

מעבדת ריתוך חשמלי

מטרת המעבדה :

מטרת המעבדה להעמיק ולהשלים את הידע המעשי בנושא ריתוך מתכות בהמשך לקורס העיוני של שנה ד' ומעבדה של שנה ב'. במסגרת המעבדה הסטודנטים יבחרו ויחשבו פרמטרים לריתוך בקשת חשמלית לפי תקנים בינלאומיים המקובלים בתעשייה. ירותכו 5 דגמים ממתכות שונות ב 3 שיטות ריתוך בקשת חשמלית, בשני סוגי אלקטרודה. יוכרו ויתנסו שיטות ריתוך המקובלות ביותר בתעשייה :

- אלקטרודה לא מתכלה (TIG)

- אלקטרודה מוזנת בסביבת גז מגן (MIG)

- אלקטרודה מצופה (SMAW)

תלמדנה הבעיות המעשיות של הכנת החומר לריתוך, בחירת פרמטרי הריתוך ובדיקתו בעזרת בדיקות לא הרסניות (NDT) לצורך איפיון פגמים בקו תפר הריתוך.

1. רקע תיאורי

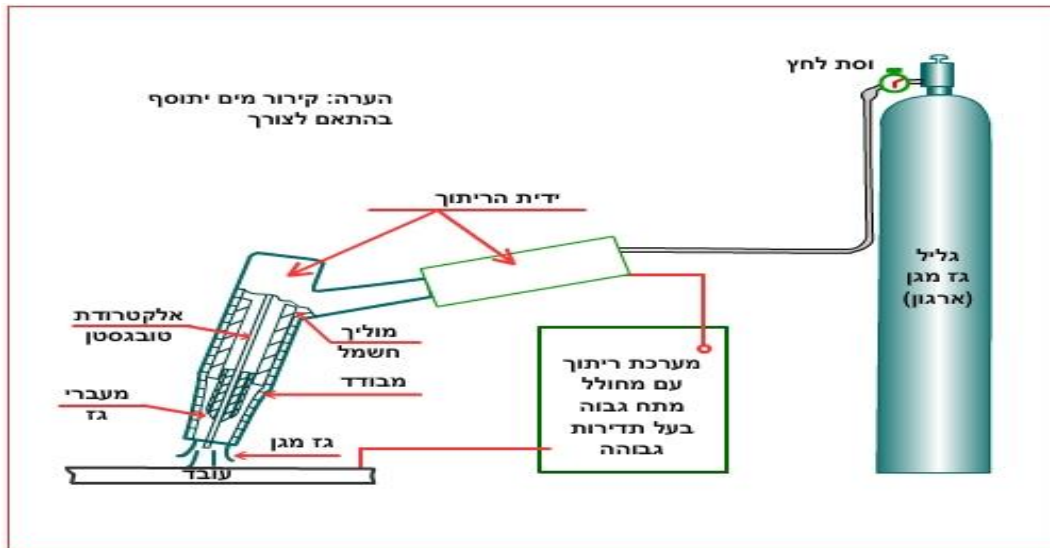
1.1. הכרת מערכות הריתוך

שיטת הריתוך המקובלת ביותר בתעשייה היא ריתוך בקשת חשמלית. שיטה זו מהווה למעשה קבוצת שיטות גדולה של ריתוכים, ביניהן ניתן למנות: אלקטרודה מצופה (SMAW), אלקטרודה לא מתכלה - TIG - (GTAW), MIG, ריתוך בפלסמה, ריתוך בקרן אלקטרוניים, ריתוך בקשת מכוסה (Submerged-Arc) ועוד.

עיקרון השיטה הוא מעגל חשמלי פתוח, הפועל בזרמים גבוהים (חום גבוה) ובמפל מתח נמוך, כאשר האלקטרון מהווה קוטב אחד והחומר לריתוך מהווה את הקוטב האחר. מרווח האוויר בין שני קצוות המעגל עובר יינון ומהווה את הקשת החשמלית שחומה מגיע לכמה אלפי מעלות.

1.1.1. ריתוך TIG (Tungsten -Inert-Gas Welding)

