



**ESDEP**

**GROUPE DE TRAVAIL 3**

**FABRICATION ET MONTAGE**

**Leçon 3.3**

**Principes du Soudage**



## OBJECTIF

Donner une vue globale des conséquences de la réalisation des assemblages par soudage.

## RESUME

Cette leçon décrit les principes de base qui entrent en jeu dans la réalisation d'un assemblage par soudage. Elle évoque la structure et les propriétés à la fois du métal de soudure et de la zone thermiquement affectée. Elle explique le besoin d'avoir des préparations de surface pour le soudage bout-à-bout et donne des exemples des différents types utilisés. Elle esquisse la manière dont on peut faire varier les modes opératoires de soudage pour répondre au besoin d'un assemblage particulier à réaliser.

## ABREVIATIONS

- MAG soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec avec fil-électrode fusible (Metal Active Gaz) (parfois appelé soudage MIG - Metal Inert Gaz : soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec fil-électrode fusible)
- MMA soudage manuel avec électrode enrobée (Manual Metal Arc Welding)
- SAW soudage à l'arc sous flux en poudre (Submerged Arc Welding)
- HAZ zone affectée thermiquement ZAT (en anglais : Heat Affected Zone)

# 1. INTRODUCTION

Le soudage offre un moyen de faire des assemblages métalliques continus, capables de transmettre des charges entre les composants d'une structure.

## 2. TYPES DE JOINT

Sur les structures, on trouve une grande variété de joints soudés : ils sont fabriqués à partir des quatre configurations de base représentées [figure 1](#) que l'on peut classer de la manière suivante :

- joints bout-à-bout.
- joints en T.
- assemblages à recouvrement.
- joints en angle.

### 3. METHODES DE REALISATION D'UN JOINT SOUDE

Comme on peut le voir sur la [figure 2](#), un joint soudé s'obtient en faisant fondre des plats en acier ou des profilés (métal de base) le long de la ligne du joint. Le métal fondu provenant de chaque élément est réuni au niveau du joint dans un bain de métal fondu qui comble l'interface. Au fur et à mesure que le bain de fusion se refroidit, le métal fondu qui se trouve à la limite de fusion se solidifie, formant un lien solide avec le métal de base, comme on le voit sur la [figure 3](#). Quand la solidification est totale, il y a continuité du métal à travers le joint.

Deux types de soudure sont d'usage commun : les soudures bout-à-bout et les cordons d'angle. Dans le premier cas, le métal fondu est généralement celui du profilé des éléments à souder ; dans le second le métal fondu déposé est extérieur aux éléments à souder.

Bien évidemment, on ne peut pas faire en même temps toute la longueur du joint. En pratique, la source de chaleur utilisée pour fondre une petite surface est ensuite déplacée le long de la ligne du joint, faisant fondre progressivement le métal de base sur le bord avant du bain de fusion, comme on le voit sur la [figure 4](#). Au même moment, le métal du bord arrière du bain de fusion se solidifie. La source de chaleur le plus souvent utilisée, pour des travaux sur des structures est constituée d'un arc de faible voltage (15 à 35 V), d'intensité élevée (50 à 1 000 A). Comme on le voit sur le schéma de la [figure 5](#), l'arc se développe entre le bout de l'électrode en acier (barreau) et la pièce à souder ; il fait fondre à la fois le métal de base et l'électrode ; le métal fondu provenant de l'électrode est ainsi ajouté au bain de fusion.

L'acier fondu du bain de fusion absorbe volontiers l'oxygène et l'azote de l'air, ce qui peut rendre poreuse la soudure solidifiée et conduire éventuellement à des problèmes métallurgiques. La [figure 6](#) montre comment on peut éviter ceci en couvrant le bain avec un flux en fusion, comme dans le soudage à l'arc manuel et le soudage à l'arc sous flux en poudre ou en remplaçant l'air autour de l'arc par un gaz inerte, comme dans le soudage MAG ou le soudage par électrode enrobée.

## 4. STRUCTURE ET PROPRIETES DES SOUDURES

Le métal fondu solidifié a une structure de matériau moulé et des propriétés caractéristiques de l'acier coulé, c'est-à-dire un rapport de la limite élastique à la résistance ultime plus grand que celui de l'acier de structure. Le métal fondu est un mélange de métal de base et d'acier fondu provenant de l'électrode. Pour l'acier de structure, la composition de l'électrode est choisie d'habitude de telle sorte que le métal fondu qui en résulte soit plus résistant que les éléments à assembler. Éventuellement, des conditions particulières peuvent passer outre ce choix. Par exemple, quand on veut assembler de l'acier inoxydable et de l'acier au carbone-manganèse, on doit utiliser une électrode en acier hautement allié afin d'éviter les fissures dans le métal fondu.

Quand le bain de fusion se refroidit et se solidifie, la plus grande partie de la chaleur s'écoule à travers le métal de base le long du joint. L'acier est alors soumis à des cycles d'élévation de température et de refroidissement, analogues à ceux conférés par un traitement thermique. Comme on le voit sur la [figure 7](#), dans cette zone, la structure de l'acier est modifiée (appelée zone thermiquement affectée, ZTA). Ceci doit être pris en compte dans la conception, en termes de résilience (valeur de Charpy)...

Le contrôle de la ZTA se fera par :

- la composition de l'acier (équivalent carbone).
- la vitesse de refroidissement de la ZTA.

A son tour, la vitesse de refroidissement est déterminée par :

- l'énergie de l'arc, c'est-à-dire l'énergie linéaire de soudage sur le joint.
- le type de joint.
- l'épaisseur de l'acier.
- la température du plat ou du profilé avant le soudage, par exemple le préchauffage.

Une méthode de détermination de l'interaction de ces différents facteurs, afin d'éviter l'apparition des fissures dans la zone thermiquement affectée (ZTA), est donnée sur le diagramme représenté [figure 8](#).

En plus de son effet sur la vitesse de refroidissement, on utilise le préchauffage pour :

- Disperser l'hydrogène du bain de fusion et de la zone ZTA. La présence d'hydrogène dans la ZTA augmente le risque de fissure s'il y a trempe. L'hydrogène provient principalement du flux. Une électrode appropriée, stockée correctement, peut réduire le risque d'absorption de l'hydrogène.
- Enlever l'humidité de surface dans des conditions d'hygrométrie élevée ou sur le chantier.

- Amener l'acier à des conditions ambiantes normales (20°C).

## 5. PREPARATION DES BORDS EN VUE DE SOUDAGES BOUT-A-BOUT

Pour des préparations à angles droits, la profondeur de fusion dans la plaque est appelée Profondeur de Pénétration, voir [figure 9a](#). En gros, la pénétration est d'environ 1 mm pour 100 A. En soudage manuel, la valeur courante n'est d'habitude jamais supérieure à 350 A ; plus souvent 150-200 A. Ceci veut dire que le bord de la plaque doit être recoupé le long de la ligne du joint si on veut avoir continuité de l'épaisseur ([figure 9b](#)). La gorge ainsi formée est ensuite remplie de métal fondu en provenance de l'électrode ([figure 9c](#)). Il existe différentes formes de bords, représentées [figure 10](#) ; les bords peuvent être plans, sciés, tranchés ou découpés au chalumeau.

La première passe du cordon déposé au fond de la gorge est appelée cordon racine. Les faces racines peuvent être fondues afin d'assurer une bonne pénétration, mais en même temps, le bain de fusion doit être contrôlé afin d'éviter son affaissement, comme on le voit [figure 11](#). Ce travail requiert une compétence considérable. Les difficultés peuvent être réduites par l'utilisation d'un support de soudage à l'envers.

Le choix d'une préparation de bord dépend :

- du type de traitement.
- de la position de soudage ([figure 12](#)).
- de l'accès pour l'arc et l'électrode.
- du volume de métal de soudure déposé qui devrait être réduit au minimum.
- du coût de préparation des bords.
- du retrait et de la déformation ([figure 13](#)).



