרכב הנתך באיזור הריחוך ההיקפי (ריחוך 1) מתאים להגדרת היצרן (16).

תוצאות האנליזה הכימית ומיפרט היצרן ביתגים בטבלה 5.

טבלה 5 הרכב האינקונל.

ריכוז היסוד ב-w/o							המקור
Ni	Cr	Fe	Mn	Si	Cu	C	
>72.0	14±17	6±10	<1	<0.5	0.5	<0.08	מיפרט היצרן
74.6	14.5	5.9	0.18	0.20	0.015	0.08	בקירבת הסדק
76.5	14.8	6.3	0.20	0.22	0.009	0.08	רחוק מהסדק

5 דיון

השוואת התוצאות של הבדיקות הכימיות והמכניות, לאלו המופיעות בספרות מראה על דימיון רב ביניהן ומובילה למסקנה כי חומר הגלם ששימש לייצור מחליפי החום היה בעל תכונות האופייניות לנתך אינקונל 600. בדיקת האזורים שלא נכשלו מעידה על חומר בעל משיכות גבוהה. דבר זה ניכר הן מתוצאות ניסויי המתיחה והן מהתבוננות במיקרומיבנה של דגמי הכפיפה, לאחר חניסויים. עדות למעוות המביא לתחילת היווצרותם של סדקים ניתן לגלות

רק בציור 13, ואף זאת רק באוחס אזורים של הדגם אשר עברו מעוות אינטנסיבי כתוצאה מניסויי הכפיפה. עקבות נזקים אלה נעלמים ככל שמתרחקים ממרכז הדגם והם אינם נראים כלל בציור 14.

מהתכונות במטלוגרפיות השונות ניתן ללמוד שני דברים עיקריים:

- (א) הסדק התפתח במסלול כינגרעיני, כפי שניתן לראות בביורר, למשל בציורים 19, 28; (ב) הסדק התפתח מפניה הצינור כלפי חוץ, כפי שניתן לראות בביורר בציור 15. בנתכי אינקונל אופייני שכר בינגרעיני לכשל הנגרם במנגנון של קורוזיית מאמצים. תנאי הכרחי להתפתחות סדק במנגנון כזה הוא קיום הן של מאמץ מתיחה והן של סביבה תוקפנית. קיום מאמצים שיוריים מסביר את ההתפתחות של הסדקים האורכיים באיזור החיבור של הצינור לכיפה (ריחוך 2 בציור 1). הריחוך של הצינור לכיפה משאיר מאמצי מתיחה היקפיים בצינור. הסדקים באיזור זה היו אורכיים והם מחולקים בצורה שווה על-פני ההיקף. סדקים אלה לא נבדקו, מאחר שהם הורחקו כשיבוב בזמן התיקון.

הסקירות שמאמץ פנימי שנוצר כשלב הריחוך הוא שגרם לסדק ההיקפי שנברק במסגרת עבודה זו, היא נמוכה. סביר להניח שמאמץ המתיחה במקום זה נובע מעומס חיצוני שמקורו בשילוב של גיאומטריית המערכת, צורת הרתימה ומשטר הזמפרטורות. בבדיקות שבוצעו נמצאו הבדלים משמעותיים במיבנה האינקונל משני צידי הריחוך ההיקפי (ריחוך 1 בציור 1). הבדלים אלה, המחבטאים בגודל הגרעינים ובאופי של גבולות הגרעינים, גודמים לשינוי ברגישות הנחך לקורוזיית מאמצים ומסבירים את העובדה שכל הסדקים שאותרו נמצאים מצידו האחר של הריחוך. כמות החום הגדולה שהושקעה בריחוך ותקצב השונה של גריעת החום משני צידי התפר הם כנראה המקור להבדלים אלו. ייתכנו הבדלים גם בחכנוח הומרי המוצא ששימשו לייצור הצינור, האוגן או הכיפה.