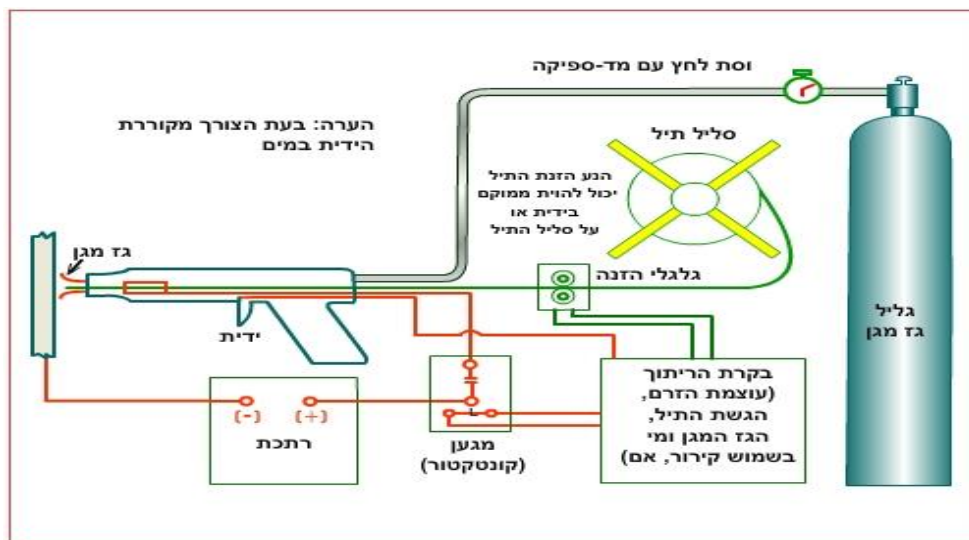
ההגנה מתבצעת באמצעות גז אינרטי (ארגון, הליום, מימן, חנקן או תערובת שלהם), היוצר מעטפת מגן לקשת ולאזור המותך. בריתוך זה האלקטרודה קבועה (non-consumable) ואינה משתתפת בתהליך. האלקטרודה עשויה בדרך כלל מטונגסטן ונתכיו.



איור 1- איור סכימטי של מערכת ריתוך TIG

1.1.2. ריתוך MIG (Metal-Inert-Gas Welding)

ריתוך בשיטה זו נעשה באמצעות אלקטרודה מתכלה (Consumable) בסביבת גז מגן. בשיטה זו מותכות המתכות על ידי קשת חשמלית הנוצרת ביניהן לבין קצה התיל (המתכת המוספת) המוזן ברציפות אל תוך הקשת. גז מגן, שאינו מגיב כימית עם המתכות המותכות, מוזרם סביב הקשת לגומת ההיתוך דרך ידיית הריתוך, דוחק את האטמוספירה ומאפשר ריתוך ללא פגמים. ניתן לרתך בשיטה זו מתכות שונות: פלדות, אל-חלד, אלומיניום, נחושת, סוגי ברונזה ועוד.

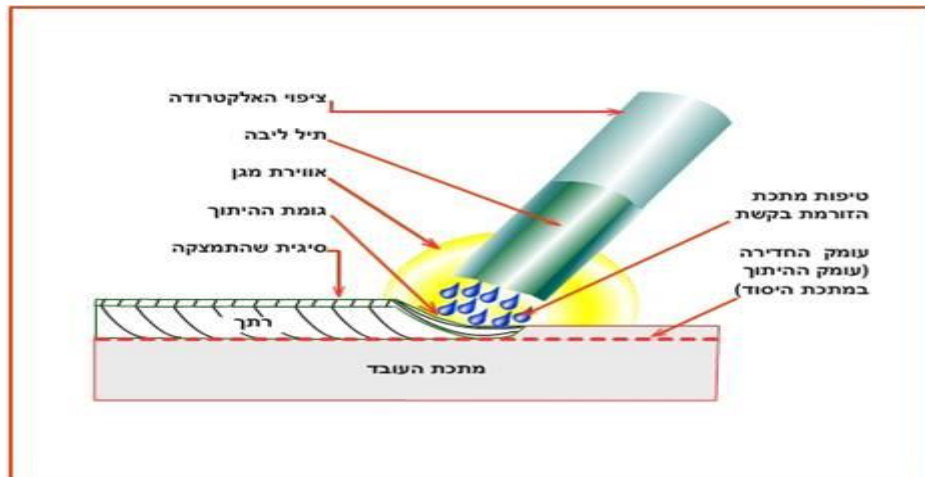


איור 2- איור סכימטי של מערכת ריתוך MIG

1.1.3. ריתוך באלקטרודה מצופה-SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

בריתוך מסוג זה, הגנת הקשת והחומר המותך מתבצעת באמצעות תערובת סיגים המצפה את האלקטרודה. במשטר הטמפרטורות הגבוה, ניתכים הסיגים ויוצרים ריאקציה כימית התורמת לניקוי פני השטח, לציפוי החומר המותך ולמניעת התמוססות גזי האטמוספירה במתכת.

הרכב האלקטרודה אינו בהכרח זהה להרכב החומר המרותך (מקובל להוסיף תוספות שונות לקבלת תפר בעל תכונות משופרות). הרכב זה נקבע אמפירית באמצעות מחקרים, בדומה לקביעת נתך בעל תכונות דרושות וזאת בידיעת משטר ההתמצקות והפאזות המתקבלות. גם הרכב הסיגים נקבע אמפירית.



איור 3- איור סכימטי של ריתוך באלקטרודה מצופה (SMAW)

בשל אופי השיטות, ריתוך TIG מתאים בעיקר לריתוך עוביים דקים וריתוכים מדויקים, בעוד שריתוך MIG מתאים במיוחד לריתוך עוביים גדולים ומשמש בתעשייה במקומות בהם נדרשים אורכי ריתוך גדולים ביותר.

הריתוך באלקטרודה מצופה מקובל בעיקר בעבודת מסגרות בהן אין דרישה גבוהה לאיכות הריתוכים.