## 6. MODE OPERATOIRE DE SOUDAGE

Le terme de mode opératoire de soudage est utilisé pour décrire le processus complet qui intervient dans la fabrication d'une soudure. Il recouvre le choix de l'électrode, la préparation des bords, le préchauffage, les paramètres de soudage (voltage, ampérage et vitesse d'avance), la position de soudage, le nombre de passes pour remplir la gorge et les traitements postsoudage, par exemple le meulage ou le traitement thermique. Les modes opératoires de soudage peuvent être élaborés pour répondre à différents besoins, par exemple pour réduire les coûts, contrôler la déformation, éviter les défauts ou avoir de bonnes propriétés aux chocs. Des aspects spécifiques du mode opératoire de soudage nécessitent des commentaires détaillés.

### 6.1 Intensité du courant

L'intensité du courant contrôle l'énergie linéaire de soudage. La valeur minimale est déterminée par la nécessité de fondre la plaque et de conserver l'arc stable ; le minimum spécifié peut, cependant, être plus élevé pour éviter les fissures de la ZTA. Le courant maximum dépend des conditions d'opération. D'habitude, plus le courant est élevé, plus la soudure peut être réalisée rapidement, d'où des coûts moins élevés. L'utilisation d'un courant maximum peut être restreint par la position ; en position plafond, par exemple, on ne peut pas utiliser d'intensités supérieures à 160 A. Des intensités élevées donnent habituellement de faibles propriétés aux chocs. Il faut noter que l'intensité utilisée est choisie en correspondance avec le diamètre de l'électrode.

### 6.2 Position de soudage

On a déjà noté ci-dessus l'effet de la position sur l'intensité du courant. Souder en position plafond requiert une grande compétence pour éviter les défauts, comme par exemple une coupe de mauvaise qualité et ne devrait être utilisé qu'en cas d'absolue nécessité. Le soudage en corniche est plus lent qu'à plat, mais requiert moins de compétence qu'un soudage au plafond.

### 6.3 Environnement

S'il est nécessaire d'effectuer du soudage sur site, il faut prendre en compte les points suivants :

- par temps froid, il peut être nécessaire de réchauffer l'acier pour l'amener à une température de 20°C.
- la condensation nocturne et une humidité élevée peuvent conduire à la présence de porosité.
- il faut prendre soin de s'assurer que les électrodes sont conservées au sec.

- il est souvent difficile de réaliser un accostage précis du joint ; des écarts variables, et/ou importants peuvent donner lieu à des soudures comportant des défauts, des déformations et des prix plus élevés.

## 7. RETRAIT

Pendant le refroidissement, le métal chaud à l'intérieur de la zone de soudage se contracte, amenant du retrait dans le joint. La contraction est gênée par le métal froid qui entoure le joint ; les contraintes qui se développent, supérieures à la limite élastique, créent des déformations plastiques. Ceci peut conduire à une déformation ou à du flambement, comme on le voit sur la [figure 13](#). La déformation peut être réduite par le choix d'une préparation de bord et d'un mode opératoire de soudage ; on en voit des exemples sur la [figure 14](#).

Quand la déformation plastique cesse, il reste sur le joint un diagramme de contraintes résiduelles représenté [figure 15](#), avec de la traction dans le métal fondu et dans la ZTA et de la compression dans l'acier tout autour. On étudiera la signification de ces contraintes résiduelles dans d'autres leçons.

## 8. CONCLUSION

- On obtient un joint soudé en faisant fondre le métal de base des deux composants à relier, avec, de façon courante, un apport de métal de soudure.
- Les propriétés, à la fois du métal de soudure qui a été fondu, puis s'est solidifié et de la zone thermiquement affectée environnante peuvent différer de celles du métal de base.
- Les modes opératoires de soudage doivent être spécifiés correctement afin de donner un joint soudé satisfaisant. Les paramètres les plus importants sont : la position de soudage, le type d'électrode, la préparation de bord, le préchauffage, voltage, l'intensité, la vitesse d'avance, le nombre de passes et les traitements thermiques postsoudage.
- Le métal chaud de la zone de soudage se contracte pendant le refroidissement, ce qui donne lieu à des contraintes résiduelles. Il y aura des déformations si on n'effectue pas un contrôle approprié.

## 9. LECTURES COMPLEMENTAIRES

1. Hicks, J. "*Welding Design*", Granada.
  - détails des joints et des soudures.
  - résistance des joints soudés.
  - effets du soudage sur des structures métallurgiques, zones thermiquement affectées, fissuration de la ZTA.
  - préparation de bord.
  - positions de soudage - définitions et remarques.
2. Gourd, L. M. "*Principles of Welding Technology*", Edward Arnold, 1980.
  - formation de la soudure.
  - types de sources de chaleur.
  - résistance des joints soudés.
  - effets du soudage sur des structures métallurgiques, zones thermiquement affectées, fissuration de la ZTA.
  - préparation de bord.
  - commentaires sur les contraintes résiduelles.
  - contrôle de la déformation.
3. Milner, D.R. et Apps, R. L. "*Introduction to Welding and Brazing*", Pergamon.
  - effets du soudage sur des structures métallurgiques, zones thermiquement affectées, fissuration de la ZTA.
  - contrôle des déformations.
4. Pratt, J.L. "*Introduction to the Welding of Structural Steelwork*", Steel Construction Institute - Publication n°14.
5. British Standard BS 5135 : 1986, "*Metal Arc Welding of Carbon and Carbon Manganese Steels*", British Standards Institution, London.