בבדיקות של תחכים ושל מיטחי השבר התגלו שכבות דקות על פאות הגרעינים שנחשפו בסדק, וחלקיקים מוגדרים בגבולות הגרעינים. באמצעות EDAX אותרו ריכוזים משמעותיים של אלומיניום, שמקורם, כנראה, בהצטברות אלומינה, הנמצאת במים כתרחיף. כידוע, מסוגלת האלומינה לספוח כמיוח גדולות של כלורידים ולהגדיל בהרכה את הריכוז המקומי שלהם⁽¹⁷⁾. כאנליזות נקודתיות של חלקיקים הנמצאים בגבולות הגרעינים (חבלה 4)

נמצאו ריכוזים גבוהים של כלור. עובדה זו יכולה להסביר את ההתפתחות של הסדק במנגנון של קורוזיית מאמצים בינגרעינית.

בגבולות הגרעינים, באיזור הסדק, קיימים חלקיקים בודדים עשירים בכרום, ואילו בצידו השני של הריתוך כל האזורים של גבולות הגרעינים עשירים בכרום, יחסית לשאר המתכת. שוני זה, יחד עם ההבדל בגודל הגרעינים, שיכולים להיות בעלי מקור משותף, קשורים לעובדה שהסדק התפתח, בכל המיקרים, רק בצידו האחד של הריתוך ההיקפי (ריתוך I). הסדקים התפתחו בכל המיקרים בקטע הצינור בעל הגרעינים הגדולים, שבגבולותיהם קיימים מתבדלים בודדים המכילים כרום.

בחלקיקים שנמצאו באיזור הסדק אותרו ריכוזים גבוהים, יחסית, של גופרית, ועובדה זו, יחד עם נוכחות חורים, שנוצרו בהתקפה נקודתית על פיאות הגרעינים. מרמזת על המנגנון האפשרי להתפתחות הסדק. מנגנון זה קשור להתבדלות של גופרית לגבולות הגרעינים (בשילוב עם התבדלות קרבידים) וליצירת תרכובות קורוזיביות של גופרית (עד כדי חומצה גופרתית), על-ידי תגובה עם מים בחללים שהחילוץ בהם איטי.

6 סיכום והמלצות

על-סמך הממצאים ברור שהסדיקה התרחשה במנגנון של קורוזיית מאמצים. הרגישות של אינקובל 600 בתנאי העבודה השוררים היא נמוכה, ומשך הזמן עד להופעת סדק משמעותי הוא ארוך. אין אפשרות, במיקרה שלפנינו, להפריד בין זמן האינקובציה לבין הזמן הדרוש להתפתחות פעילה של הסדק.

שינוי התנאים הסביבתיים, להקטנת הרגישות לקורוזיה בינגרעינית אינו סביר, ולכן יש להשתדל להקטין את מאמצי המתיחה, ההכרחיים לקיום של קורוזיית מאמצים. המאמצים הקיימים מתחלקים למאמצים פנימיים שמקורם בשלבי היצור ומאמצים חיצוניים שמקורם בתנאי העבודה, בגיאומטריה וברטיטה של המערכת.

מניעת הממצים הפנימיים אפשרית, אך הדבר כרוך בטיפול תרמי במכלולים שלמים. על-סמך הספרות הקיימת בנושא, תלוייה הרגישות של הנתך גם כמצב המטלורגי שלו, ובו ניתן לשלוט על-ידי טיפולים תרמיים מתאימים.

מניעת מאמצים חיצוניים כרוכה בבדיקה של הגיאומטריה של המערכת ושל שיטת הרתימה של הצנרת הנלווית, להכטחת מאמצים מזעריים בזמן ההרכבה וכמשך העבודה, תוך התחשבות בהתפשטות התרמית.

גורם נוסף העלול להשפיע לרעה על עמידות בפני סדיקה הוא קיום של תנודות כמערכת וגם זה ניתן לבדיקה.

מאחר שכל טיפול משמעותי במערכת הוא מורכב ובהתחשב במשך הזמן הארוך עד להתפתחות סדקים, מומלץ לבצע בדיקות תקופתיות, בשיטות אל-הרסניות, לאיתור של סדקים ולשקול את שיטות הטיפול בהתאם לכך. כמו-כן, מומלץ לשקול דרכי פעולה אלטרנטיביות למיקרה שתקלה כזו תארע שנית.