1 Fusion Welding Processes **

Fusion welding processes will be described in this chapter, including gas welding, arc welding, and high-energy beam welding. The advantages and disadvantages of each process will be discussed.

1.1 OVERVIEW

1.1.1 Fusion Welding Processes

Fusion welding is a joining process that uses fusion of the base metal to make the weld. The three major types of fusion welding processes are as follows:

1. **Gas welding:**
 - Oxyacetylene welding (OAW)
2. **Arc welding:**
 - Shielded metal arc welding (SMAW)
 - Gas-tungsten arc welding (GTAW)
 - Plasma arc welding (PAW)
 - Gas-metal arc welding (GMAW)
 - Flux-cored arc welding (FCAW)
 - Submerged arc welding (SAW)
 - Electroslag welding (ESW)
3. **High-energy beam welding:**
 - Electron beam welding (EBW)
 - Laser beam welding (LBW)

Since there is no arc involved in the electroslag welding process, it is not exactly an arc welding process. For convenience of discussion, it is grouped with arc welding processes.

1.1.2 Power Density of Heat Source

Consider directing a 1.5-kW hair drier very closely to a 304 stainless steel sheet 1.6 mm ($\frac{1}{16}$ in.) thick. Obviously, the power spreads out over an area of roughly

4 FUSION WELDING PROCESSES

50 mm (2 in.) diameter, and the sheet just heats up gradually but will not melt. With GTAW at 1.5 kW, however, the arc concentrates on a small area of about 6 mm ($\frac{1}{4}$ in.) diameter and can easily produce a weld pool. This example clearly demonstrates the importance of the power density of the heat source in welding.

The heat sources for the gas, arc, and high-energy beam welding processes are a gas flame, an electric arc, and a high-energy beam, respectively. The power density increases from a gas flame to an electric arc and a high-energy beam. As shown in Figure 1.1, as the power density of the heat source increases, the heat input to the workpiece that is required for welding decreases. The portion of the workpiece material exposed to a gas flame heats up so slowly that, before any melting occurs, a large amount of heat is already conducted away into the bulk of the workpiece. Excessive heating can cause damage to the workpiece, including weakening and distortion. On the contrary, the same material exposed to a sharply focused electron or laser beam can melt or even vaporize to form a deep *keyhole* instantaneously, and before much heat is conducted away into the bulk of the workpiece, welding is completed (1).

Therefore, the advantages of increasing the power density of the heat source are deeper weld penetration, higher welding speeds, and better weld quality with less damage to the workpiece, as indicated in Figure 1.1. Figure 1.2 shows that the weld strength (of aluminum alloys) increases as the heat input per unit length of the weld per unit thickness of the workpiece decreases (2). Figure 1.3a shows that angular distortion is much smaller in EBW than in

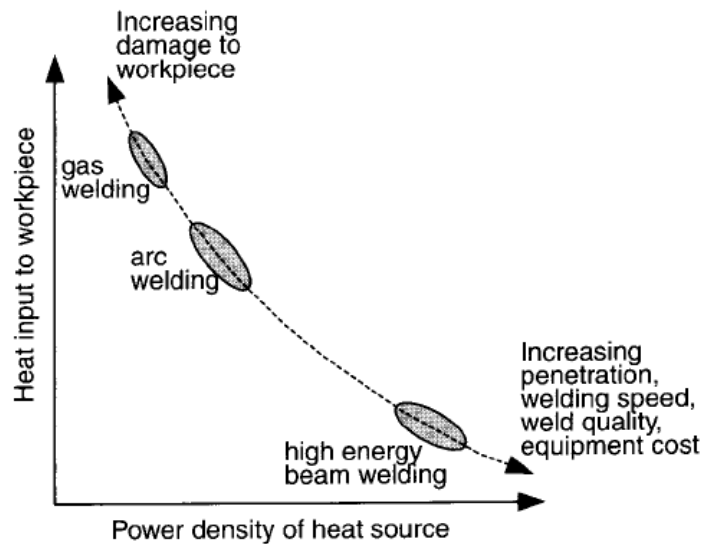


Figure 1.1 Variation of heat input to the workpiece with power density of the heat source.

TABLE 1.1 Overview of Welding Processes^a

Material	Thickness ^b	SMAW	SAW	GMAW	FCAW	GTAW	PAW	ESW	OFW	EBW	LBW
Carbon steels	S	X	X	X		X			X	X	X
	I	X	X	X	X	X			X	X	X
	M	X	X	X	X				X	X	X
	T	X	X	X	X			X	X	X	X
Low-alloy steels	S	X	X	X	X	X			X	X	X
	I	X	X	X	X	X			X	X	X
	M	X	X	X	X			X	X	X	X
	T	X	X	X	X			X	X	X	X
Stainless steels	S	X	X	X	X	X	X		X	X	X
	I	X	X	X	X	X	X		X	X	X
	M	X	X	X	X		X		X	X	X
	T	X	X	X	X		X	X	X	X	X
Cast iron	I	X							X		
	M	X	X	X	X				X		
	T	X	X	X	X				X		
Nickel and alloys	S	X		X		X	X		X	X	X
	I	X	X	X		X	X		X	X	X
	M	X	X	X		X	X		X	X	X
	T	X		X		X	X	X	X	X	X
Aluminum and alloys	S			X		X	X		X	X	X
	I			X		X	X		X	X	X
	M			X		X	X		X	X	X
	T			X		X	X		X	X	X