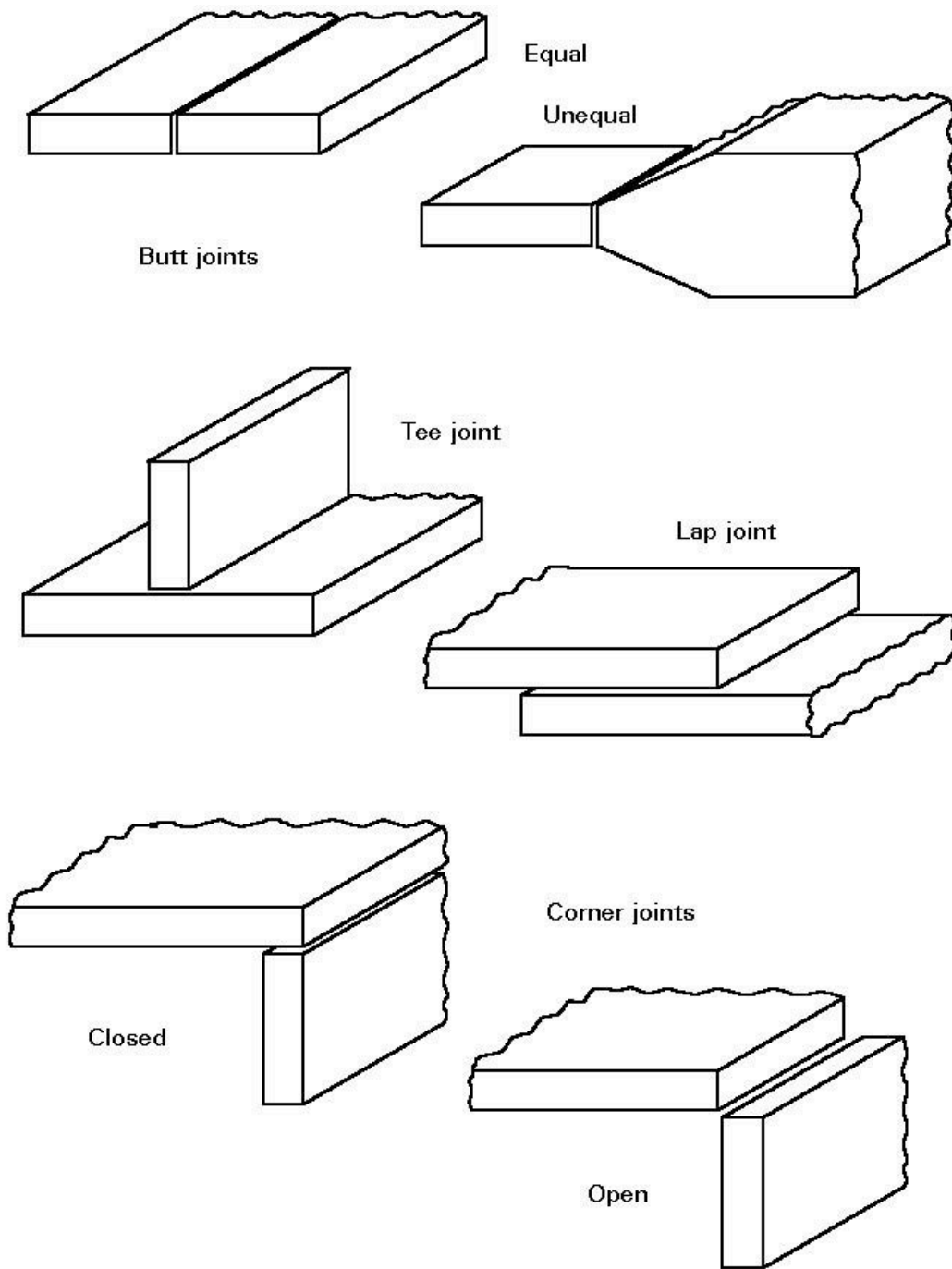
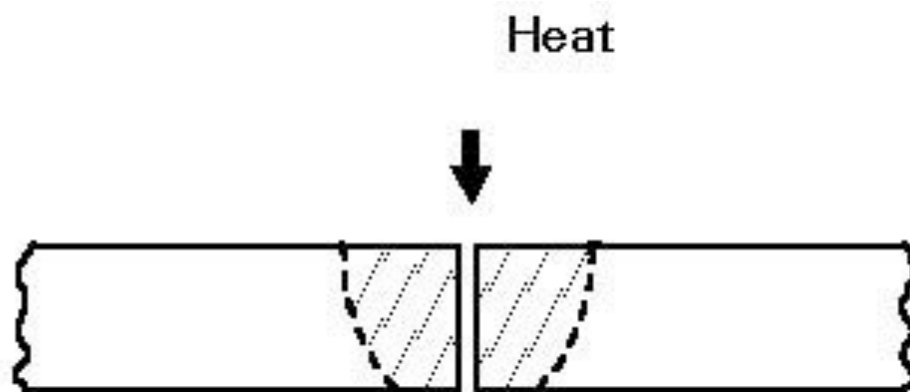
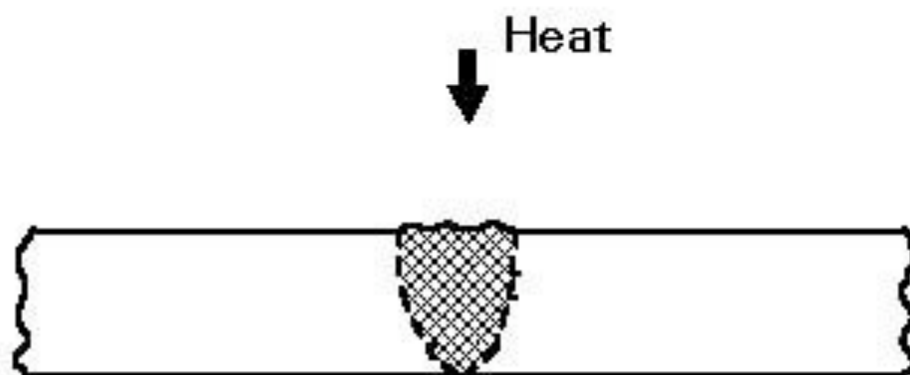


