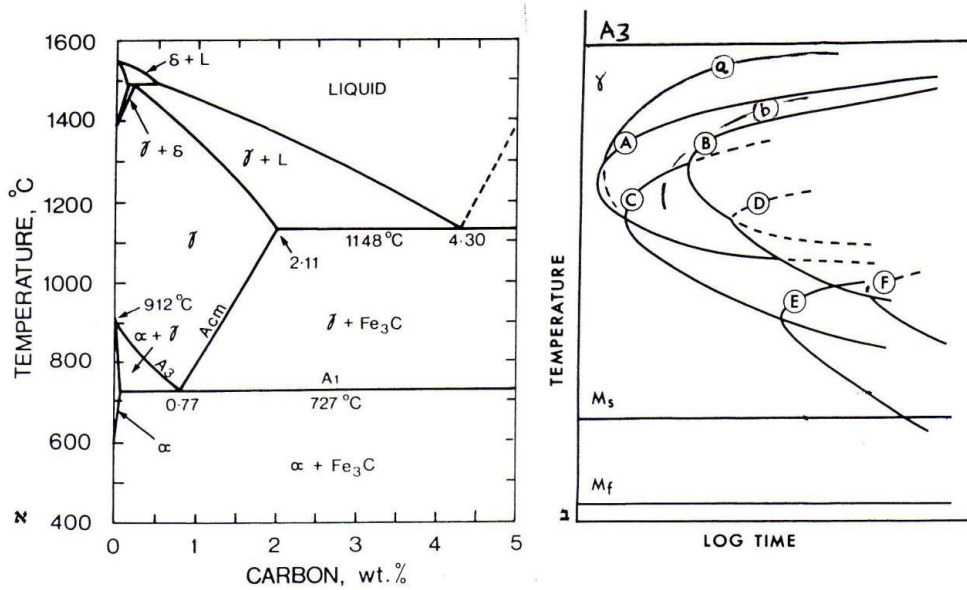


טיפולים תרמיים וכושר היסום של פלדות

1. מבוא

במעבדה זאת נלמד על טיפולים תרמיים בפלדות. נבדוק את השפעת הטיפול התרמי על התכונות והמיקרומבנה של הפלדות. לשם כך נעזר בדיאגרמת TTT (Time Temperature Transformation). נבחן את כושר היסום של הפלדות בשתי שיטות (ג'ומיני וגרוסמן). הפלדות הן קבוצת המתכות השכיחה ביותר לשימושים הנדסיים. כשמחממים נכתי ברזל- פחמן ונתכים מסוגסגים בכמויות קטנות של מסגסגים מתכתיים עוברות הפאזות של טמפרטורת החדר לאוסטניט מעל לטמפרטורה האוטקטואידית A1 בדיאגרמת הפאזות (איור 1).



איור 1- א. קטע מדיאגרמת הפאזות ברזל-פחמן.

ב. דיאגרמה סכימטית המתארת את תוצרי הפירוק של אוסטניט בפלדה היפואוטקטואידית:

- (a) - 1% פריט ferrite, (b) - 99% פריט ferrite, (A) - 1% פרליט pearlite, (B) - 99% פרליט
- (C) - 1% בייניט עליון upper bainite, (D) - 99% בייניט עליון upper bainite, (Mf), upper bainite

מהדיאגרמות הללו ניתן לראות שהמעבר מסתיים מעל לקווים A3 או Acm, בהתאם להרכב הפלדה. בקירור איטי צפוי האוסטניט להתפרק לפאזה ראשונית פריט, כשתכולת הפחמן קטנה מההרכב האוטקטואידי ולפאזה ראשונית צמנטיט, כשתכולת הפחמן גבוהה מההרכב האוטקטואידי. מתחת ל- A1 צפוי ששארית האוסטניט יתפרק למבנה אוטקטואידי של פריט וצמנטיט. בקצבי קירור מהירים יותר ישנם חמישה תוצרים המתקבלים בחמישה תהליכים שונים שמתחרים ביניהם. מנגוני היווצרות שלהם שונים, אך כולם (מלבד המרטנזיט) מאופיינים בעקומת c הניתנת לתיאור דו מימדי של זמן-טמפ', שמתאר את תנאי היווצרותם. ארבעת עקומות ה-c חופפות ומתמזגות לדיאגרמת TTT של הפלדה. דיאגרמת TTT מלאה כוללת את עקום התחלת היווצרות כל פאזה ועקום סיום היווצרות שלה (איור 1).

המרטנזיט תלויה בטמפרטורה ולא בהמשך השהייה של הפלדה בטמפרטורה זו.