^a Process code: SMAW, shielded metal arc welding; SAW, submerged arc welding; GMAW, gas-metal arc welding; FCAW, flux-cored arc welding; GTAW, gas-tungsten arc welding; PAW, plasma arc welding; ESW, electroslag welding; OFW, oxyfuel gas welding; EBW, electron beam welding; LBW, laser beam welding.

^b Abbreviations: S, sheet, up to 3 mm ($1/8$ in.); I, intermediate, 3–6 mm ($1/8$ – $1/4$ in.); M, medium, 6–19 mm ($1/4$ – $3/4$ in.); T, thick, 19 mm ($3/4$ in.) and up; X, recommended.

Source: *Welding Handbook* (3).

17 Transformation-Hardening Materials: Carbon and Alloy Steels

Carbon and alloy steels are more frequently welded than any other materials because of their widespread applications and good weldability. In general, carbon and alloy steels with higher strength levels are more difficult to weld because of the risk of hydrogen cracking. Table 17.1 summarizes some typical welding problems in carbon and alloy steels and their solutions. The problems associated with the fusion zone and the partially melted zone have been discussed in previous chapters. This chapter deals with basic HAZ phenomena in selected carbon and low-alloy steels.

17.1 PHASE DIAGRAM AND CCT DIAGRAMS

The HAZ in a carbon steel can be related to the *Fe-C phase diagram*, as shown in Figure 17.1, if the kinetic effect of rapid heating during welding on phase transformations is neglected. The HAZ can be considered to correspond to the area in the workpiece that is heated to between the lower critical temperature A_1 (the eutectoid temperature) and the peritectic temperature. Similarly, the PMZ can be considered to correspond to the areas between the peritectic temperature and the liquidus temperature, and the fusion zone to the areas above the liquidus temperature.

The Fe-C phase diagram and the *continuous-cooling transformation (CCT) diagrams* for heat treating carbon steels can be useful for welding as well, but some fundamental differences between welding and heat treating should be recognized. The thermal processes during the welding and heat treating of a carbon steel differ from each other significantly, as shown in Figure 17.2. First, in welding the peak temperature in the HAZ can approach 1500°C. In heat treating, however, the maximum temperature is around 900°C, which is not much above the upper critical temperature A_3 required for austenite (γ) to form. Second, the heating rate is high and the retention time above A_3 is short during most welding processes (electroslag welding being a notable exception). In heat treating, on the other hand, the heating rate is much slower and the retention time above A_3 is much longer. The A_1 and A_3 temperatures during heating (chauffage) are often referred to as the Ac_1 and Ac_3 temperatures, respectively.

TABLE 17.1 Typical Welding Problems and Practical Solution in Carbon and Alloy Steels, and Their Locations in the Text

Typical Problems	Alloy Types	Solutions	Locations
Porosity	Carbon and low-alloy steels	Add deoxidizers (Al, Ti, Mn) in filler metal	3.2 3.3
Hydrogen cracking	Steels with high carbon equivalent	Use low-hydrogen or austenitic stainless steel electrodes Preheat and postheat	3.2 17.4
Lamellar tearing	Carbon and low-alloy steels	Use joint designs that minimize transverse restraint Butter with a softer layer	17.6
Reheat cracking	Corrosion and heat-resisting steels	Use low heat input ^a to avoid grain growth Minimize restraint and stress concentrations Heat rapidly through critical temperature range, if possible	17.5
Solidification cracking	Carbon and low-alloy steels	Keep proper Mn/S ratio	11.4
Low HAZ toughness due to grain growth	Carbon and low-alloy steels	Use carbide and nitride formers to suppress grain growth Use low heat input ^a	17.2 17.3
Low fusion-zone toughness due to coarse columnar grains	Carbon and low-alloy steels	Grain refining Use multipass welding to refine grains	7.6 17.2

^a Low heat input processes (GMAW and SMAW vs. SAW and ESW) or multipass welding with low heat input in each pass.

