

RESUME PROCEDES DE SOUDAGE - IWE/TWT-MODULE I

Soudage = opération consistant à assembler 2 ou plusieurs parties d'un assemblage, de manière à assurer la continuité, soit par chauffage, soit par pression, soit les 2, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la T° de fusion peut être quelconque.

Soudage autogène = produit d'apport dont T° fusion est du même ordre que MB.

Soudage par fusion (joint formé par bain de fusion) / par fusion avec pression / par pression (par force statique ou dynamique sans fusion)

Apport de la source d'énergie > pertes dans la pièce (conduction/rayonnement) pour qu'il y ait fusion.

Protection du métal de l'oxydation pendant la fusion.

Il existe environ 80 procédés répertoriés.

On peut les classer par type d'énergie:

- chimique: réaction chimique exothermique
- mécanique: pression, explosion, friction, US
- électrique: arc, effet Joule.
- Rayonnement: laser, FE.

Ou en fonction du mode d'obtention de la continuité métallique:

- contact liquide/solide: avec ou sans fusion du MB / avec ou sans MA
- contact solide/solide: avec ou sans fusion intermédiaire / avec ou sans déformation.

Facteurs de choix d'un procédé:

- nature matériaux à souder (compo chimique/épaisseur/formes et positions joints)
- type de fabrication (atelier/chantier, série/unitaire)
- construction neuve ou réparation
- pb économique de productivité (vitesse exécution, coût MO, amortissement équipement, coût MA)
- propriétés à satisfaire pour les constructions soudées (mécanique, chimique, étanchéité).

Flux thermique: qté de chaleur par unité de surface.

Flamme 0,5 kW/cm² faible Rdt 70/80%

Plasma 0,5 à 10 kW/cm² moyen Rdt 10 à 50%

Arc 5 à 100 kW/cm² élevé, Rdt TIG 45 à 75%, MIG 65 à 85%, SAE SAF 75 à 95%.

Puissance spécifique: rapport de 1 à 100000 selon les procédés.

Rapport de 1 à 10 au niveau du point d'impact.

Densité d'énergie: influe sur le transfert de l'énergie à la pièce.

Arc classique: conduction/saturation/fusion. Faisceau localisé: 20000 K au point d'impact --> fusion quasi instantanée, formation d'un capillaire de vapeur métallique, peu de conduction. ZF = trace laissée par le faisceau.

Morphologie de la ZF: cordon étroit et profond avec faisceau localisé. ZF TIG = 5 à 10 fois ZF procédé à haute densité. Moins de déformation avec procédé haute densité .

Densité de courant: A/mm²

EE 15 à 20 A/mm²

SAFP 60 à 100 A/mm²

MIG 140 à 350 A/mm²

MAG 200 A/mm²

Sens du courant: paramètre important --> agit sur le bain de fusion.

I caractérise le quantité d'électrons --> pénétration.

U caractérise la quantité d'énergie emmagasinée par les électrons.

GENERATEURS DE SOUDAGE ET ARC ELECTRIQUE

Rappels électricité

Impédance : $Z = U / I =$ rés pure du circuit en CC (pas d'action inductances et capacités)

$Z = \sqrt{(R + L\omega)}$, L inductance et ω pulsation = $2 \Pi * f$

$Z = 1/C\omega$, C capacité.

Valeur efficace: valeur équivalente en CC donnant la même énergie calorifique. En courant sinusoïdal alternatif $U_{eff} = U_{max} / \sqrt{2}$.

Générateurs de soudage

Source spécifique soudage car:

Tension réseau inadaptée au soudage.

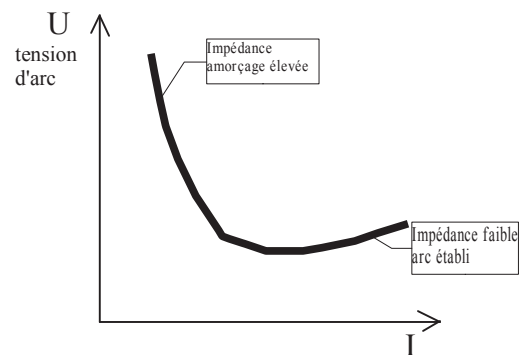
Nécessité de faire varier I ou U.