Figure 1 Types of joint



Edges of joint raised  
to melting point



Molten steel unites  
to form weld pool

Figure 2 Formation of a weld pool

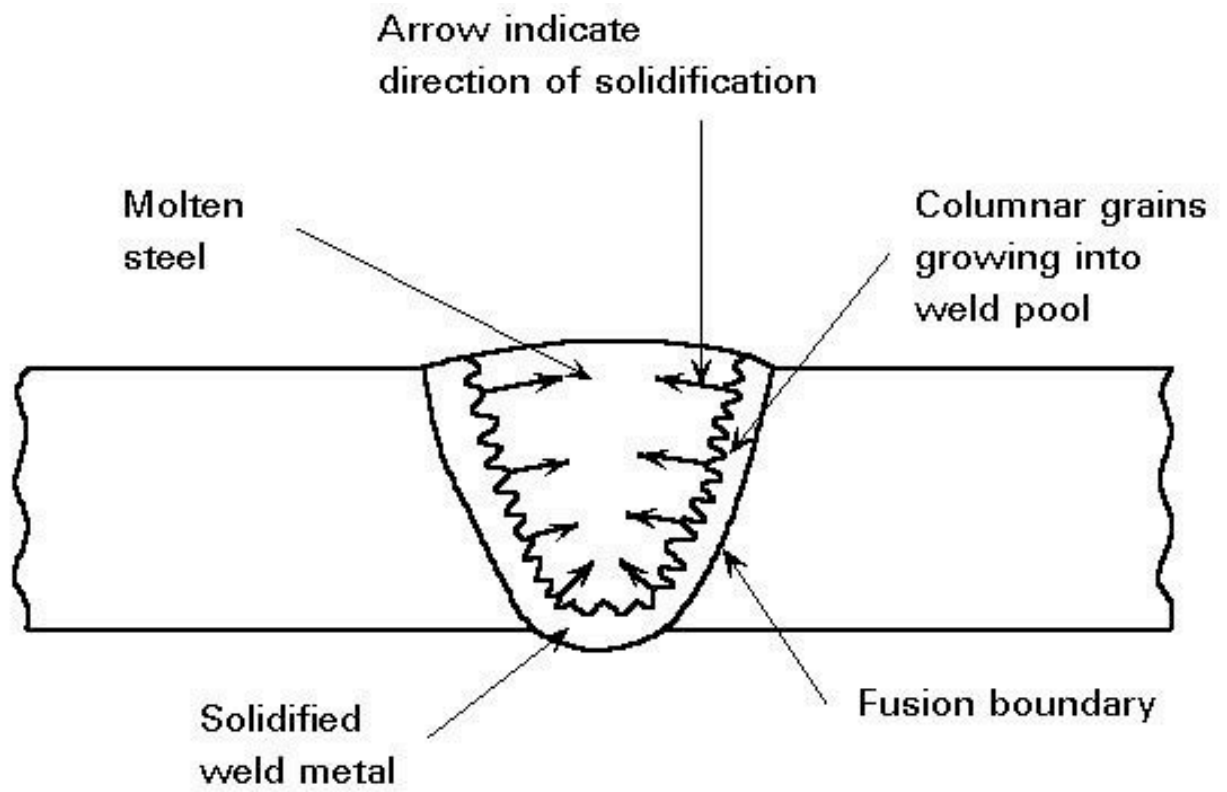


Figure 3 Solidification of weld metal



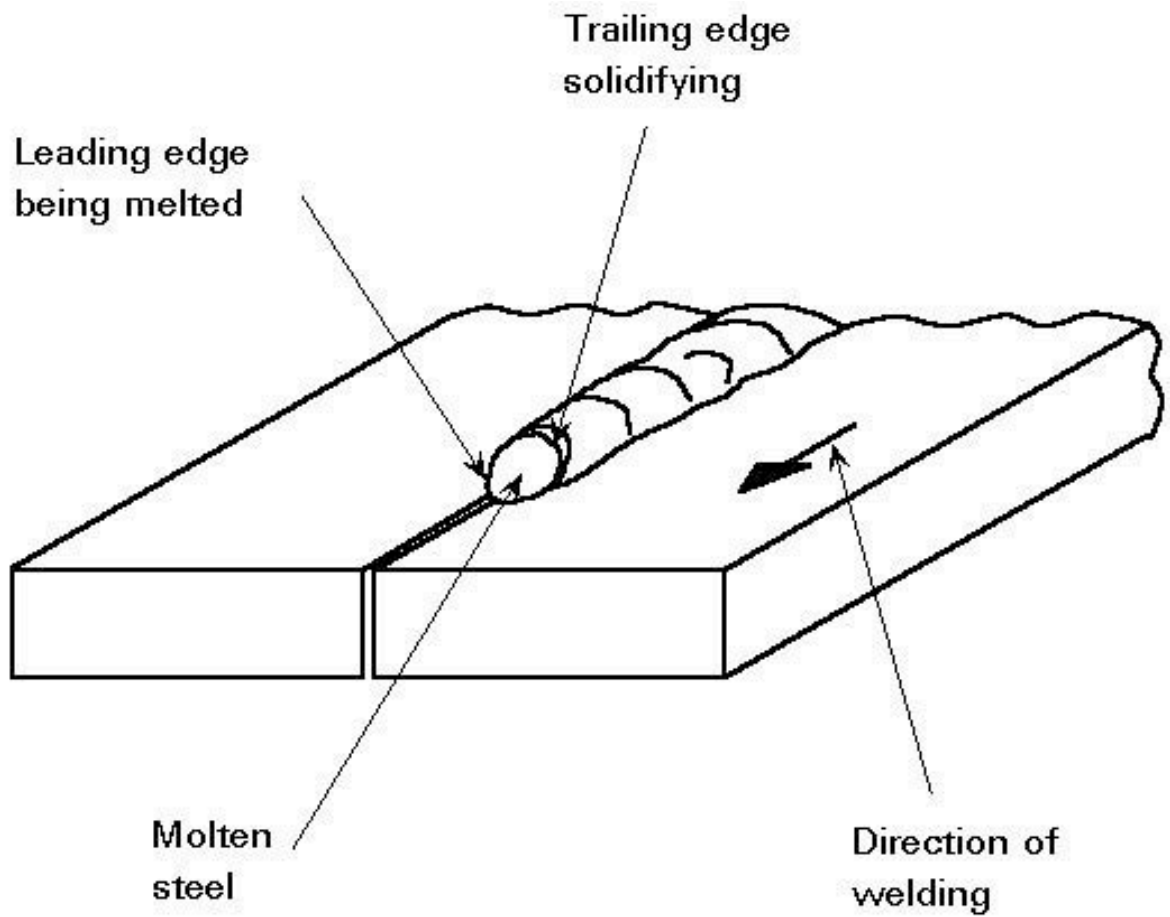