For kinetic reasons the A_{c1} and A_{c3} temperatures tend to be higher than the equilibrium A_1 and A_3 temperatures, respectively, and they tend to increase with increasing heating rate during welding (1, 2). Kinetically, phase transformations require diffusion (the transformation to martensite is a well-known exception) and diffusion takes time. Consequently, upon rapid heating during welding, phase transformations may not occur at the equilibrium A_1 and A_3 temperatures but at higher temperatures A_{c1} and A_{c3} . For steels containing greater amounts of carbide-forming elements (such as V, W, Cr, Ti, and Mo),

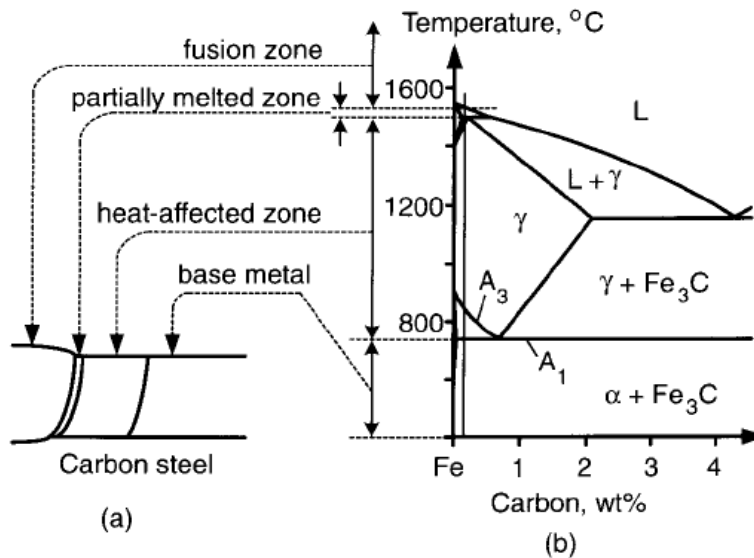


Figure 17.1 Carbon steel weld: (a) HAZ; (b) phase diagram.

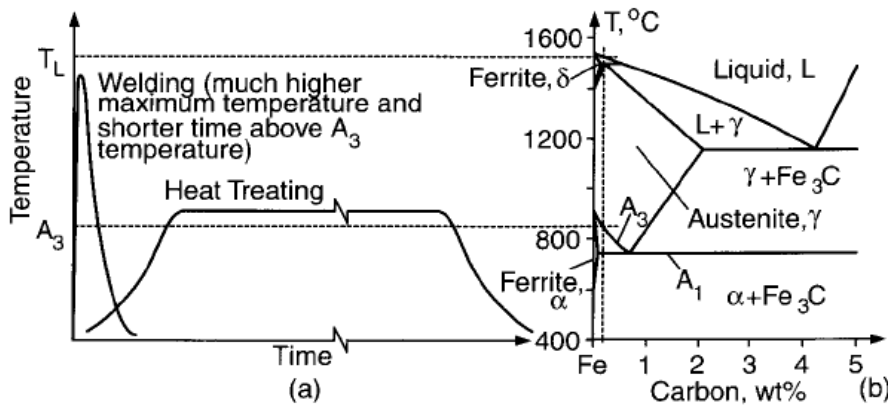


Figure 17.2 Comparison between welding and heat treating of steel: (a) thermal processes; (b) Fe-C phase diagram.

the effect of the heating rate becomes more pronounced. This is because the diffusion rate of such elements is orders of magnitude lower than that of carbon and also because they hinder the diffusion of carbon. As a result, phase transformations are delayed to a greater extent.

The combination of high heating rates and short retention time above A_3 in welding can result in the formation of inhomogeneous austenite during heating. This is because there is not enough time for carbon atoms in austenite to diffuse from the prior pearlite colonies of high carbon contents to prior ferrite colonies of low carbon contents. Upon rapid cooling, the former can

transform into high-carbon martensite colonies while the latter into low-carbon ferrite colonies. Consequently, the microhardness in the HAZ can scatter over a wide range in welds made with high heating rates.

As a result of high peak temperatures during welding, grain growth can take place near the fusion boundary. The slower the heating rate, the longer the retention time above A_{c3} is and hence the more severe grain growth becomes. In the heat treating, however, the maximum temperature employed is only about 900°C in order to avoid grain growth.

The CCT diagrams (Chapter 9) for welding can be obtained by using a weld thermal simulator (Chapter 2) and a high-speed dilatometer that detects the volume changes caused by phase transformations (3–6). However, since CCT diagrams for welding are often unavailable, those for heat treating have been used. These two types of CCT diagrams can differ from each other because of kinetic reasons. For instance, grain growth in welding can shift the CCT diagram to longer times favoring transformation to martensite. This is because grain growth reduces the grain boundary area available for ferrite and pearlite to nucleate during cooling. However, rapid heating in welding can shift the CCT diagram to shorter times, discouraging transformation to martensite. *Carbide-forming elements* (such as Cr, Mo, Ti, V, and Nb), when they are dissolved in austenite, tend to increase the hardenability of the steel. Because of the sufficient time available in heat treating, such carbides dissolve more completely and thus enhance the hardenability of the steel. This is usually not possible in welding because of the high heating rate and the short high-temperature retention time encountered in the HAZ (7).

17.2 CARBON STEELS

According to the American Iron and Steel Institute (AISI), carbon steels may contain up to 1.65 wt % Mn, 0.60 wt % Si, and 0.60 wt % Cu in addition to much smaller amounts of other elements. This definition includes the *Fe-C steels* of the 10XX grades (up to about 0.9% Mn) and the *Fe-C-Mn steels* of the 15XX grades (up to about 1.7% Mn). The last two digits in the alloy designation number denote the nominal carbon content in weight percent, for instance, about 0.20% C in a 1020 and about 0.41% C in a 1541 steel. Manganese is an inexpensive alloying element that can be added to carbon steels to help increase hardenability.