Courant continu dans de nombreux cas.

Nécessité de faire varier impédance de sortie

source.

Délivre soit du CC, soit du CA monophasé.



Carac statique d'l arc électrique

Caractéristiques géné:

-Tension d'alim+ nature courant (mono/tri)

-Puissance: apparente $U_{eff} * I_{eff}$ en VA, active $U * I * \cos\phi$ ($\cos\phi$ entre 0,5 et 0,9, amende si $< 0,7$).

-Tension à vide: 65 à 80 V en géné, < 48 V gd public, > 100 V pour certains plasmas. Fixe pour 1 réglage donné.

-Intensité de court-circuit.

-Intensités/facteur de marche.

-Caractéristique statique: $U = f(I)$.

Tombante ou plongeante: var de longueur d'arc --> faible var de I (EE ou TIG).

Changement de l'impédance de sortie du géné pour obtenir le réglage.

Verticale: I cste lorsque longueur arc varie. Transfo redresseur classique ou onduleur.

(Soudage plasma).

Horizontale ou plate: grande var de I lorsque longueur arc varie, tension cste --> auto-régulation de la fusion du fil électrode.

-Réglages.

-Dispositifs annexes:

amorçage HF (pour des questions de sécurité, attention perturbations radio-électriques) / haute tension (5 à 15 kV – protection appareils de mesure).

Amorçage par arc pilote.

Stabilisation de la tension alternative.

Evanouissement d'arc.

Groupe de ref intégré.

Courant pulsé/mode synergique.
Asservissement robot.

Echauffement pendant le temps d'arc. Pertes cuivre (échauffement bobinages) / perte fer (origine magnétique).

Facteur de marche conventionnel: normalisé. En que peut délivrer le transfo sans arriver à l'échauffement destructeur, par période de 10 mn. X 60% représentatif de l'EE.

Facteur de marche opérationnel: permet de chiffrer le coût d'une soudure. Temps de soudage effectif / temps total (pointage/nettoyage compris).

Plaque signalétique: info importantes --> type de géné + symbole, tension à vide, facteurs de marche, gamme d'intensité, alim en énergie.

3 parties: identification / sortie soudage / alimentation.

Types de géné:

Classiques: impédance fixe (c'est l'arc qui s'adapte).

-Groupes tournants: génératrices CC essentiellement. Ne sont plus fabriquées. Groupe mobile avec moteur à combustion interne.

-transfo:

monophasé (bas de gamme) réglage I par var de la self. CA (EE / TIG). Tension à vide élevée. Technologie ancienne. Remplacés par hacheur-onduleurs.

Transfo redresseur triphasé: CC uniquement. Majorité des géné. Carac plate ou plongeante.

Modernes: auto-régulées (régul analogique ou numérique par microprocesseur) – carac H ou V. Impédance variable (impédance sortie géné = impédance circuit).

-hacheurs-onduleurs: petite taille, très maniable. Adaptation source aux besoins de l'arc. En forte progression. Appareils de chantier (TIG/EE) optimisés en taille et poids. Appareils d'atelier: module de puissance std, c'est la carte de commande qui fait les fonctionnalités de l'appareil.

-synergiques: mesure U et I en permanence et correction en temps réel.

-à courant pulsé.

Mise à la terre des circuits de soudage: différents montage possibles. 1 ou plusieurs masses.

Bon contact, placer le + près possible du joint (pb instabilité de l'arc).

SAFP: tôles fines --> 1 masse dans le prolongement de la soudure (on soude en s'éloignant).

Tôles épaisses --> 1 masse à chaque extrémité ou de chaque côté.

Jamais de masse sur latte support.

L'arc électrique

Arc = conducteur électrique souple. Décharge électrique dans 1 gaz.

Electrodes et source choisies pour amorçage et stabilité de l'arc.

