

מיקרומבנה של פחי נחושת-בריליום
לאחר טיפולים תרמיים ולאחר ריתוך

ע' שטרן

נובמבר 1972



מיקרומבנה של פחי נחושת-בריליום
לאחר טיפולים תרמיים ולאחר ריתוך

ע' שטרן

נובמבר 1972



ת ק צ י ר

נבדקו המיקרומבנים של נתך בריליום נחושה (Berylco 25) שעבר טיפול

המסה ונתך שעבר בנוסף זיקוף. המבנים נחשפו בליטוש מכני ואיכול כימי, ליטוש אלקטרוליטי ואיכול אלקטרוליטי, ליטוש כימי ואיכול כימי. שתי השיטות האחרונות חשפו גם תאומי הרמיה במיקרומבנה. לבדיקה דגמים עבים מכ-2 מ"מ, השיטה האלקטרוליטית היא הנוחה ביותר.

נבדק מבנה הער הריתוך וסביבתו של פח 25 Berylco מעורגל לאחר טיפולים תרמיים. במחים של 1 מ"מ אין טעם לבצע אחרי הריתוך טיפולי חמסה וזיקוף לשיפור התכונות המכניות בגלל גידול גרעיניים ניכר באזור השמעת החום, יש להסמק בזיקוף בלבד.

ABSTRACT

The microstructure of Be-Cu alloys (Berylico-25), solution-heat-treated and aged, was investigated. The structure was revealed after mechanical polishing and chemical etching, and electrolytic and chemical polishing and etching. The latter two processes disclosed annealing twins in the microstructure. The electrolytic process seems to work best for specimens thicker than about 2 mm.

The microstructure of the weld and its heat affected zone, of Berylico-25 after various heat treatments, was investigated. For 1 mm thick sheets solution heat treatment is not recommended after welding, because of the noticeable grain growth in the heat affected zone. The aging process should be sufficient to achieve best mechanical properties.

ע ס ו ד

תוכן ענינים

1	.....	תקציר
3	.....	מבוא
4	.....	בדיקות מיקרומבנה של Berylco 25
4	.....	ניסויים ותוצאות
7	.....	ניחוח
9	.....	סיכום
	.....	מסלוגרפיה של חצר הריחוך וסביבתו במחזי Berylco 25 לאחור
10	.....	סיפורים חרמיים
10	.....	ניסויים ותוצאות
20	.....	דיון
24	.....	סיכום
26	.....	מפרוט

מבוא

התכונות המכניות והפיסיקליות הנוחות של הנתך נחושה-בריליום מפורסם Berylico 25 (1) מאפשרות שימוש נרחב במתקנים המשמשים למחקר בתחום פיסיקת המצב המוצק. בטמפרטורות נמוכות, סיפול תרמי של המסה מקנה לנתך משיכות גבוהה (35-60%) וחוזק נמוך ($42-55 \text{ Kg/mm}^2$) המאפשרים עיבוד שבבי ועיצוב פלסטי נוח וזול. לאחר העיצוב באמצעות סיפול תרמי של זיקון (מקובל 320°C) למשך $2\frac{1}{2}$ שעות) משיגים תכונות מכניות גבוהות ($98\frac{1}{2}-137 \text{ Kg/mm}^2$) חדימות אלה של פלדוח מעולות.

חלקים מנחושה בריליום מחברים בדרך כלל על-ידי ריתוך בשיטת TIG (2), בזרם חילופיין, עם חוט מילוי בהרכב כימי זהה לזה של הנתך.

על מנת שלא לפגוע בתכונות המושבות על-ידי הזיקון בגלל חום הקשה, מקובל לרתך את החלקים לפני סיפול תרמי זה. לאחר הריתוך נעשה זיקון הגורם לתכונות מכניות אופטימליות כפי הבחול, אך לתכונות נמוכות במקצת כאזור השפעה החום של הריתוך ובתער עצמו. שינויים אלה נגרמים בגלל שינוי המיקרומבנה בעת הריתוך. לכן בדיקה מטלוגרפית של התפר והאזורים הסמוכים לו תחשוף את האזורים החלשים ועל-ידי כך תאפשר פיתוח סיפול להתקתם.

יצרני הנתכים של נחושה בריליום משתמשים במטלוגרפיה לביקורת עקבית של הטיפולים התרמיים הניתנים לחומר הגלם (3). הם ממליצים להשתמש במטלוגרפיה

לביקורת איכות בשלבי היצור השונים. הצלחתה תלויה במידת החשיפה של המיקרומבנה האמיתי של הנתך. השיטות הידועות להכנת דגמים לבדיקה מיקרוסקופית הן: ליטוש מכני ואיכול כימי; ליטוש ואיכול אלקטרוליטי; ליטוש ואיכול כימי (4). לבדיקה הנתך יש לבחור את השיטה הנוחה ביותר לביצוע והמספקת את מידת המידע על המיקרומבנה.