17.2.1 Low-Carbon Steels

These steels, in fact, include both carbon steels with up to 0.15% carbon, called low-carbon steels, and those with 0.15–0.30% carbon, called mild steels (8). For the purpose of discussion 1018 steel, which has a nominal carbon content of 0.18%, is used as an example. Figure 17.3 shows the micrographs of a gas-tungsten arc weld of 1018 steel. The base metal consists of a light-etching

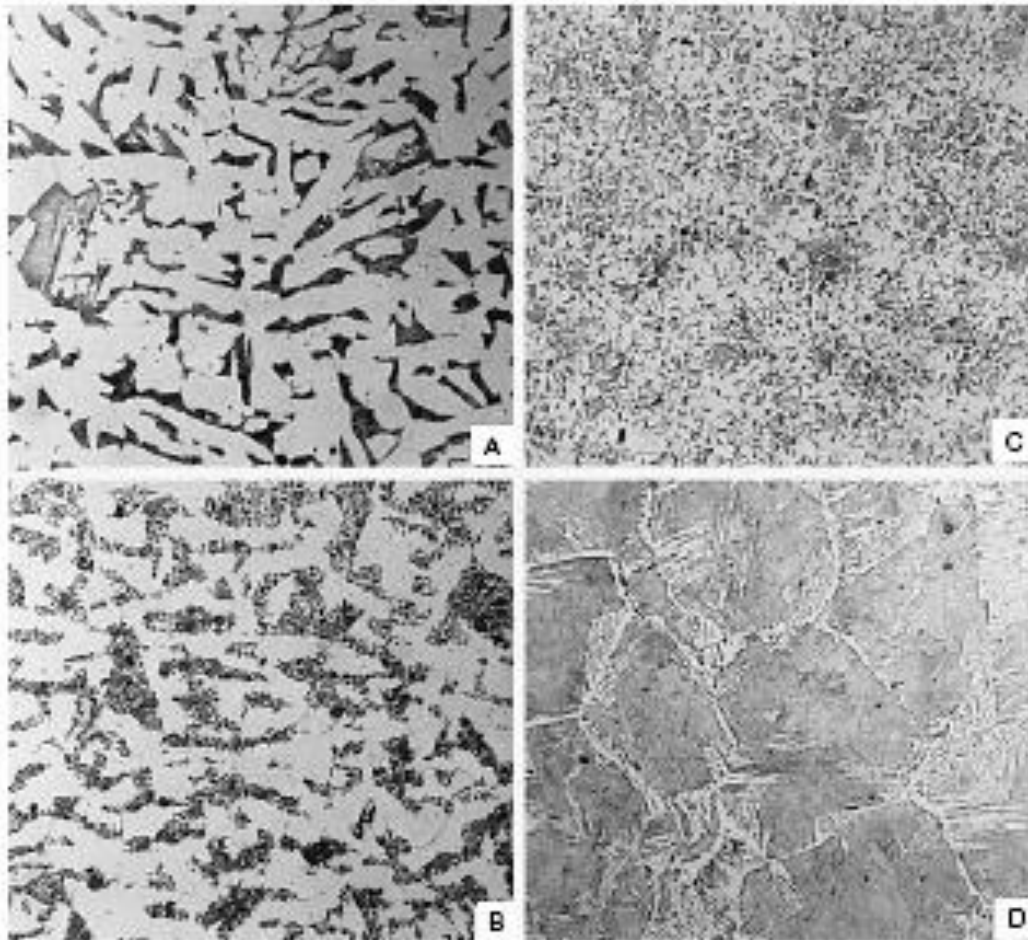
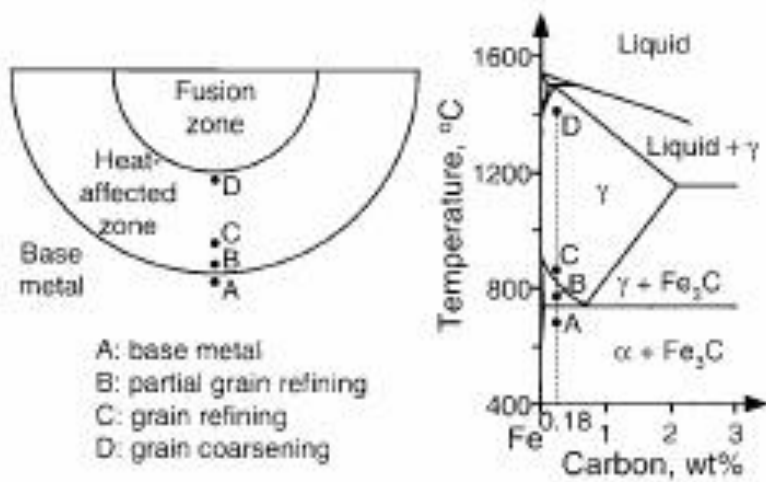


Figure 17.3 HAZ microstructure of a gas-tungsten arc weld of 1018 steel (magnification 200 \times).