N'est pas 1 rés pure mais on l'assimile.

Tension à l'arc = chute de tension cathodique + chute de tension dans le plasma + chute de tension anodique.

Tension d'arc dépend de la longueur de l'arc. + arc long + grande est la tension (à I cst).

En soudage arc long pas favorable (défocalisation, phénomène électromagnétique --> risque de soufflures et de projections, le bain s'élargit et la péné diminue).

La tension d'amorçage dépend de la nature et de la pression des gaz en présence.

Arc établi, l'augmentation de la ddp ne fait pas varier beaucoup I. Var I dépend de la nature de la cathode.

Etablissement et stabilité d'un arc favorisés par:

- géné à tension à vide élevée
- présence d'un gaz facilement ionisable
- distance pièce / électrode
- cathode thermoémissive.

3 domaines dans l'arc: tâche cathodique / colonne gazeuse (plasma conducteur ayant sa rés propre) / tâche anodique (+ grand éclat).

Cathode – :siège de l'émission des électrons. électrons attirés vers l'anode. Leur vitesse est proportionnelle à la tension, inversement proportionnelle à la distance (environ 100 m/s).

+ la distance entre les électrodes est grande + la tension d'amorçage est forte.

Thermoémissivité: faculté d'émettre des électrons sous échauffement (par effet Joule p.e.).

Tungstène pur ou dopé au thorium/cérium ou lanthane.

Les électrons s'échappent facilement --> courant important sous faible tension (rés apparente de l'arc faible).

La plasma d'arc: plasma = 4ème état de la matière. Les électrons heurtent les atomes des gaz (Ar/He/N₂...) entre les 2 électrodes, et leurs arrachent des électrons. D'autres gaz (comme O₂) captent facilement les électrons.

T° cathode 3000°C / plasma 5800°C / anode 3800°C.

Anode + : siège de la réintégration des électrons.

Si anode = pièce (polarité directe). L'énergie cinétique des particules est transformée en échauffement --> bain de fusion. Pénétration augmentée. Arc confiné pour que le champ électrique guide les particules vers le centre du bain de fusion (source ponctuelle / plasma étroit, affûtage électrode).

Polarité utilisée en TIG métaux lourds, électrodes rutiles, basiques en passe pénétrant ou au plafond.

Si anode = électrode (polarité inverse): électrons projetés sur l'électrode qui s'échauffe considérablement.

Nécessité d'avoir une tension à vide élevée (TIG MIG) pour arracher les électrons de la pièce ou d'oxyder légèrement la surface du métal (MAG).

En s'échappant de la pièce les électrons cassent l'éventuelle couche d'oxydes (décapage de la pièce).

Zone émissive large (bain de fusion large et moins profond qu'en polarité directe) / extrémité de l'électrode à l'état liquide.

Polarité utilisée pour électrodes basiques et pour taux de dépôt élevé, en MIG/MAG et SAFR en dessous de 450 A.

Soudage en courant alternatif: inversion du sens à chaque demi-période. Pièce et électrode sont alternativement cathode et anode.

Effet intermédiaire: pénétration intermédiaire / échauffement électrode intermédiaire (électrode en boule).

Utilisé pour souder les alliages légers (décapage suffisant) en TIG (avec électrode en W pur).

Transfert du métal dans l'arc:

par court circuit

par gravité: gravité simple / gravité avec force d'éjection / gravité avec force de répulsion.

Influence du magnétisme sur l'arc:

Force de Laplace: conducteur parcouru par 1 courant I --> création d'un champ magnétique qui engendre 1 force radiale proportionnelle au carré de I .

2 effets en soudage (1 positif et 1 négatif):

-Effet de striction: les forces pincent énergiquement le bout de l'électrode fusible --> formation d'1 goutte. Etirement de cette goutte et détachement sous l'action des composantes verticales des ces forces. Plus I est important + la striction est importante, + les gouttes seront petites.

-Soufflage magnétique: déviation de l'arc par les forces magnétiques. Dissymétries des champs à cause de la forme de la pièce et de la passe en cours de création. Répartition continue du champ dans le cordon, discontinue devant.