סוגי פאזות:

1. פאזות ראשוניות- פריט (ferrite) או צמנטיט (cementite)- נוצרות בהרכבים שונים משני צידי האוטקטואיד, בטמפ' קרובות לטמפ' האוטקטואידית. יש שתי צורות אופייניות- לאורך גבולות גרעינים ולוחות widmanstatten שנובטים בגבולות האוסטניט וגדלים לעומק הגרעין. צורתם האופיינית בחתך מטלוגרפי היא מחטנית.
 2. פרליט (pearlite)- תוצר ההתפרקות האוטקטואידי של האוסטניט. היווצרות פרליט מתחילה בנביטת גביש פריט או צמנטיט. הפריט דוחה את עודף הפחמן לסביבתו ולכן מסייע לנביטה וגידול של גבישי צמנטיט סביבו. גבישי צמנטיט אוספים פחמן ודוחים אטומי ברזל וכך מסייעים לגידול גבישי פריט סביבם. הגבישים גדלים בצורת לוחות מסועפים (lamella).
 3. בייניט (bainite)- כשאוסטניט מקורר מהר לטמפרטורה נמוכה יותר, הוא מתפרק לבייניט. הבייניט הוא תערובת עדינה מאוד של פריט וצמנטיט, אך צורתם אינה לוחות. בטמפרטורות יחסית גבוהות נותר בייניט עליון שצורתו במיקרוסקופ אור כנוצות. במיקרוסקופ אלקטרוני נמצא שהנוצות הן אלומות (laths) של פריט וביניהן גבישי צמנטיט ארוכים. בטמפ' נמוכות, נוצר בייניט תחתון שצורתו לוחות מחטיים (acicular).
 4. מרטנזיט (martensite)- תוצר הפירוק של אוסטניט בטמפ' הנמוכות ביותר או במצבי קירור היתר הקיצוניים ביותר. כשהטמפ' יורדת מתחת לטמפ' התחלת היווצרות המרטנזיט (m_s), מופיעים גבישי המרטנזיט הראשונים. כשהטמפ' יורדת עוד, נוצרים גבישים חדשים והם גדלים במהירות קרובה למהירות הקול בפלדה עד שהם נעצרים. השהייה בטמפ' קבועה לא מגדילה את כמות המרטנזיט. הרכב גבישי המרטנזיט זהה להרכב האוסטניט ומעבר הפאזה אינו מלווה כלל בפילוג מחדש של הפחמן והברזל.
מעבר פאזות מרטנזיטי אינו אופייני רק לפלדות. הוא מתרחש במתכות, בחומרים קרמיים וגם בחלבונים. אחת מתכונות המעבר המרטנזיטי בפלדה היא שהמעבר יוצר את אחד המבנים הקשים ביותר בטבע. הסיבות לקושי גבוה זה ניתן לראות ב-3 מנגנונים:
 - א. הקשייה ע"י המסה- אטומי הפחמן יוצרים עיוות במבנה הגבישי המפריע מאוד להחלקת נקעים.
 - ב. הקשייה ע"י גודל גרעין- גבישי המרטנזיט קטנים בהרבה מגבישי האוסטניט ומכילים צפיפות מאוד גבוהה של פגמים- נקעים וגבולות תאומים שמפריעים להחלקה.
 - ג. הקשייה ע"י התבדלות- עודף הפחמן נוטה להתבדל לקרבידים זעירים וצפופים מאוד. העלאת הטמפ' גורמת להתפרקות המרטנזיט, לירידת הקושי ועליה במשיכות וסבילות השבר. תהליכים אלה נקראים הרפיה והם שלב הכרחי בטיפול של פלדות מחוסמות. במצב המחוסם בלבד לרוב הן פריכות לשימוש הנדסי.
- כושר חיסום (hardenability)-** התכונה אשר קובעת את העומק והפילוג של הקושיות שמתפלג בחיסום של פלדה בקצבים שונים. כושר החיסום נשלט ע"י:

1. תנאי החיסום- התווך אליו מעבירים את החלק מהתנור קובע את קצב פינוי החום מהחלק. תוכי חיסום מקובלים (לפי סדר עולה של קצב פינוי החום אליהם): אוויר או גזים אחרים, שמן, תערובת מים ושמן, מים ותמלחת. בכל תווך ניתן להגדיל את קצב פינוי החום ע"י ערבול.
2. מידות וצורת החלק- חלקים בעלי יחס שטח פנים לנפח גדול מתקררים מהר. חלקים בהם יש שינויים חדים בשטח החתך מתקררים בקצבים שונים ועלולים להיסדק.
3. סוג הפלדה- הקושיות המקומית נקבעת בעיקר ע"י תכולת המרטנזיט וע"י קושיות המרטנזיט. שתי תכונות אלה תלויות בעיקר בהרכב הפלדה. תכולת הפחמן קובעת את הקושיות של הפאזה המרטנזיטית. תכולת המרטנזיט נקבעת במידה רבה ע"י המסגסים שמשפיעים על היחס בין כמות הפאזה המרטנזיטית וכמות הפאזות האחרות שמתקבלות בפלדה בקירור בקצב נתון.
4. כושר החיסום של פלדות תלוי גם במיקרומבנה, בגודל הגרעין, בהומוגניות האוסטניט, בנוכחות אינקלוזיות וכדומה.

שיטות לבדיקת כושר חיסום:

שתי שיטות הבדיקה התקניות המקובלות לקביעת כושר החיסום של פלדות הן:

שיטת Jominey ושיטת Grossman.

שיטת Jominey- דגם סטנדרטי אורכו 4inch וקוטרו 1inch מועבר מהתנור למתקן בו מוזרק סילון מים על אחד מקצותיו. קצה הדגם שנמצא במגע עם סילון המים מתקרר מהר יותר, וקצב הקירור קטן ככל שמתרחקים מקצה זה. מוליכות החום והחום הסגולי של פלדות אינם משתנים באופן ניכר עם ההרכב, לכן פילוג קצב הקירור לאורך הגליל זהה לכל הפלדות (ללא תכולת מסגסים גבוהה במיוחד). לאחר החיסום מודדים את הקושיות לאורך הדגם.

שיטת Grossman- גליל פלדה בקוטר 2inch ואורך לפחות פעמיים הקוטר מחוסם במים. פילוג הקושי בחתך באמצע גובה הגליל נקרא עקומת Grossman.

2. מטרות הניסוי

- הכרת מעברי פאזות וטיפולים תרמיים חשובים בפלדות.
- קביעת כושר החיסום של פלדות באמצעות בדיקת Jominey ובדיקת Grossman.
- לימוד השפעת המסגסים על כושר החיסום.

3. רקע תיאורטי

Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright, *The Science and Engineering of Materials*, Sixth Edition, chapters 13-3, 13-4, 13-5, 13-6, Cengage Learning (2011)

4. שאלות הכנה

בחלק זה ריכזנו עבורכם/ן מספר שאלות שיעזרו לכם/ן להתכונן למעבדה.

חשוב לענות על שאלות אלו על מנת להגיע מוכנים למעבדה!

1. תאר את מהלך הניסוי של המעבדה.
2. הגדר /י כושר חיסום והסבר / י אילו פרמטרים משפיעים אליו?
3. פרט /י והסבר / י את השיטות לבדיקת כושר החיסום. יש להתייחס לגיאומטריית הדגם.
4. באיזה תווך חיסום ניתן לחסם פלדה? ציין שלושה. מה ההבדל ביניהם?
5. אילו תופעות מתרחשות בעת חיסום פלדות?
6. מה ההבדל בין מרטנזיט twin למרטנזיט lath?
7. כיצד משפיעים מסגסים שונים על כושר החיסום של פלדות? ומהי המשמעות מבחינת תהליכי ייצור?
8. מהי פלדה 1040?
9. מהי פלדה 4340?
10. כיצד משפיע אחוז הפחמן בפלדה על הקשיות?
11. כיצד משפיע אחוז הפחמן בפלדה על כושר החיסום?
12. עבור בדיקת ג'ומיני ועבור בדיקת גרוסמן, צייר/י באותו הגרף בצורה איכותית את פרופיל בדיקת הקושי RC כפונקציה של עומק הדגם עבור פלדות 1040 ו- 4340 כפונקציה של עומק הדגם עבור פלדות
13. מהי דיאגרמת TTT ומה ניתן ללמוד ממנה?
14. מהו ההבדל המהותי בין דיאגרמת TTT לבין דיאגרמת פאזות? וכיצד הן משלימות האחת את השנייה?
15. בקצבי קירור מהיר של פלדה, מהן הפאזות שיכולות להתקבל? פרט על כל אחת מהן.
16. במה היווצרות מרטנזיט נבדלת מהיווצרות הפאזות האחרות? התייחס גם למכאניזם.
17. מהי מטרת תהליך האוסטניזציה?
18. הסבר/י כיצד יש להיעזר בדיאגרמת TTT על מנת לבחור את תהליך הייצור על פי תכונות החומר הנדרשות. הצג דוגמא על דיאגרמת ה-TTT הנתונה בתדריך.
19. לאילו בדיקות נבחר לעבוד עם שיטת מיקרו קשיות וויקרט?