Figure 4 Progressive fusion and solidification

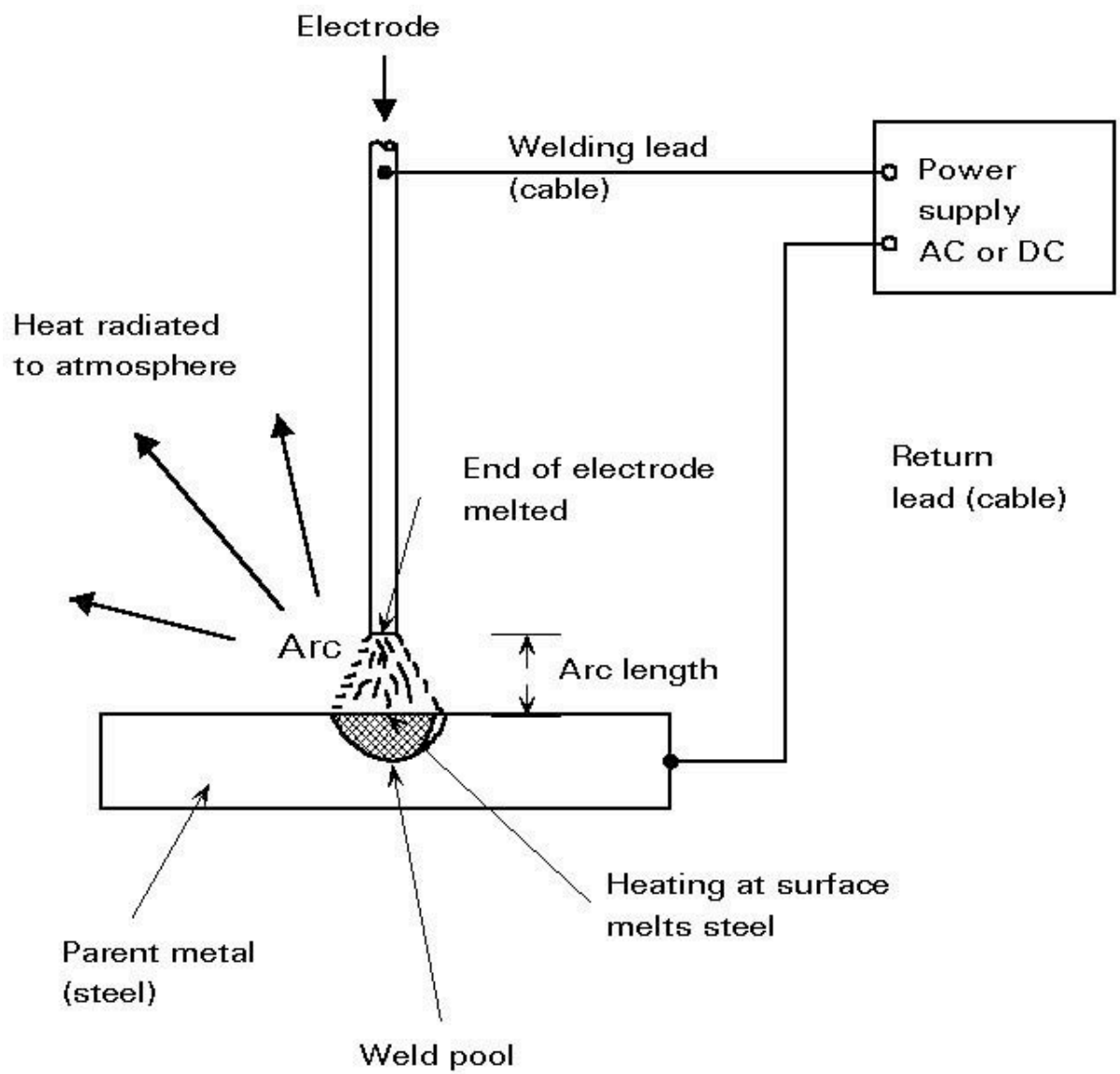


Figure 5 Welding arc

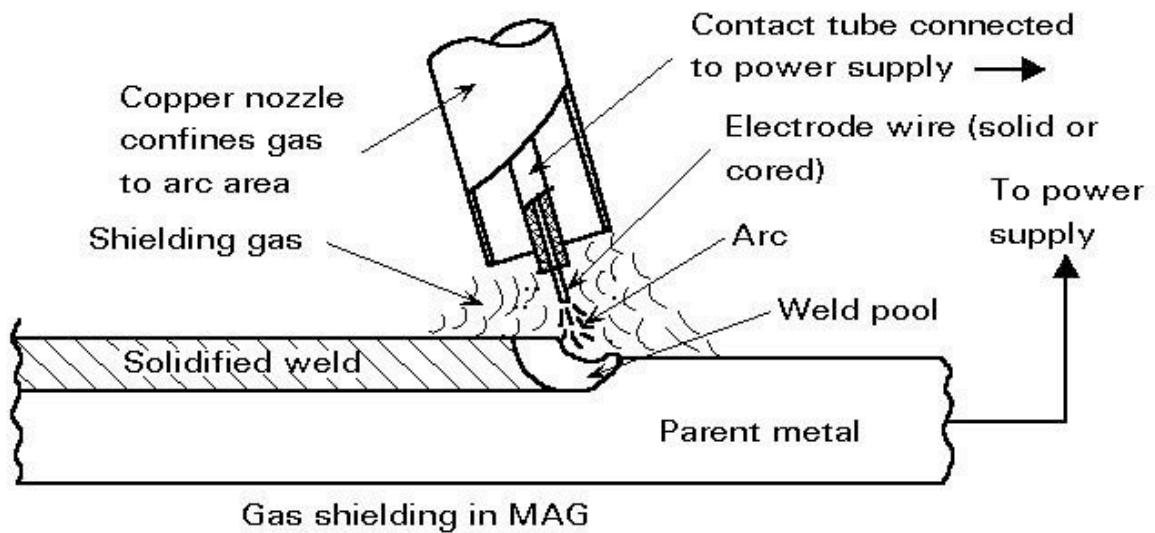
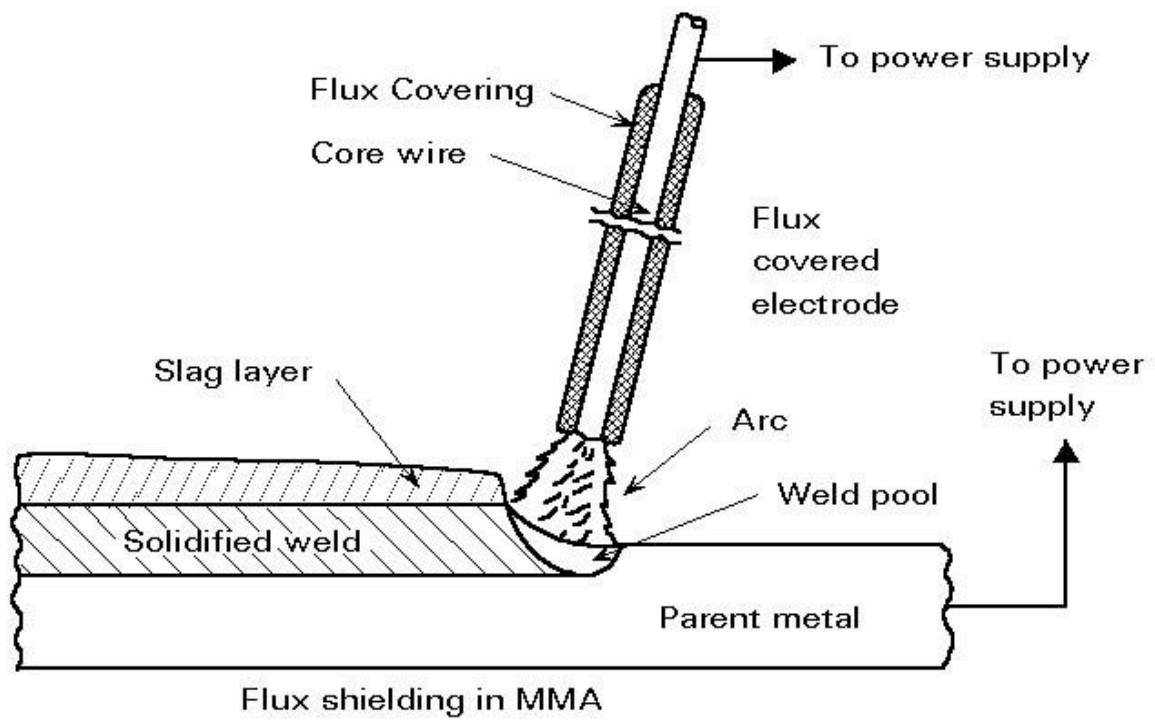


Figure 6 Shielding methods

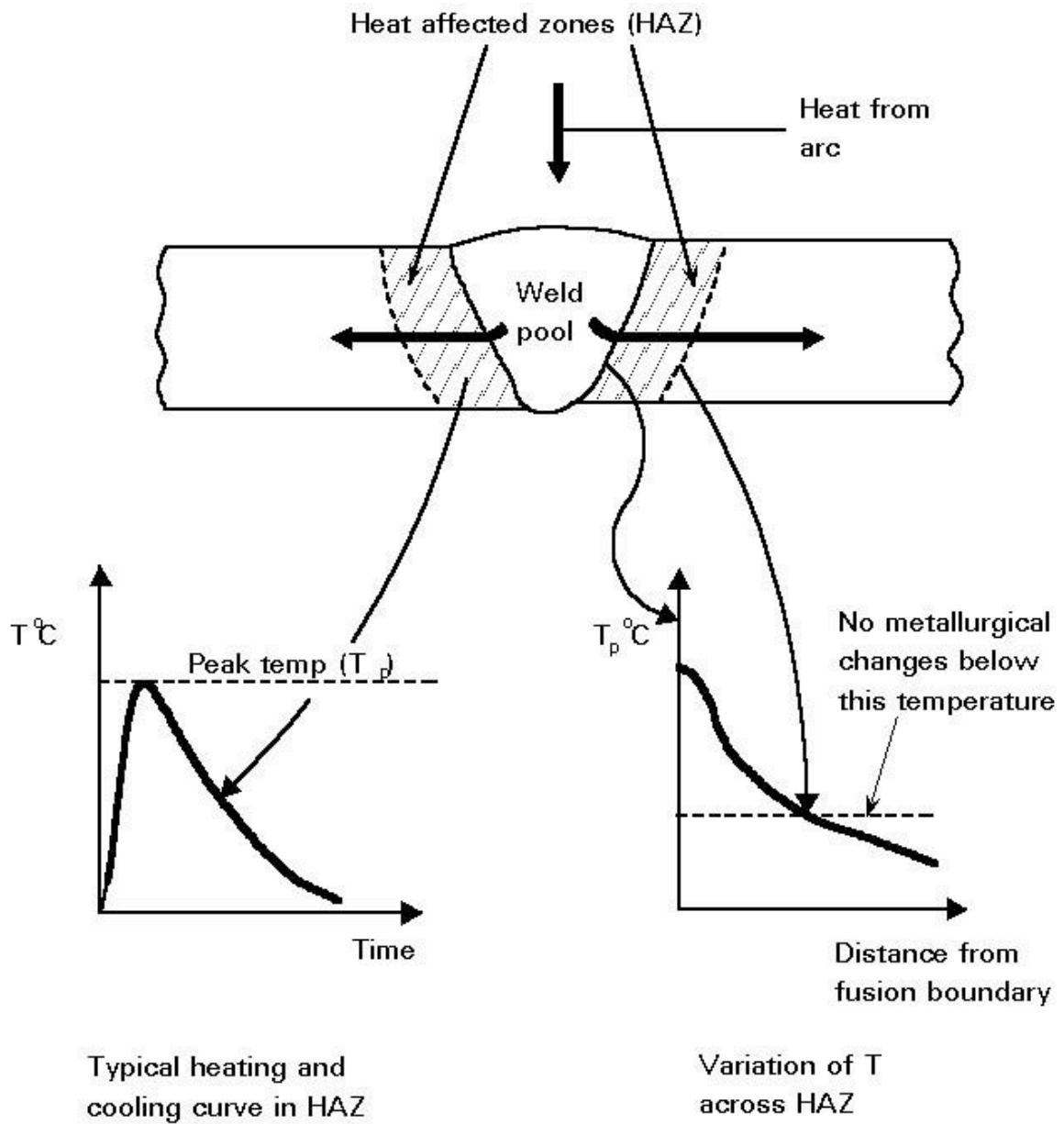
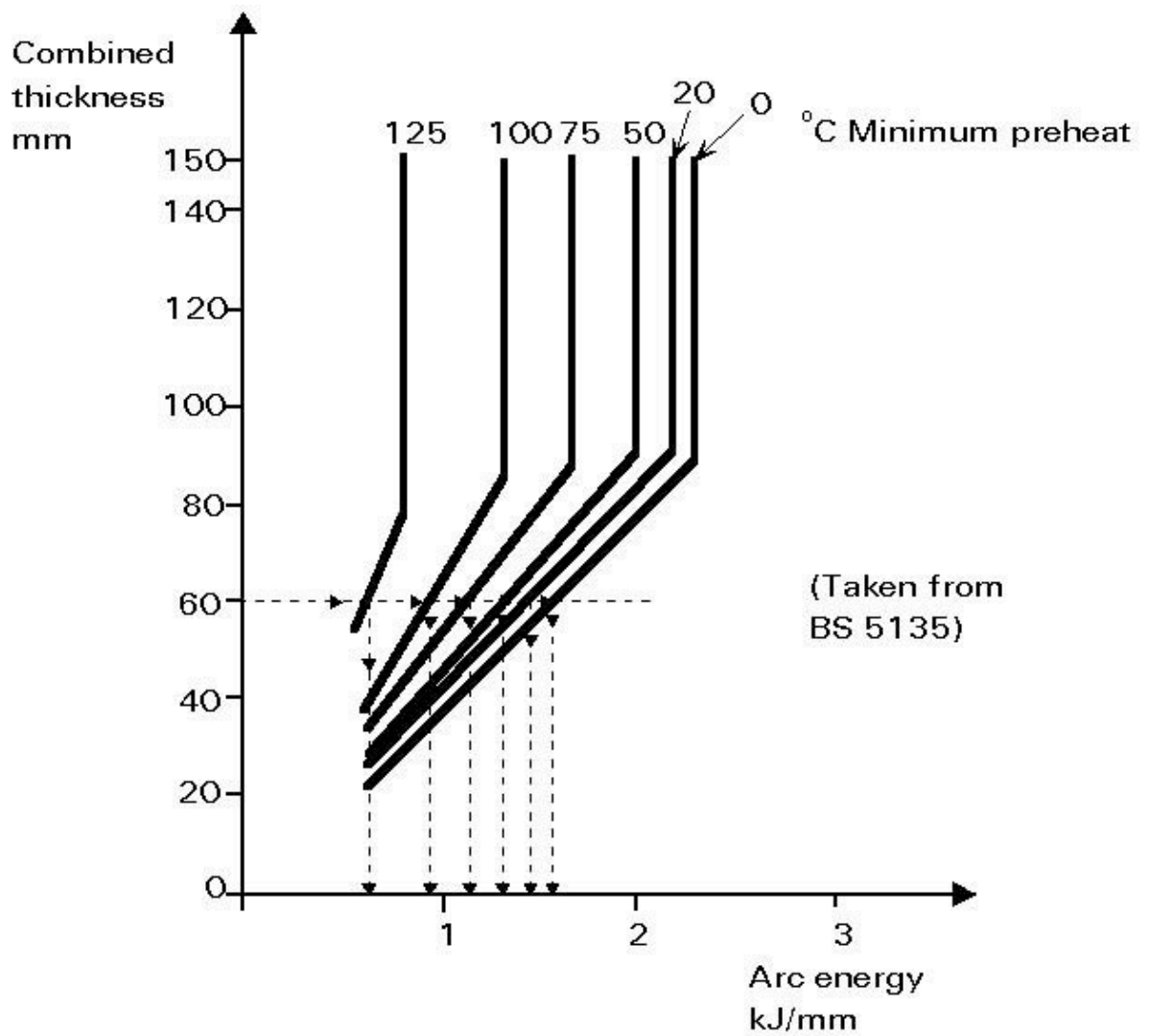