Arc défocalisé, + froid --> risques de collage ou manque de fusion.

Solutions:

- arc court
- déplacement ou multiplication des prises de masse
- diminution du pas de pointage
- utilisation du courant alternatif (création d'effets contraires qui se neutralisent)
- réalisation d'un préchauffage (point de Curie 768°C pour les aciers --> disparition de la magnétisation de la pièce au voisinage de l'arc).

Mesures électriques en soudage

Effectuer 1 mesure c'est obtenir 1 valeur quantifiant 1 phéno physique observé.

Chaîne de mesure: relie le phéno observé à la valeur obtenue.

Phéno -> Capteur -> Traitement -> Traduction -> Valeur quantitative mesurée.

Doit être discrète pour ne pas perturber le phéno.

Intervalle de mesurage: étendue entre grandeur min et maxi avec précision garantie.

Calibre: valeur maxi mesurée pour le réglage choisi.

Mesure doit être effectuée dans la moitié ou tiers supérieur de l'échelle.

Précision: classe de précision --> véracité de la lecture réalisée.

Capteurs:

Capteur résistif: shunt ou diviseur de tension. Le shunt est 1 rés calibrée aux bornes de laquelle on mesure U , on en déduit I . Shunt aselfique permet de mesurer tout type de courant. Réservé aux CC.

Capteur inductif: transformateur d'intensité ou tore sans fer. Utilisés pour CA et courants variables.

On récupère 1 courant induit au moyen d'une boucle.

Paramètres: rapport de transfo et intensité max admissible.

Transfo sans circuit magnétique (tore sans fer) pour fortes intensités (en soudage par résistance p.e.).

Capteur à effet Hall: CC ou CA. Plaquette semi-conductrice soumise à champ magnétique placée dans le circuit dont on veut mesurer I . On mesure 1 tension proportionnelle à I .

Pincés ampèremétriques: CC ou CA. Peuvent contenir l'1 des 3 capteurs inductif, magnétique ou à effet Hall.

Traducteurs:

Appareil magnétoélectrique: courant unidirectionnel. Bobine placée dans champ magnétique, parcourue par le courant à mesurer. Force électromagnétique proportionnelle à I. Mesure d'une valeur moyenne.

Appareil ferromagnétique: courant uni ou bidirectionnel. Noyau de fer doux attiré par électroaimant alimenté par le courant à mesurer. Mesure d'une valeur moyenne du courant redressé.

Gaussmètre: courant uni ou bidirectionnel. Mesure du champ magnétique induit par le courant. Aimant ou barreau ferromagnétique soumis à ce champ --> force électromagnétique proportionnelle à I. Mesure d'une valeur moyenne ou d'une valeur moyenne du courant redressé .

Appareil thermique: courant uni ou bidirectionnel. Mesure de la dilatation d'un fil conducteur soumis à effet Joule par le courant qui le traverse. Mesure de la valeur efficace vraie.

Appareil numérique: courant et tension uni ou bidirectionnel. Convertisseur analogique/numérique + afficheur cristaux liquides. Mesure de la valeur moyenne, crête, efficace RMS (courant sinusoïdal), efficace vraie TRMS (courant aléatoire / intégration en permanence).

Voltmètre: mesure 1 ddp. En parallèle sur le circuit. Rés interne très élevée pour rester discret.

Ampèremètre: mesure l'intensité du courant. En série dans le circuit. Rés interne faible pour rester discret. Association d'1 shunt et d'un voltmètre.

Traceur: trace papier d'1 signal variable. Vitesse d'avance permet de déduire la période du signal. Amplitude fonction du calibre du traceur. Limité aux faibles fréquences.

Oscilloscope: faisceau d'électrons soumis au champ électrique créé par la tension à mesurer. En parallèle sur le circuit. Tension de balayage permet d'avoir l'équivalent de la vitesse d'avance du traceur. La fréquence de balayage permet de déterminer la fréquence de la tension analysée. Rés interne très élevée.