בדיקות מיקרומבנה של Berylco 25

נבדקו שני סוגי פחים: פח מעורגל לאחר טיפול חרמי של המס (יסומן -

25 A) ופח מעורגל שעבר זיקון לאחר ההמסה (יסומן 25 AT) ⁽¹⁾.

המיקרומבנה של 25 A מורכב מהפוזת ⁽³⁾: המיסה רוויה יתר של בדיליום בנחושת

שמהווה מזה רצופה α ; כמות קטנה של כדורים קטנים בהירים מפוזרים בחוך

הגרעינים ולאורך הגבולות של פזה α . שמהווים פזה β ראשונית; כדורים קטנים

כהים מפוזרים אקראית בחוך גרעיני פזה α שהם תרכובת בין-מתכתית Be-Co.

במיקרומבנה של ניתכי נחושה מוצאים בדרך כלל אחרי הקריסטליזציה "האומי"

הרפיה (annealing twins) ⁽⁵⁾. הם לא ניראים במיקרומבנה של ניתכי נחושה-

בדיליום שהוכנו בשיטה המקובלת של ליטוש מכני ואיכול כימי.

בעקבות הזיקון מתבדלת בתוך 25 AT פזה γ שהיא תרכובת בין-מתכתית

Cu-Be. הפזה γ מתבדלת ברובה בחוך גרעיני הפזה α ובכמות קטנה לאורך

הגבולות שלה. הפוזת β ו-B-Co אינן משתנות עקב הזיקון והמורפולוגיה

שלהן נשמרת. בעת הזיקון נוצרים מאמצים פנימיים בחוך הנחך וחלה בו

התכווצות.

ניסויים ותוצאות

הדגמים 25A, 25 AT. הוכנו מפה בעובי 10" מ"מ שסופק מחברה Kawecki

Berylco Ind. - U.S.A. אנליזה כימית של המרכיבים העיקריים היא: 1.86% Be,

0.21% Co, 0.13% Fe (באחוזי משקל). הבריקה המטלורגית נעשה על פני המה

שכשלב היצור באו במגע עם גילי המערבלת. הדגמים הוכנו בשלוש השיטות (טבלה I)

נצולו בשכניק פזה יחיד ושה חשוך עם מיקרוסקופ Reichert (Austria)

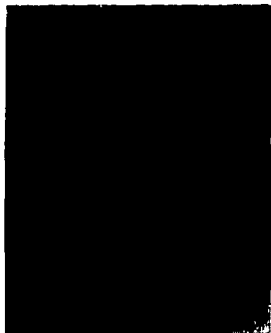
מודל MeF₂.

בשיטת השונות נחשף המיקרומבנה של Berylico 25A בצורת שונות, וזו המיקרומבנה המקובל (3) נהוג עליידי הדגם שהוכן בשיטה המכנית (צויר 1a). בדגם זה לא ניראים האומי הרפיה כמקובל בניחבי נחושת לאחר רקיסטליזציה. בדגמים שהוכנו בשיטה האלקטרוליטית וכימית (צוירים 1b, 1c) ניראים כל פירטי המיקרומבנה המקובלים ובנוסף ניראים כהדגשה האומי הרפיה.

I טבלה

שיטות להכנה דגמי נחושת-בריליום (Berylico 25) לבדיקה מטלוגרפיה.

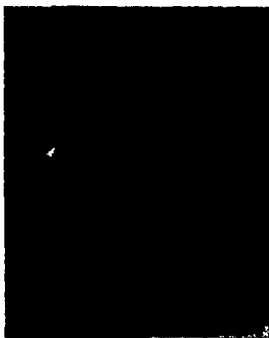
שיטה ההכנה	ליטוש	איבול
מכנית	א. החוזה על נירות עד 600 Mesh ב. ליטוש על בר עם משה יהלום עד 10. ג. ליטוש סופי עם אלומינה 0.05μ	חמיסה: 1 חלק NH_4OH 1 חלק H_2O_2 30 שניות עבור Berylico 25A, ו- 3 שניות עבור Berylico 25AT.
אלקטרוליטית	ליטוש במכשיר Lactropol (6) בחמיסה: 1 חלק H_2O , 3 חלקים H_3PO_4 (conc.) מתח: 11V וזרם $0.3A/cm^2$ 60 שניות עבור Berylico-25-A ועבור Berylico 25AT.	א. באותו המכשיר ובאותה חמיסה. ב. במתח וזרם מהווים 10% מאלו הדרושים לליטוש במשך 20 שניות. ג. במשך 20 שניות.
כימית	חמיסה: 10 חלקים $CH_3 COOH$ (conc.) 5 חלקים H_3PO_4 (conc.) 1 חלקים HNO_3 (conc.) שבילה למשך 120 שניות ב- $60^{\circ}C$ הוך עירבוב מתמיד.	זהה לשיטה המכנית



b. שיטה אלקטרוליטית



a. שיטה מכנית



c. שיטה בימית

ציור 1: מיקרומבנה של Berylco -25 A (x500). הוכן בליטושים ואיכולים שונים.