Figure 7 Formation of heat affected zone (HAZ)



Combined thickness is specified by joint design.  
Choose optimum combinations of preheat and  
arc energy for weld procedure

Figure 8 Prediction of welding conditions

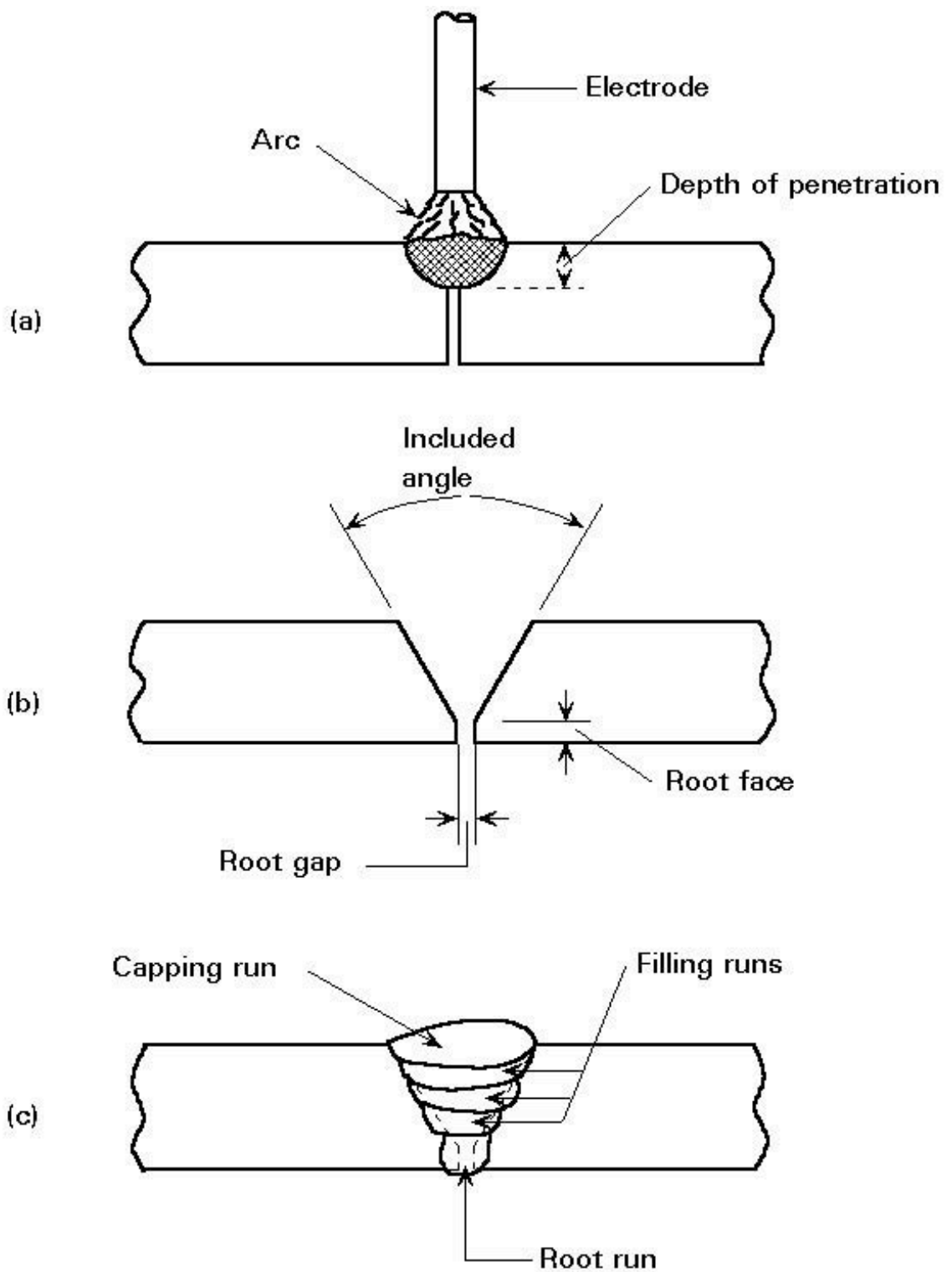
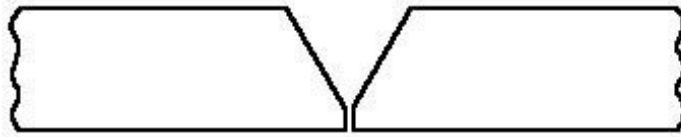
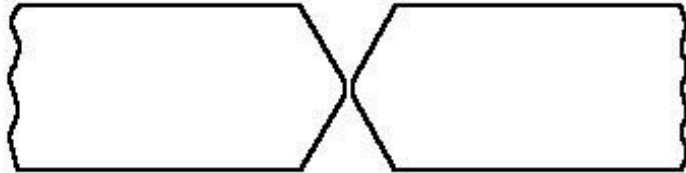