Valeurs quantitatives:

Instantanée: pas exploitable en temps réel --> mise en mémoire du signal (oscilloscopes, traceurs, acquisition de données).

Moyenne: la + simple à obtenir. Effet de moyenne réalisé par l'inertie des phéno.

Efficace: calculée à partir de la valeur moyenne du signal redressé. = 1,1 * moyenne pour l'alternatif sinusoïdal.

Efficace vraie: TRMS --> intégration du signal réel, de façon numérique par échantillonnage. + fréq échantillonnage élevée + calculs précis.

Application au soudage:

mesure électriques importantes pour rédaction du DMOS, établissement du QMOS et suivi en fab.

Précautions à prendre pour garantir la stabilité du processus de soudage:

- conserver le même type d'appareil de mesure
- indiquer dans le DMOS si valeur efficace vraie ou moyenne
- utiliser uniquement les appareils TRMS si valeur efficace
- utiliser des appareils étalonnés
- vérifier l'étalonnage de la chaîne de mesure du génie si elle est utilisée.

Etalonnage: vérification de la mesure donnée pour des phénomènes de référence ou étalons.

Phase de réglage / courbe d'étalonnage donnant la valeur réelle du phéno en fonction de la valeur mesurée.

Mesures de température

Principales méthodes:

Thermomètres à dilatation

à gaz

à dilatation de liquide

à dilatation de solide

Thermométrie par changement d'état

par pression de vapeur

par repères thermométriques

Thermomètres à résistance

à résistance métallique

à thermistance

Thermomètres à couple thermoélectrique

Thermométrie optique

mesure du rayonnement total

mesure du rayonnement monochromatique

mesure dans 1 domaine spectral limité.

Températures dans le domaine du soudage:

T° de préchauffage T_p : en général on impose 1 minimum (qui correspond à la T° mini entre-passes).

Codap --> aciers HLE ép \leq 30 mm 100°C.

T° entre-passes T_i : on impose 1 maxi en général.

T° de postchauffage (ou de maintien) T_m : T° mini devant être maintenue après soudage.

Méthodes utilisées pour mesurer ces T°:

Produits thermochromes (sauf aciers inox): rubans, autocollant, pastilles, peinture et crayons.

Précision 5 à 40°C.

Thermomètres à contact.

Thermocouples. Précision 0,5 à 2°C. Effet Peltier, effet Thomson ou effet Seebeck. Différents types selon la gamme de T° à mesurer (ex platine rhodié/platine 0 à 1500°C).

Pyromètres optiques. Précision 5 à 50°C voire plus.

SOUDEGE OXYACETYLENIQUE – SOA - 311

1901

Domaine d'emploi:

Soudage aciers courants, alliés, fontes, métaux non ferreux. EP < = 6 mm.
Tuyauterie / chauffage / plomberie / rechargement.

Source de chaleur: flamme oxyacétylénique. En calorifique d'origine chimique. Puissance spécifique faible.

4 zones: zone de mélange et d'échauffement des gaz (aucune réac chimique), zone de combustion primaire (enveloppe du dard = front de flamme), zone réductrice ou de combustion secondaire (3100°C), panache de combustion totale (caractère oxydant, 1 vol de C₂H₂ pour 2,5 vol de O₂, T° 2700 à 2400 °C).

T° différentes au sein de la flamme. Différentes selon le rapport de combustion. Réac chimiques différentes selon rapport de combustion, différentes selon la distance du dard.

Mode de protection: zone de combustion secondaire --> réductrice (H₂ et CO sont réducteurs).

Principe: utilisation de la réac chimique exothermique $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2 + 106500$ calories.

Meilleur rendement pour les proportions 1,1 volume O₂ / 1 volume C₂H₂. Rapport de combustion a = vol O₂ / vol C₂H₂ = 1 à 1,1.

A 2/3 mm du dard zone utile réductrice + T° élevée 3200°C.

Zone de combustion secondaire: $2 CO + O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 136000$ calories et $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + 58000$ calories.

a > 1 trop de O₂ --> flamme oxydante. La flamme « siffle ». La panache raccourcit.