20. באיזו שיטת קשיות רוקוול תבחר לעבוד עם פלדה מחוסמת ופלדה פחמנית 1020 שלא עברה חיסום?
21. מהם שלבי ההכנה של דגם מטלוגרפי?
22. במעבר בין ניירות ליטוש יש לשטוף את הדגם. מדוע?
23. בסוף תהליך הכנת הדגם יש לאכל אותו. מדוע?
24. מהם חמשת התוצרים העשויים להתקבל כתלות בקצבי הקירור?
25. מהן שתי צורות הגידול האופייניות של הפאזות הראשוניות פריט וצמנטטיט?
26. הסבר את תהליך היווצרותה של פאזת הפרליט.
27. תאר את מבנה הבינייט וצורתיו האפיניות כתלות בטמפרטורה.
28. הסבר את תהליך היווצרותה של פאזת המרטנזיט.
29. מהו הכוח המניע לשינוי המבנה מאוסטניט למרטנזיט?
30. מהם שלושת מנגנוני ההקשייה הבאים ליידי ביטוי בעת היווצרות פאזת המרטנזיט?
31. כיצד ישפיע תהליך הרפייה על חומר במבנה מרטנזיטי מבחינת התכונות המכניות, ומדוע שינוי זה מתאפשר?
32. כיצד באה ליידי ביטוי השפעה של הבדלים בקצבי קירור בחלק נתון (2 נקודות עיקריות)?
33. הסבר את פילוג המאמצים בחלק שעובר חיסום (היכן ממוקמים מאמצי הלחיצה והמתיחה)?
34. מהו "כושר חיסום"?
35. מהם 3 הפרמטרים המשפיעים על כושר החיסום וכיצד?
36. תאר את ארבעת השלבים המתרחשים בפלדה בעת תהליך ההרפייה.
37. הסבר כיצד העלאת טמפרטורת ההרפייה משפיעה על התכונות המכניות של הפלדה.
38. הסבר בקצרה כיצד מתבצעת בדיקת Jominey.
39. הסבר בקצרה כיצד מתבצעת בדיקת Grossman.
40. מהי "חומרת החיסום"-H?
41. מהם המבנים האומרים להתקבל בדגמים לאחר ביצוע שלב 3 במהלך הניסוי?
42. תאר את התפלגות קצב הקירור בדגם Jominey והתפלגות הקשיות כתלות בו.

בהצלחה,

אילה, טוהר ומשה

5. מהלך הניסוי

1. קבעי בעזרת עיון בדיאגרמת TTT והמדריך את פרקי הזמן לשהייה בטמפ' של 650°C .
2. הכנס/י את כל דגמי 4340 (גומיני וגרוסמן) לתנור 1 שחומם מראש לטמפ' של 850°C למשך 30 דקות, לקבלת אוסטניט.
3. הכנס/י את כל דגמי 1040 (גומיני וגרוסמן) לתנור 2 שחומם מראש לטמפ' של 850°C למשך 30 דקות, לקבלת אוסטניט.
4. הוצא/י דגם גרוסמן 4340 וחסם/י אותו מיד במים.
5. הוצא/י דגם גרוסמן 4340 נוסף וחסם/י אותו מיד בשמן.
6. קרר/י באוויר למשך 1:45 דקות שני דגמי 4340 גרוסמן ה נותרים.
7. העבר/י לתנור בטמפ' של 650°C את הדגמים שקוררו באוויר.
8. הוצא דגם גומיני 4340 מהתנור והעבר למתקן יחידת חיסום קצה בתום הקירור הוצא את הדגם מהמתקן.
9. חזור על סעיף 8 עבור דגם גומיני 1040.
10. הוצא/י דגם גרוסמן 1040 וחסם/י אותו מיד במים.
11. הוצא/י דגם גרוסמן 1040 וחסם/י אותו מיד בשמן.
12. הוצא/י את הדגמים (גרוסמן 4340), כל אחד בזמנו (נקבע בסעיף 1) וחסם/י במים.
13. חתוך/חתכי את כל דגמי גרוסמן לשניים וחתוך/חתכי את הקצה של דגמי גומיני. החיתוך מתבצע בחדר 131 בליווי המדריך והדרכתו.
14. לטש/י את פני השטח של החתך של כל אחד מחצאי דגמי גרוסמן 180 grit. לטש את 2 דגמי ג'ומיני לאורכם. הליטוש מתבצע בחדר ליטושים (134).
15. לטש/י 3 חצאי דגמי גרוסמן 4340 (חיסום במים, 2 דגמים ששהו בתנור בטמפ' שבחרת בסעיף 1). השתמש בניירות ליטוש: 320 grit, 600 grit, 800 grit, 1200 grit, 2400 grit, 4000 grit.
16. לטש/י את הדגמים שליטשת בסעיף 15 על בד עם תרחיף יהלום 1 micron.
17. בצע/י בדיקת קשיות לאורך הקוטר של כל אחד מדגמי גרוסמן המלוטשים בשיטת Rockwell C- במכשיר הקושיות שבחדר תנורים.
18. בצע/י בדיקות קושיות לדגמי ג'ומיני לאורך הדגם. קבע/י את נקודת ההתחלה בקצה שלא נחתך.
19. בחן/י במיקרוסקופ אור את 3 הדגמים מסעיף 15. וודא/י שאת/ה מבין/ה את מיקרו-המבנים השונים. שים/י לב להגדלות בהן השתמשת ולטיפול התרמי של כל דגם.