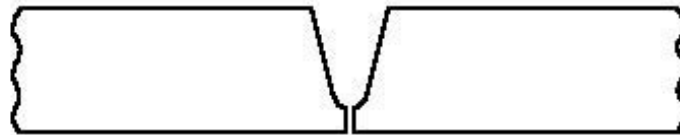
Figure 9 Penetration in arc welding



Single Vee



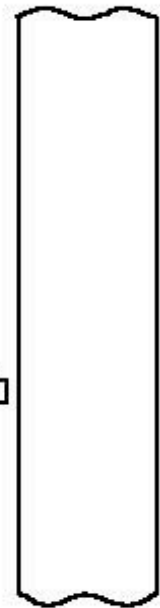
Double Vee



Single U



Single  
bevel



Single J

Figure 10 Edge preparations

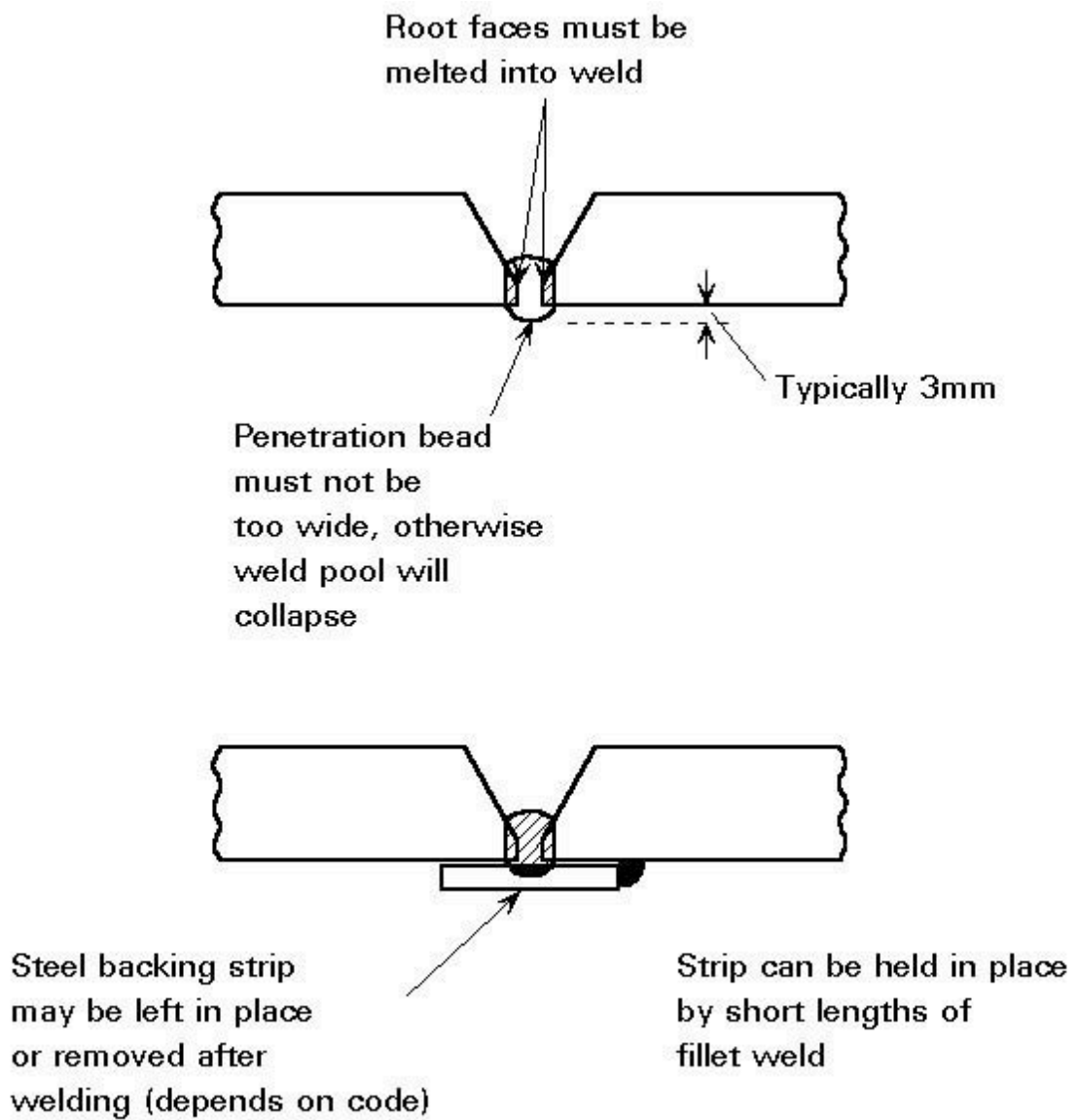
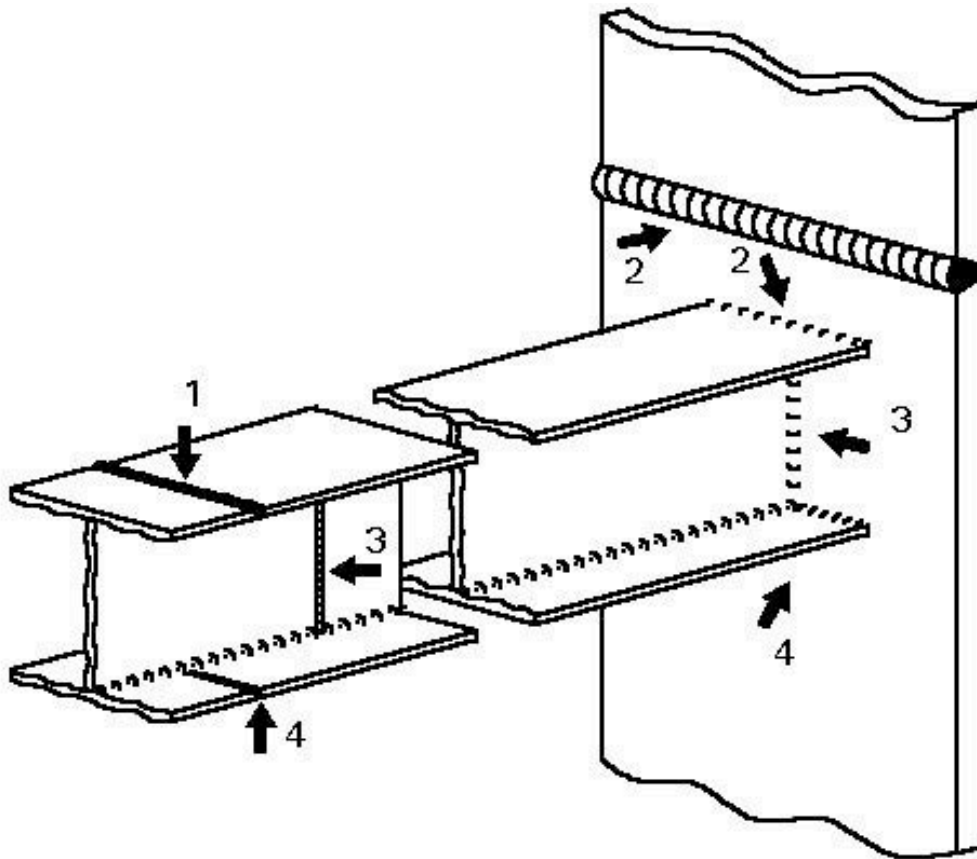