גם השיטה המבנה של 25AT חלווה בשיטה ההכנה (ציור 2). כצפוי, הפצה γ המתבדלת בתוך גרעיני פזה α ולאורך הגבולות ניראית רק לאורך גבולות הגרעינים (3). המיקרומבנה המקובל (3) (ציור 2a) מתגלה בשיטה ההכנה המכנית. בחינה המבנה מקרוב מצביעה על המצאות תאומי הרפיה, אך הם לא נראים בצורה חדה. לעומת זאת כשהי השיטות האחרות מתגלים במבנה תאומי הרפיה הדומים לאלו שנחשפים ב- Berylco 25 A (ציורים 2b, 2c).

ניתוח

רקריסטליזציה של מתכות fcc בורמת להופעה תאומי הרפיה במבנה שלהן.

חרירות הופעה התאומים קשורה באנרגיה משגה האריזה (γ) של המתכת. בכל

ש- γ נמוכה, חרירות הופעה התאומים גדולה יותר. בדיקות במיקרוסקופ

האלקטרוני הראו כי γ קטן עם הוספת אלמנטי סיגסוב היוצרים עם המתכת חמיסה

מוצקת (7). מסיבה זו התאומים מופיעים תדיר יותר בפליז α (למשל מאשר

בנחושה נקיה. על כן אפשר לצפות להמצאות תאומי הרפיה גם בניחכי נחושה-

בריליום ותדיר יותר מאשר בנחושה נקיה, והמיקרומבנה של Berylco 25

יכלול תאומי הרפיה. שיטת ההכנה של הדגמים המטלוגרפיים צריכה להיות

מסוגלת לחשוף את התאומים, התאומים ניראים בדגמים שהוכנו בשיטת הליפוש

והאיכול האלקטרוליטי ובשיטת הליפוש והאיכול הכימי. על אף שצורת האיכול

של הנחך בשיטה המכנית ובשיטה הכימית זהה, תאומי ההרפיה לא ניראים כלל

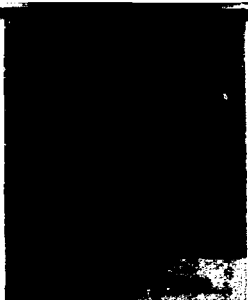
בדגמי 25A שהוכנו בשיטה המכנית, ונידאים לא ברור ב- 25AT. יש להניח

כי הסיבה לכך היא שיטוש מוחלט של גבולות התאומים ב- 25A הרך ושיטוש

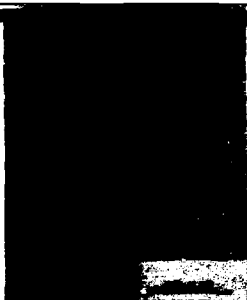
חלקי ב- 25AT הקשה יותר. השיטוש נגרם על-ידי דפורמציה פלסטית הנוצרת

(8)

בשיטת ההיצונית של הדגם בעת הכנתו בשיטה המכנית.



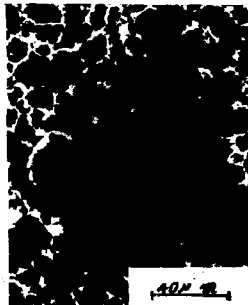
ג. שדה בהיר



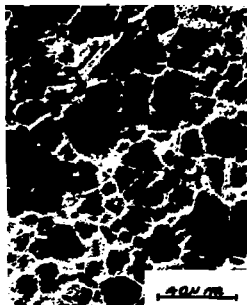
ה. שדה בהיר



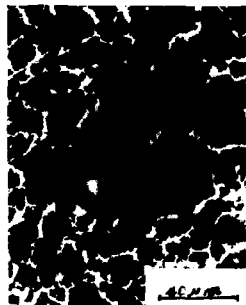
א. שדה בהיר



ג. שדה חשוך



ב. שדה חשוך



א. שדה חשוך

צילום 2: מיקרוסקופה של AT 25-Berylo (x500). ליטוש ואיזובל ב- א, שיטה מכנית
ב, שיטה אלקטרוליטית
ג, שיטה כימית

סיכום

שתי השיטות להכנת דגמים לבדיקה מטלוגרפית (שיטה אלקטרוליטית ושיטה

כימית) נוחות יותר לחשיפת כל פירוטי המיקרו מבנה של Berylico 25A.

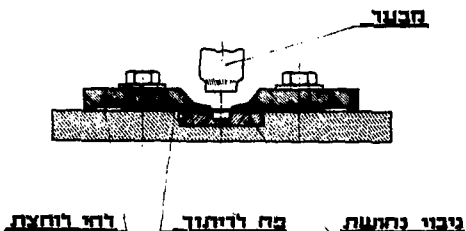
ו- Berylico 25AT מאשר השיטה המכנית המקובלת. הקונטרסטים המתקבלים כשיטה האלקטרוליטית נוחים במיוחד לבחינה מיקרוסקופית ולצילום. אמנם שיטה זו נוחה רק כאשר השטח הנבדק מספיק גדול ואינה טובה (בגלל הופעות קצה) לבחינה של חלקים דקים. (כשהים בעובי של 2 מ"מ ופחות).