הכנת תודה

ברצוננו להודות לאלה שעזרתם המעילה תרמה להשלמת העבודה ובמיוחד למפעילי הכור אשר עדכו לנו סיוורים רבים באיזור התקלה; לאנשי בית המלאכה אשר סייעו בהכנת הדגמים; למריוס מרקוכיץ וקבוצתו אשר בדקו את התכונות המטלורגיות והמכניות של הדגמים; וליגאל סריג שהכין את המטלורפיוח.

כמו-כן ברצוננו להודות לאורי אדמון מקמ"ג ולאביבה קרייתי מהרשות למחקר ולפיתוח של אוניברסיטת בן-גוריון, על כיצוע עבודות ה-SEM כמעבדותיהם. תודה מיוחדת למיכאל אלדן ולצוות ההוצאה לאור על עזרתם בהכנת פירסום זה.

Referencesסיכומים

1. H. R. Copson and W. E. Berry, "Qualification of Inconel for nuclear power plant application", *Corrosion* 16, 79t-85t (1960).
2. H. R. Copson and W. E. Berry, "Corrosion of Inconel nickel-chromium alloy in primary coolant of pressurized water reactors", *Corrosion* 18, 21t-26t (1962).
3. H. R. Copson and S. W. Dean, "Effect of contaminants on resistance to stress corrosion cracking of Ni-Cr alloy 600 in pressurized water", *Corrosion* 21, 1-8 (1965).
4. S. H. Bush and R. L. Dillon, "Stress corrosion in nuclear systems", in *Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys*, R. W. Staehle, J. Hochmann, R. D. McCright, and J. E. Slater, eds., Int. conf. held in Unieux-Firminy, June 12-16, 1973, NACE, Houston (1977), pp. 61-79.
5. J. R. Cels, "Caustic stress corrosion studies at 288°C (550°F) using the straining electrode technique - comparison of alloy 600, alloy 800, and type 304 stainless steel", *Corrosion* 34, 198-209 (1978).
6. J. Blanchet, H. Coriou, L. Grall, C. Mahieu, C. Otter, and G. Turluer, "Historical review of the principal research concerning the phenomena of cracking of nickel base austenitic alloys", pp. 1149-1160 in ref. 4.
7. P. V. De and S. K. Ghosal, "A comparative study of stress corrosion cracking of steam generator tube materials in water at 315°C", *Corrosion* 37, 341-349 (1981).
8. D. Van Rooyen, "Review of the stress corrosion cracking of Inconel 600", *Corrosion* 31, 327-337 (1975).
9. N. Pessall, G. P. Airey, and B. P. Lingenfelter, "The influence of thermal treatment on the SCC behavior of Inconel alloy 600 at controlled potentials in 10% caustic soda solutions at 315°C", *Corrosion* 35, 100-107 (1979).
10. G. P. Airey, "Effect of processing variables on the caustic stress corrosion resistance of Inconel alloy 600", *Corrosion* 36, 9-17 (1980).
11. J. R. Crum, "Effect of composition and heat treatment on stress corrosion cracking of alloy 600 steam generator tubes in sodium hydroxide", *Corrosion* 38, 40-45 (1982).

12. H. R. Copson and G. Economy, "Effect of some environmental conditions on stress corrosion behavior of Ni-Cr-Fe alloys in pressurized water", *Corrosion* 24, 55-65 (1968).
13. H. Coriou, L. Grall, C. Mahieu, and M. Pelas, "Sensitivity to stress corrosion and intergranular attack of high-nickel austenitic alloys", *Corrosion* 22, 280-290 (1966).
14. J. Weber and P. Sury, "Intergranular stress corrosion cracking of nickel alloys in pressurized water", *Mat. Perf.* 15, 34-42 (1976).
15. "Standard methods of tension testing of metallic materials", ANSI/ASTM E8-77a, in *1977 Annual Book of ASTM Standards*, part 10, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 1977, p. 154.
16. "Nonferrous Metals", in *1981 Materials Selector*, R. Stedfeld, ed., *Materials Engineering* 92 (1980), Section C, Chap. 2, C50.
17. W. E. Berry, *Corrosion in Nuclear Applications*, John Wiley, New-York, 1971, p. 184.