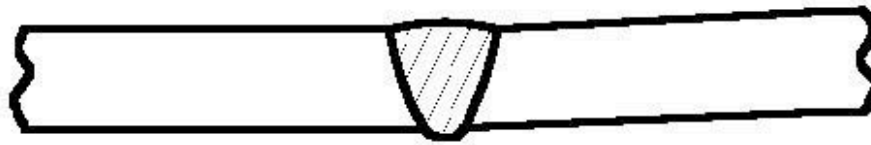
Figure 11 Root run techniques



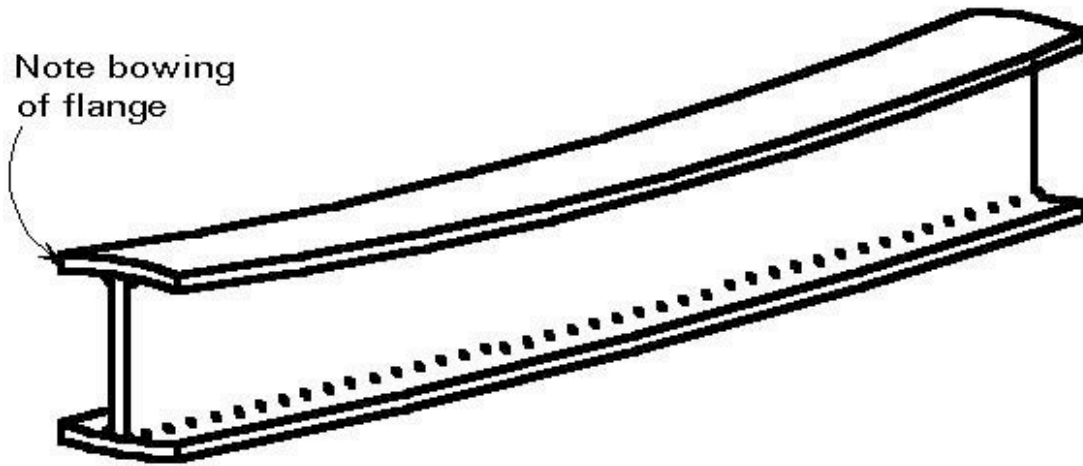


- 1 - Flat (downhand)
- 2 - Horizontal vertical
- 3 - Vertical
- 4 - Overhead

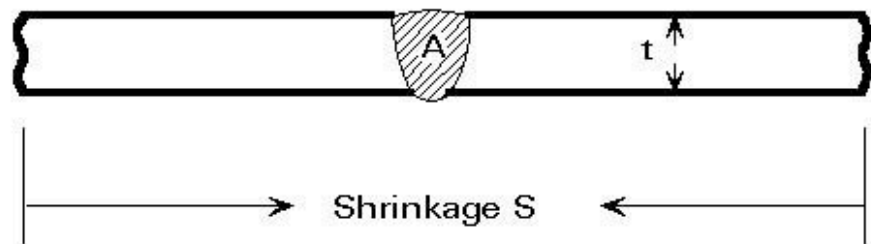
Figure 12 Welding positions



Angular distortion in single vee butt



Longitudinal bowing in welded beam



$$S = \frac{kA}{t}$$

$k$  = Empirical factor  
(0,1 to 0,17)

$A$  = Cross-section of  
weld

$t$  = Thickness of plate

Figure 13 Distortion in welding

Angular distortion

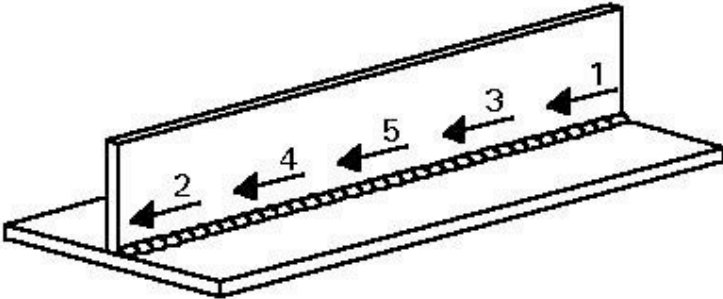


Double vee better than single vee



Single u better than single vee

Longitudinal bowing



Welding in short lengths reduces longitudinal bowing but increases welding costs

Figure 14 Controlling distortion (examples)

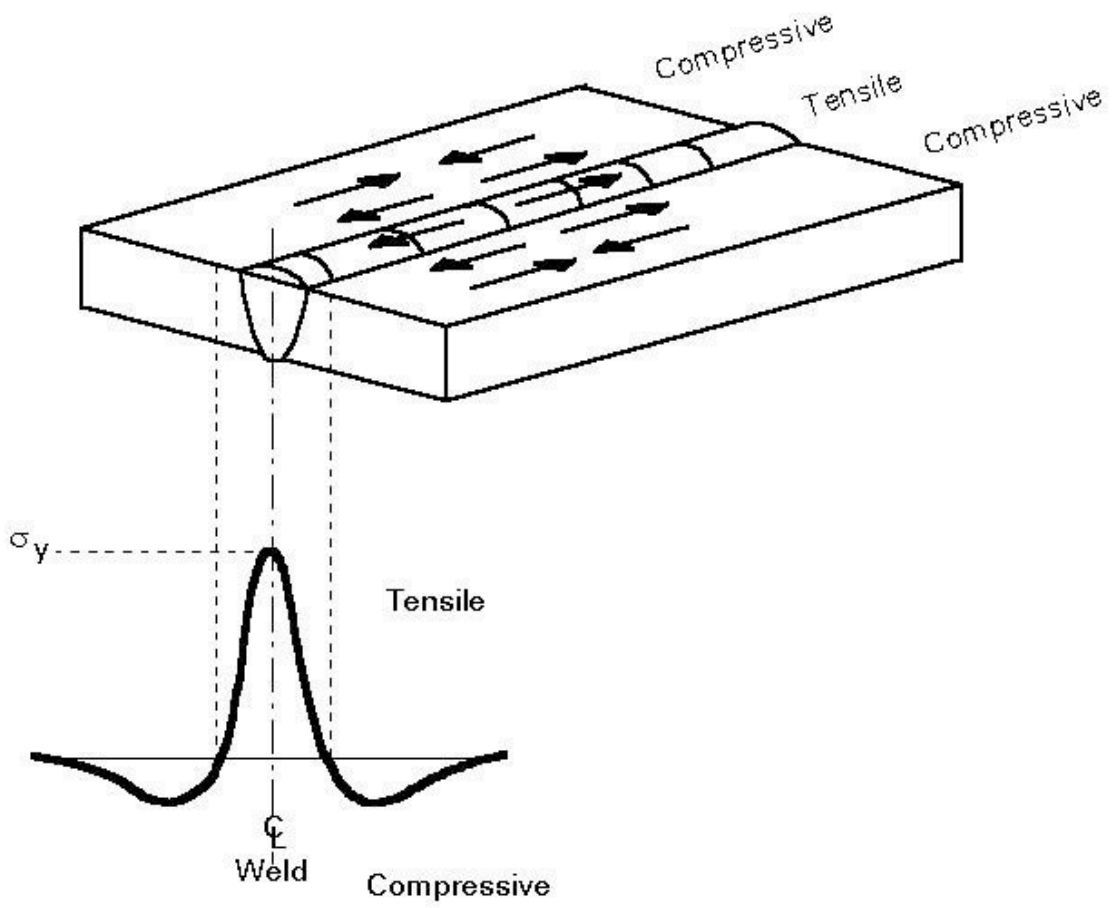


Figure 15 Residual stress