מטלוגרפיה של תפר הריתוך ובכיבתו בפתי 25 Berylco לאחר טיפולים תרמיים

המיקרומבנים המתחמים בתפר ובכיבתו במח 25A מרוחק שעבר זיקון לאחר הריתוך מושווים לאלה המופיעים במח 25A שעבר טיפול המטה (800°C למשך 10 דקות) לאחר הריתוך ואחד כך זיקון (יסומן כ-25AT*).

ניסויים ותוצאות

הדגמים (120×60 מ"מ) נחכחו משה בעובי 1 מ"מ כך שהתפר הריתוך יהיה מקביל לכיוון הערגול. חסמניה הריתוך איפשרה הספקה ארגון לשורש התפר (למניעת החמצנות) וחסימה יציבה של הפחית במח הריתוך (ציור 3).



ציור 3: חסמניה ריתוך.

הרימוך הוא ידני עם חוט מילוי בעובי 1.6 מ"מ. השיטה היא TIG כזרם חילושיין של 60Amp. לאחר הטיפול התרמיים הוכנו מחלקים המרוחקים 25AT*, 25AT דגמים לבדיקה ממלוגרפיה.

מישור ההסחבלות הנבחר היה ניצב לכיוון התפר. במבט זה עובי הדגם הנחשף לכדיקה היה 1 מ"מ לכן הדגמים הוכנו בשיטה המכנית (ראה סיכום של החלק הראשון). מישור זה נבחר כי הוא מספק את המידע הרב ביותר לגבי כל סוגי המיקרומבנים הקיימים בפנו ובכיבתו. כמישור הסחכלית מישני נבחרו שני החז על הצד בו נעשה הריתוך (מבט מכיוון המבער). המיקרומבנים צולמו בטכניקת שדה בהיר.

בפח 25AT זוהו ארבעה אזורים:

- (1) אזור החצר, (2) אזור גירול הגרעינים, (3) אזור מאומץ, (4) שח בתול.
(ציור 4).

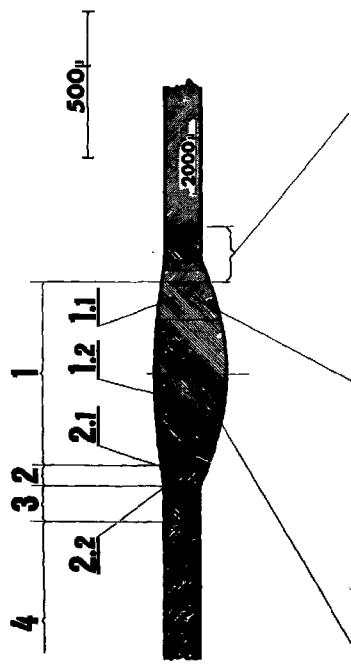
אזור החצר; מבחינים בו שני תת-אזורים:

- מרכז החצר; המיקרומבנה המתקבל אונייני לכמות קטנה של מחבת שחמצקה במחירות, לא בשווי משקל. (ציור 4). הגרעינים גדולים ומארכים לכוון הריחוף וניראים שווי צירים במישור הניצב לריחוף. הם גדלים בצורה דנדריטית ובלתי יחידים. הומוגניים בריכוז הכריליום. המיקרומבנה מורכב מפיזה α קרקע ובה פיזה β שנוצרה חוץ ההחמצקות מהירה. בגלל הזיקוף פיזה γ התבדלה כתוך α ועל הגבולות. בחלק הקרוב לקטח החשמלית פילוג הפיזה β עדין יותר (ציור 5a) וזו מאשר בתחתית החצר הקרוב לשורש (ציור 5b).

- שפת החצר; תת-אזור זה מאופיין על-ידי החמצקות מהירה בצורת דנדריטים המכוונים רדיאלית למרכז החצר. קרוב מאד לשפת הפח הדנדריטים גסים ובעלי כוונות חריפה. ככל שמתרחקים משפת הפח אל מרכז החצר יש מעבר לדנדריטים עדינים יותר ומכוונים פחות אשר הופכים בהדרגה לגסים יותר חוץ שינוי הכיווניות לכוון אורך החצר (ציורים 4, Sc, Sd).

אזור גירול הגרעינים; מבחינים בו שני תת-אזורים:

- שפת הפח; בעת הריחוף היה תת-אזור זה נוזלי בחלקו. ההתמצקות החלה בעיקר בגבולות הגרעינים ובמקצה בגרעינים עצמם. המיקרומבנה מורכב מגרעיני α וכמות קטנה של פיזה β בגבולות ובהוף הגרעינים. כמות ה- β פוחתת חוץ



צילום 14

- 1. מיקרוסקופ Beryllco 25A
- 2. מיקרוסקופ 1.2, 1.1, 1.2
- 3. מיקרוסקופ 2.1, 2.2
- 4. מיקרוסקופ 2.2

ההרחקת מהחל (ציוחם Se, f). בתת-אזור זה הגרעינים גדולים יחסית וצורתם שווה-צירית.