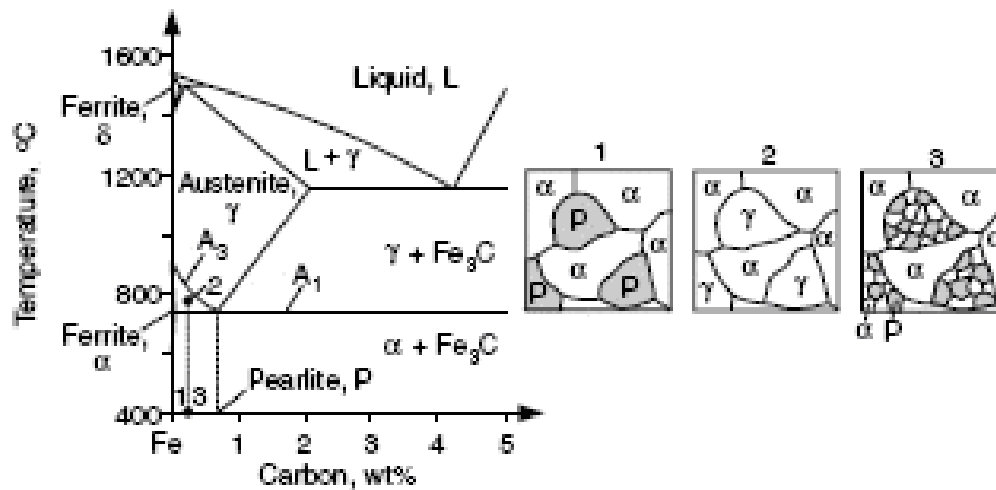


Figure 17.4 Mechanism of partial grain refining in a carbon steel.

ferrite and a dark-etching pearlite (position A). The HAZ microstructure can be divided into essentially three regions: partial grain-refining, grain-refining, and grain-coarsening regions (positions B–D). The peak temperatures at these positions are indicated in the phase diagram.

The *partial grain-refining region* (position B) is subjected to a peak temperature just above the effective lower critical temperature, A_{c1} . As explained in Figure 17.4, the prior pearlite (P) colonies transform to austenite (γ) and expand slightly into the prior ferrite (F) colonies upon heating to above A_{c1} and then decompose into extremely fine grains of pearlite and ferrite during cooling. The prior ferrite colonies are essentially unaffected. The *grain-refining region* (position C) is subjected to a peak temperature just above the effective upper critical temperature A_{c3} , thus allowing austenite grains to nucleate. Such austenite grains decompose into small pearlite and ferrite grains during subsequent cooling. The distribution of pearlite and ferrite is not exactly uniform because the diffusion time for carbon is limited under the high heating rate during welding and the resultant austenite is not homogeneous. The *grain-coarsening region* (position D) is subjected to a peak temperature well above A_{c3} , thus allowing austenite grains to grow. The high cooling rate and large grain size encourage the ferrite to form side plates from the grain boundaries, called the Widmanstätten ferrite (9).

Grain coarsening near the fusion boundary results in coarse columnar grains in the fusion zone that are significantly larger than the HAZ grains on the average. As shown in Figure 17.5, in multiple-pass welding of steels the fusion zone of a weld pass can be replaced by the HAZs of its subsequent passes (10). This grain refining of the coarse-grained fusion zone by multiple-pass welding has been reported to improve the weld metal toughness.

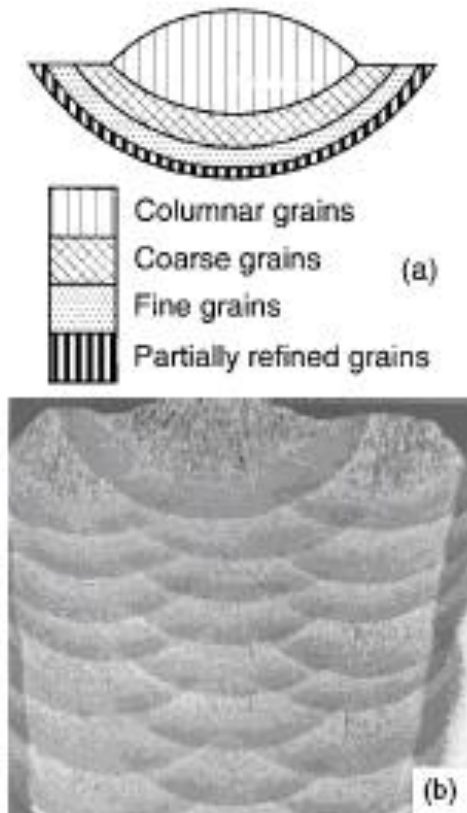


Figure 17.5 Grain refining in multiple-pass welding: (a) single-pass weld; (b) microstructure of multiple-pass weld. Reprinted from Evans (10). Courtesy of American Welding Society.