sample	Type	Material	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
1	Grossman	4340	c 30 850 min	Quench in oil		
2	Grossman	4340	c 30 850 min	Quench in water		
3	Grossman	4340	c 30 850 min	Outside min 1:45	c 30 670 min	Quench in water
4	Grossman	4340	c 30 850 min	Outside min 1:45	c 90 670 min	Quench in water
5	Jominy	4340	c 30 850 min	Quench in water		
6	Grossman	1040	c 30 850 min	Quench in oil		
7	Grossman	1040	c 30 850 min	Quench in water		
8	Jominy	1040	c 30 850 min	Quench in water		

הציוד הדרוש לניסוי

4 דגמי גרוסמן 4340, 2 דגמי גרוסמן 1040, דגם ג'ומיני 4340, דגם ג'ומיני 1040, 2 תנורים בטמפ' C°850, תנור בטמפ' C°650, אמבט מים לחיסום, אמבט שמן לחיסום, דיסק חיתוך לדגמים, מתקן לניסוי ג'ומיני, ציוד לליטוש דגמים, מכשיר לבדיקת קושיות Rockwell C

6. נהלי המעבדה ודרישות מדוח מסכם 2020

חלוקת הציון:

בוהן כניסה - 30%, דוח מסכם - 70%.

הדוח המסכם יכלול:

- שער- על פי הכללים המפורסמים בהוראות הכלליות לדו"ח המפורטות במודל.
 - תוכן עניינים-מופרד לכותרות ראשיות ומשניות- יש להכין תוכן עניינים נפרד לטבלאות, איורים, תמונות וגרפים בהתאם לצורך.
 - תקציר - ע"פ הנחיות לכתיבת דוח מסכם, לא יותר מחצי עמוד. (10 נק')
 - מטרות- הקשורות למעבדה בלבד ולא מטרות כלליות. (2 נק')
 - תוצאות הניסוי ועיבודן –לפי חלקי הניסוי השונים: (30 נק')
 - הצגת את תוצאות מדידות הקושי בטבלה.
 - הכנת גרפים של תוצאות הקושי כפונקציה של מרחק המדידה (ג'ומיני וגרוסמן), תוצאות הקושי כפונקציה של זמן ההשהיה כאשר הדגם שחוסם מיד ירשם בזמן אפס.
 - הצגת תמונות מיקרוסקופ אור לכל דגם.
 - דיון בתוצאות (38 נק'):
 - הצגת הטיפולים שנעשו על גבי דיאגרמת TTT מתאימה.
 - השווה לעקומות קושי ספרותיות ונמק. בנוסף, יש לערוך השוואות בין ניסויי החיסום.
 - יש לקשור בין הקשיות למיקרומבנה המתקבל.
 - יש להסביר את סוגי הטיפול השונים ובמה הם משפיעים על התכונות המכאניות. יש להתייחס לתוצאות מעבדה בלבד.
 - מסקנות- עליהן להיגזר מתוך התוצאות ואין לרשום דברים כלליים שלא נבדקו בניסוי (נדרשת הסקת מסקנות עצמאית לתהליך החיסום) (10 נק').
 - ביבליוגרפיה- להקפיד על כללי כתיבת ביבליוגרפיה כפי שמוסבר בתדריך הכללי למעבדות ויש להסתמך על מקורות ספרותיים מהימנים (ספרים ומאמרים).
- דוח מסכם יוגש תוך שבועיים לתא של המדריך שהעביר את המעבדה.
- עבודה על פי כל כללי כתיבת דו"ח מסכם כפי שמופיע במודל, לרבות כתיבת תוכן עניינים, כותרות, מספור תמונות (גרפים וכו'), יחידות וביבליוגרפיה (10 נק').