- שח הפח המוצק; בגלל הטמפרטורה הגבוהה שהיחה בעת הריחוף (קרובה לטמפרטורת הריחוף של הנחך) חל באזור זה גידול גרעינים ניכר. במיקרומבנה מבחינים כפזה α רציפה הכוללת כמות קטנה של כדורים כהים של Be Co, כדורים כהירים של β וכן סנדלים של γ (ציר 5g).

אזור מאומץ, אזור זה נמשך עד למקום בו הפחים הוחזקו כתמסנית. המבנה מורכב מגרעיני α מחוספסים במקצת, בנוכח ניראים תאמי הרפיה וקוי דורמטיה (strain lines) (ציר 5h). הפרטים האחרים זהים לאלה המתקבלים בשח Berylco 25AT⁽³⁾.

אזור הפח הכתול, מבנהו זהה לזה של פח 25AT שהוכן בשיטה המכנית (ציר 5i).

גם בשח 25AT* נמצאו ארבעה אזורים המקבילים לאלה שהובחנו ב-25AT:

(1) אזור התפר, (2) אזור גידול הגרעינים, (3) אזור מאומץ, (4) פח כתולג.

בציר 6 נתונה צורת החיבור של הפחים יחד עם תמונות מכלוגרפיות הקאפינות את האזורים השונים.

אזור התפר; הוא מחלק לשני חת-אזורים ברורים.

- מרכז התפר; מאופיין על-ידי גרעינים הניראים שווה-ציריים וגדולים מאד.

במישור הניצב לכיוון התפר נמאורכים במבט על התפר. הגבולות שלהם מחוספסים

ומזכירים אח אופי ההתמצקות הדנדריטיה שלהם מתוך אמכט הריחוף. מבחינים

בשירי זה β שהתמססה ברובה חוף טיפול ההמסה, בלי שהדפוזיה הספיקה

לשמש לגמרי אח הבולי הרכוז. בגלל הזיקוף התבדלה הפזה γ בתוך הגרעינים

של α ולאורך הגבולות שלהם (צירים 6, 7a).



א. שם המבר



ב. שם המבר



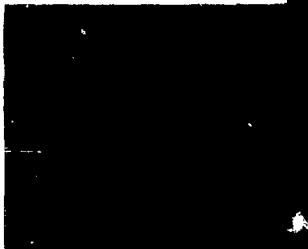
ג. מברג ב' שם המבר לשם המבר



ד. מברג המבר קרוב לעורש



ה. שם המבר



ו. מברג המבר קרוב לקומ

צילום: 21. אור המבר ומבניתו במה מברגת 25A Beryllio

למשל: 7777 (X500).



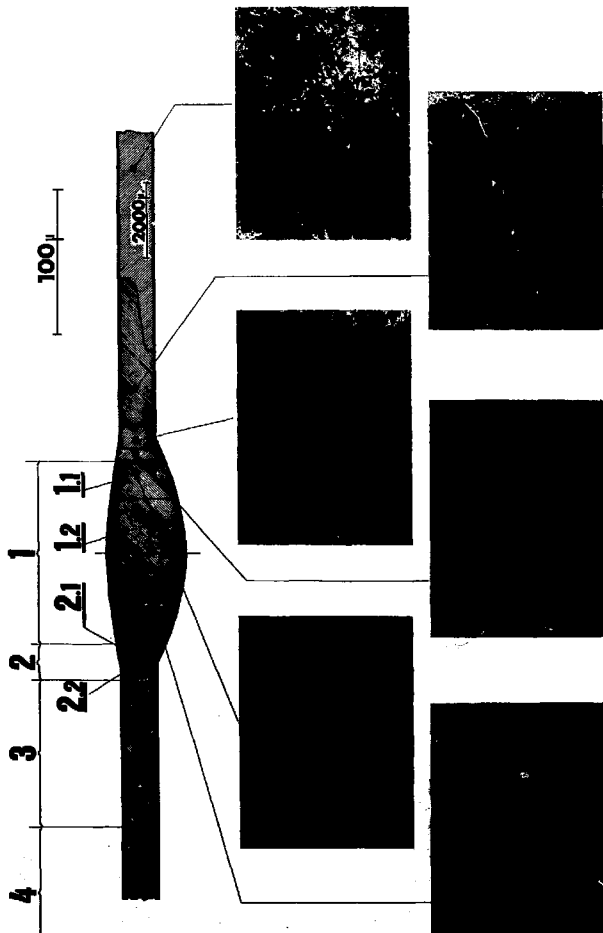
h. אזור מאומץ



g. שטח הפח המוצקת



i. טח בחול



צילום 6:

- אזור המעט ומבחינתו כמו AT²⁵.
 1. המעט, 1.1 טיפוס המעט, 1.2 שטח המעט
 2. אזור גידול בלועים, 2.1 שטח המעט, 2.2 שטח המבנה
 3. אזור המעט
 4. פה הבול

- שפת התפר; אזור זה מכיל דנדריטים מאורכים שגדלו לכונן מרכז התפר. בגלל

צורת ההתמצקות, גבולות גרעינים אלה מחוסמסים. בחוך הגרעינים נראים

עקבות של פזה β שלא התמוססה כולה ב- α במישול ההטסה. בעז הזיקוף

התבדלה פזה γ בעיקר בחוך α ובמקצת לאורך גבולות הגרעינים (ציורים 6, 7b, c).