2. מהלך הניסוי

2.1. ריתוך בשיטת-TIG - Gas Tungsten Arc Welding

הפעל את מכונת הריתוך וכוון אותה לפי הפרמטרים שנבחרו. הצמד בעזרת מתקן עזר את שני לוחות הפלב"מ 304. התקרב לדגם עם ידית הריתוך למרחק 2-3 מ"מ ולחץ על הדוושה שמפעילה את המכונה. רתך שני נקודות על הפלדה – אחת המתברת בין שני הלוחות בחלקם העליון ואחת בחלקם התחתון. יש לרתך בתנועה ישרה ובזווית של 70° מעלות את קו התפר שבין שני הלוחות. "דוחפים" את אמבט הריתוך. על מנת לסיים את הריתוך, הורד את הרגל מהדוושה, המתן 15 שניות עד להפסקת זרימת הגז והרם את ידית הריתוך.

חזור על שלבים אלו עבור שני לוחות נחושת ושנה את הפרמטרים בהתאם. החלף את האלקטרודה לאלקטרודה לריתוך בזרם חילופין. חזור על השלבים לעיל עבור שני לוחות אלומיניום. הגדר במכונה את הפרמטרים המתאימים. שנה את התדר בתום כל שליש מאורכו של הדגם.

2.2. ריתוך בשיטת -MIG Metal-Inert-Gas Welding

הפעל את מכונת הריתוך והגדר את הפרמטרים המתאימים. קח שני לוחות הפלדה הצמד אותם יחד, וחברם בקצותיהם. במהלך הריתוך, האלקטרודה מוזנת דרך הידית. על מנת להתחיל את ההזנה, יש לקרב את הידית אל הדגם וללחוץ על ההדק. לחיצה נוספת תעצור את ההזנה. רתך בתנועה ישרה ובזווית של 70° את קו התפר שבין שני הלוחות – כיוון התנועה הוא –"מושכים" את אמבט הריתוך.

2.3. ריתוך בשיטת-SMAW - Shielded Metal Arc Welding

הפעל את המכונה וכוון את כל הפרמטרים שנבחרו עבור ריתוך בשיטה זו. חבר את האלקטרודה שנבחרה לידיית הריתוך. הצמד שני לוחות פלדה 1020 על שולחן העבודה וטרם תחילת הריתוך חמם את האלקטרודה על ידי נגיעה בשולחן העבודה. לפעולה זו ישנה חשיבות רבה, יש צורך בהוצאת גזי החמצן והמימן מציפוי האלקטרודה וניקוי פני השטח שלה. החזק את ידית הריתוך קרוב לדגם במרחק בו תיווצר קשת חשמלית בין האלקטרודה והדגם. חבר שני חיבורים קצרים (פיקים) בקצוות הדגם כדי למנוע את הגדלת הרווח בין הלוחות בזמן הריתוך. חשוב: במהלך הריתוך יש להישאר קרוב לדגם מכיוון שהאלקטרודה מתכלה ויש צורך לקרב כל הזמן את ידית הריתוך אל הדגם. רתך בתנועה סיבובית ובזווית של 70° את קו התפר שבין שני הלוחות – "מושכים" את אמבט הריתוך. הפוך את הדגם, במידה ואין חדירה מלאה, יש לרתך אותו מצדו השני.

2.4. בדיקת תפר הריתוך

בצע בדיקת צבעים חודרים לתפר הריתוך בדגם הנחושת. שלבי הבדיקה:

1. הכנת פני השטח- זהו השלב הקריטי ביותר בתהליך. על פני השטח להיות נקיים משמן, גריז, מים וכדומה, מאחר וחומרים אלו עלולים לפגוע בזרימת הנוזל.
2. צביעה- טבול, צבע או פזר באמצעות ספריי את הצבע (penetrant) על החלק הרצוי.

- השהייה- השהה את החלק הצבוע לפרק זמן המאפשר את חדירת הצבע לפגם.
3. שטיפה- זהו השלב החשוב ביותר בתהליך. הסר את הצבע שלא חדר לפני השטח.
4. מפתח (Developer)- התז אבקה עדינה ויבשה על החלק או טבול אותו בתרחיף של האבקה.
- השהייה- תוך זמן קצר צפוי המפתח להיצבע בצבע שנשאב מפגמים.
5. בדיקה- התבונן באור נראה או באור UV בשטח שנחשף לצבע.
- ניקוי- הסר את המפתח והצבע מפני השטח.

3. ביבליוגרפיה:

1. Sindo Kou, "Welding metallurgy", Wiley, 2003, p.3 -7, 393-401 (TS 227 K649).
2. "Metals Handbook", 10th ed., ASM , Vol. 6 , Welding, 1990 (TA 459 A5).
3. "Welding Handbook", AWS, Macmillan Press Ltd. London, 2001 (TS 227. W455).
4. "Modern Welding", Andrew D.Althouse, 1997 (TS 227, A369).
5. Welding technology fundamentals / William A.Bowditch, 1997 (TS 227.B69).
6. Joining processes : an introduction / David Brandon, 1997, p. 141-217 (TA 418.7 B67).
7. <http://www.aws.org/w/a/>.