אזור גידול הגרעינים; אזור זה מחלק לשני תת-אזורים ברורים:

- שפת הפח; בגלל קירבתו לתפר היה תת-אזור זה בחלקו גוזלי בעת הריחוף.

אחרי ריתוך התמצקה פזה β בצורת איים לאורך הגבולות ובמקצת בגרעינים

עצמם. בעת ההטסה פזה β התמוססה חלקיה ועקבותיה נראים במיקרומבנה (ציור 6).

כמות קטנה ביותר של β נשארה בחוך הגרעינים ועל הגבולות בצורת גרעינים

בהירים קטנים מאוד. פזה γ התבדלה בחוך גרעיני הפזה α וגם לאורך

הגבולות ומהווה הרבשה כהה לגבולות גרעיני הפזה α (ציור 6).

- שפת הפח המוצקת; אחרי הריחוף תת-אזור זה מאופיין על-ידי גרעינים גדולים:

יחסית. בעת ההטסה חל בו גידול גרעינים נוסף (ציורים 6, 7d).

בחוך הגרעינים נראית פזה Co Be והתבדלות ה- γ האופיינית.

אזור כאומץ (גרעינים גדולים מאוד); בעקבות טישול ההטסה חל גידול ניכר של

גרעינים באזור זה (ציורים 6, 7e, f, g). ונוצר הק. מספר בודד של גרעינים

לרוחב הפח שקובייה - 1 מ"מ. האזור גדול מזה שבפח 25AT ואורכו כ- 4 מ"מ.

המיקרומבנה דומה לזה של פח 25AT.

אזור הפח הנוזל; המיקרומבנה דומה לזה של פח 25AT שהוכן בשיטה הסכנית אך

בעקבות טישול ההטסה גודל הגרעיני הממוצע באזור זה גדול יותר (ציורים 6, 7h).



b. שפה החזק



g. מרכז החזק



d. שפה הפח המוצקת

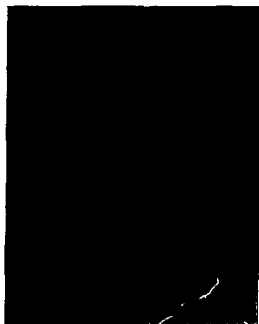


c. מעבר משפה החזק לשפה הפח

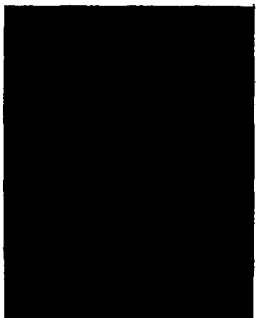
ציור 7: אזור החזק וסביבתו במח 25 A Berylco . הפח עבר סיפול זיקוף (100x)



ז. אזור טאומץ (גרעינים ענקיים)



ס. אזור טאומץ (גרעינים ענקיים)



ה. מה בתול



ג. אזור טאומץ (גרעינים ענקיים)

ד"ר 1אזור התפר

- מרכז התפר; כוון ההתמצקות הוא ככוון התפר, ככל שתרחקים ממרכז זיקתה, ההשפעה של הקירור מהצדדים, וכוון ההתמצקות משתנה בהדרגה עד שהוא ניצב לכוון התפר. תופעה זו ניראת ברור ברגמים שמישור ההתחלוח שלם היה על התפר מכוון מבקרי הריחוף (ציור 8). בתמונה אלה רואים את סיבוב הדנדריטים בעקבות שינוי כוון זרימת החום מאמבט הריחוף. כשה 25AT רואים שהמורפולוגיה של מזה β שונה במקצת באזור הקרוב למבקר (ציור 5a) מזו באזור הנמצא החתוי, קרוב לשורש התפר (ציור 5b). הסיבה לתופעה זו היא שוני בקצב הקירור בשני האזורים. כעת הריחוף שורש התפר מקורר באויגון (למנוע ההתמצנות) לכן הוא מתמצ ראשון וקצב הקירור בו מהיר יותר.

ומן ההמסה הקצר גרם לבך שהמזה β ברגם*25AT לא המפיקה להחמוסם כ- α ועקבותיה נראות במיקרוסקנה. כאן רואים גם גרעינים גדולים מאד עם גבולות מתוספסים, האופייניים למבנה מתכה יצוקה אחרי ביטול ה-"coiling". התכונות המכניות של אזור זה ירודות בגלל גודל הגרעינים.

- שם התפר; כאן גיכרה ההשפעה של גריאנס הקירור המכוון ממרכז התפר החוצה לכוון הפח הבחול החמוס בתכסניות (ציור 3). הגרעינים גדלו כנגד גריאנס הקירור כאשר קרוב לשפה הנוקלאציה החרושה על הגרעינים של הפח והגידול היה אויסקסיאלי (ציור 5a כמסגרת). הגידול האויסקסיאלי גרם לבך שהדנדריטים הקרובים לפח עבים ומספרם קטן יחסית. המבקר לרנדריטים קרובים הוא תוצאה של נוקלאציה המתאימה לררגת קירור יתר הקיימת במקום הנוקלאציה. זו גם אחת הסיבות להחצבות הדנדריטים שמספרם קטן חוץ החרחוק לכוון מרכז התפר.

ד"ר 7אזור התפר

- מרכז התפר; כוון ההתמצקות הוא בכוון התפר, ככל שמרחקים מהמרכז גיבחה השפעה של הקירור מהצדדים, וכוון ההתמצקות משתנה בהדרגה עד שהוא ניצב לכוון התפר. תופעה זו ניראה בברור ברגמים שמישור ההסתכלות שלהם היה על התפר מכוון מבעד הריתוך (ציור 8). בהמונות אלה רואים את סיבוב הדנדריטים בעקבות שינוי כוון זרימת החום מאמבט הריתוך. במת 25AT רואים שהמורפולוגיה של פזה β שונה במקצת באזור הקרוב למבעד (ציור 5a) מזו שאזור הנמצא תחתיו, קרוב לשורש התפר (ציור 5b). הסיבה לתופעה זו היא שוני בצב הקירור בשני האזורים. בעת הריתוך שורש התפר מקורר בארגון (למנוע התמצנות) לכן הוא מתמצק ראשון וקצב הקירור בו מהיר יותר.
- זמן ההמסה הצצר גרם לכך שהפזה β בדגם* 25AT לא הספיקה להתמוסס ב- α ועקבותיה נראות במיקרוסקנה. כאן רואים גם גרעינים גדולים מאד עם גבולות מחוספסים, האופייניים למכנה מחבת יצוקה אחרי ביטול ה-"coining". התכונות המכניות של אזור זה ירודות בגלל גודל הגרעינים.
- שפת התפר; כאן ניכרת ההשפעה של גרדיאנט הקירור המכוון ממרכז התפר החוצה לכוון הפח הבחול התפוס כתפסניות (ציור 3). הגרעינים גדלו כנגד גרדיאנט הקירור כאשר קרוב לשפת הנוקלאציה התרחשה על הגרעינים של הפח והגידול היה אפיטקסיאלי (ציור 5c במסגרת). הגידול האפיטקסיאלי גרם לכך שהדנדריטים הקרובים לפח עבים ומספרם קטן יחסית. המעבר לדנדריטים עדינים הוא חוצאה של נוקלאציה המתאימה לדרגת קירור יתר הקיימת במקום הנוקלאציה. זו גם אחת הסיבות להתעבות הדנדריטים שמספרם קטן הוך התרחקות לכוון מרכז התפר.



b. אזור קרוב למרכז התפר



8. מרכז התפר



d. אזור בקרבת שפת הפה



c. אזור מרוחק ממרכז התפר

ציור 8: אזור התפר במת Berylco 25A לאחר זיקוק ($\times 500$). מכס מכיוון המבער.

אזור גידול הגרעינים

בעת הריחוף היה החלק הקרוב לחפר במצב דו-פזי של מוצק ונוזל. כמות הנוזל קטנה כשמתרחקים מהחפר ומתקרבים לתח-אזור, שפת. הפת. המוצקת. הדבר נובע מגרדיאנט הטמפרטורה ממרכז החפר לכוון התנסויות. הגרדיאנט הזה קיים גם בתח-אזור של שפת הפת המוצקת. פה חל גידול גרעינים ניכר שלא הופיע על-ידי התנזלות חלקית. גודל הגרעיין המקסימלי שנימצא היה בגבול הקרוב לתפר של תח-אזור זה. בפח 25AT ואחרי האיכול התגלתה תופעה מעניינת (ציור 5g) - גוון צד הגרעיין הקרוב לתפר בהיר יותר מאשר הצד המרוחק מהתפר. רוחב הפס הבהיר, הנראה בכל גרעיין, פוחת תוך התרחקות מהתפר ונעלם קרוב לאזור המאומץ. תופעה זו לא נראית בפח 25AT בגלל ההמסה לאחר הריחוף. הפס הבהיר מוסבר על-ידי גרדיאנט בריכוז הבריליום הנוצר מהדיפוזיה בהוף גרדיאנט הטמפרטורה בעת הריחוף. הפס מתקבל בכל גרעיין כי חל בו פילוג חדש של הבריליום. רווית יתר נמוכה של העדרויות על-ידי הגבולות גורמת להסימת הריפוזת של בריליום מגרעיין אחר למשנהו, לכן גרדיאנט הריכוז אינו רצוף במעבר מגרעיין לגרעיין. לפיכך בכל גרעיין יש כמות שונה של בריליום בצידו הקרוב לתפר מאשר בצידו המרוחק ממנו. הזיקון גורם להתבולות בלתי אחידה של פזה γ . לכן ההתקפה הבימית של התורמר המאכל אינה אחידה ומקבלים בגרעיין הבדלי גוון (ציור 5g). להוכחת הנחות אלה נבדקה המיקרוקישיות בתלקים שונים של הגרעיין. בבדיקות נמצא הברל קטן בין המיקרוקישיות של האזורים הבהירים לבין זו של האזורים הכהים (ציור 9).

צ"ל 9: בדיקת פיקורקיות בתו-האזור של שטח התו המוצקת ברגם א"ר 25 (1500x).

20 מ"מ



הבדלי גוון ניראים גם באזור מרכז התפר (צ'ורים 5a,b,c,d). כאן נובעים ההבדלים מגריאנט הריכוז אחרי ההתמצקות המהירה של אמבט הריתוך.

אזור מאומץ

מרחקים אה הפחים כאשר הם מוחזקים על-ידי התפסנית (צ'ור 3) כתפסית קשיחה. בעת הריתוך הפחים מתפשטים ולאחר הריתוך, בעת התמצקות התפר, הם מתכווצים. התפסית הקשיחה גורמת החילה למאמצי לחיצה ואחר כך למאמצי מתיחה באזור שבין הלחיים של התפסנית. באזורים בהם הטמפרטורה בעת הריתוך היתה נפוכה נגרמת דפורמציה בקור. האזורים בהם הטמפרטורה היתה גבוהה עובדים דפורמציה בחום מלווה כרקריסטליזציה.

בפח 25AT האזור המאומץ הניראה במטלוגרפיה יטן יחסית, בבחינה של 25AT* לומדים כי אזור זה הרבה יותר גדול והדפורמציה בו קרובה לדרגת הדפורמציה הקרי (7). זו הסיבה שב-25AT* חל גידול גרעינים ניכר בעקבות ההמסה ב- 800°C למשך 10 דקות (צ'ורים 7 e,f,g).

אזור הפח הכתול

בעקבות ההמסה הנוספת של הפח 25AT* חל בו גידול גרעינים ומקבלים

$$2500 \frac{\text{גרעינים}}{\text{mm}^2} \text{ לעומת } 3750 \frac{\text{גרעינים}}{\text{mm}^2} \text{ בפח בתול 25AT. שאר הנמונים של שני הפחים זהים.}$$

סיכום

נבדק המיקרומבנה של תפר הריתוך בפח 25AT ופח 25AT* במטרה להכיר את האזורים החלשים בתפר ובאזור השפעת החום. האזור החלש בפח 25AT הוא אזור גידול הגרעינים בשפת הפח המוצק. הגרעינים במקום זה גדולים יחסית,

(גרעינים 2300) והתנדלות פזה γ בחוכם אינה הומוגנית. גם באזור החפר הגרעינים גדולים. אך המרחק בין זרועות הדנדריטים קובע את החוזק (אפשרויות תנועה של דיסלוקציות) ולא גודל הגרעין; נוסף לזה אזור החפר עבה יותר מזה של הפח הבחול.

האזור החלש והמיועד לכישלון מבני בפח*25AT הוא האזור המאומץ. בגלל הדפורמציה בקור, בעת ההמסה הגרעינים גדלים גידול פראי (מתקבלים רק מספר גרעינים בעובי של 1 מ"ט) והחוזק נמוך מאת: מסיבה זו לא מומלץ לעשות טיפול המסה לאחר הריחוק (בהנאים הנחונים) ויש להסתפק בזיקוק בלבד. ואומנם בניסיונות מתיחה איכותיים בפחים 25AT * 25AT הכישלון המכני היה במקום בו הבדיקה המטלוגרפית הצביעה על אזור חלש. מומלץ לעבוד בפח 25AT, יש לקחת בחשבון ירידה בתכונות המכניות בהשוואה לפח בחול בגלל ההחלשה באזור גידול הגרעינים.

ה בע ת ת ו ד ה

ברצוננו להודות לא" גקי על ביצוע הריחוקים ולי" רוס על ביצוע הטיפולים התרמיים.

11780

1. Berylco, Beryllium Copper Strip, Bul. 30402-PD1, Kawecki Berylco Ind., U.S.A. (Reading, Pa. 19603, U.S.A.).
2. WELDING HANDBOOK, American Welding Soc., Vol. 2
3. Beryllium Copper Microstructure of Alloy 25, Technical Data - File No. 304-TD 20, Kawecki Berylco Ind., U.S.A., (Reading, Pa. 19603, U.S.A.).
4. CIHA, K., Chemical Polishing in Metallography, Practical Metallography, 8 (1971), 26-39.
5. CAHN, R.W., Physical Metallurgy, North-Holland, London 1970, p. 1184.
6. "Lectropol", Struers Scientific Ins., Copenhagen - Denmark.
7. SMALLMAN, R.E., Modern Physical Metallurgy, Butterworths, London 1963. p. 173, p. 238.
8. BRAUNOVIC, M., and HAWORTH, C.W., The Use of Microhardness Testing to Measure the Thickness of Work-Hardened Surface Layers, Practical Metallography, 7 (1970), 183-187.