Oxydation métal et formation soufflures.

a < 1 trop de C₂H₂ --> flamme carburante, fortement éclairante. Fragilisation des aciers par carburation.

Flamme décollée --> trop de débit.

Acétylène: gaz de synthèse CaC_2 (carbures de calcium) + 2H₂O --> C₂H₂ + Ca(OH)₂ (chaux éteinte).

Très instable sous forme gazeuse. Incompressible au dessus de 1,5 bar. Mélange détonnant si > 3% dans l'air. Stocké à l'état dissous dans de l'acétone (1l d'acétone dissout 300l de C₂H₂ sous 12 bars). Bouteille remplie de matière poreuse pour éviter tout risque de déflagration. Débit maxi limité (¼ de la contenance). Proscrire canalisations en CU ou à base de CU (70%).

Oxygène: obtenu par liquéfaction de l'air puis distillation pour séparation des gaz.

Très oxydant au contact des corps gras.

Gaz très stable. Inodore/incolore.

Stocké comprimé à 200 bars (300 bars autorisé par nulle législation).

Stockage liquide en réservoir cryogénique (-183°C).

Détendeurs: transforme la pression d'emmagasinage (variable) en une pression d'utilisation (cste).

Clapet / membrane souple / ressort de rappel.

Double détente pour s'affranchir du pb du coeff d'irrégularité de la courbe de réponse.

Pb de givrage: production de frigories à la détente (si débit important) --> givre se forme à l'intérieur au niveau du clapet. Soupape + évent sur chaque détenteur.

Dégivrer avec eau chaude ou système de résistance électrique.

Dispositifs de sécurité (obligatoires entre chalumeau et détendeur):

clapet anti-retour de gaz. V de déflagration de C₂H₂ 60 m/s.

Dispositif arrêt de flamme (grille fine en matériau fritté). Attention au colmatage de la grille.

Paramètres:

-pressions d'alimentation: O₂ 1 bar, C₂H₂ 0,5 bar (valeurs courantes).

-Débit de la buse: fonction matériau, épaisseur, position soudage, type assemblage.

Pe: acier 1 mm BW à plat 100 l/h C₂H₂. Angle intérieur +25% (déperdition chaleur), angle extérieur -25%, plafond/montante/corniche -30% (pour diminuer vol bain).

-Réglage de la flamme: pressions, ouvrir O₂, ouvrir C₂H₂ en grand et allumer. Ajuster O₂.

Chalumeaux: soudeur / coupeur / soudeur-coupeur / chauffeur.

Corps (robinets de réglage/arrivées gaz), chambre de mélange des gaz, lance, buse, étoile.

Les robinets ne servent qu'au réglage du débit et de la flamme (pas à l'arrêt du gaz).

La buse définit le débit.

Classement des chalumeaux:

puissance de flamme (déterminée par le débit de C₂H₂)

calibrage des buses pour un débit maxi en l/h de C₂H₂.

Buses normalisées:

10-16-25-40-63-100-160-250-315-400-500-630-800-1000-1250-1600-2500-4000

Classification selon les pressions d'alim:

hte pression --> pression C₂H₂ > pression du mélange dans la lance > 100 mb

basse pression --> pression C₂H₂ < pression du mélange dans la lance < 100 mb, pression

O₂ < 1 bar.

selon le dispositif de mélange:

sans aspiration (O₂ et C₂H₂ pressions voisines)

avec aspiration (pression C₂H₂ < pression O₂) – le plus courant.

Débit:

par modification de la section grâce au déplacement d'une aiguille. Chaque lance peut admettre plusieurs buses (en l/h). Pas de réglage de débit. Pression O₂ 1 bar, C₂H₂ 100 à 400 mb (HP), 10 à 30 mb (BP)

par injecteur/mélangeur fixes et associés. Chaque lance a son propre bec (en l/h). Pression O₂ 1 à 2 bars, C₂H₂ 350 à 800 mb (HP).

Préparation des pièces: ép < 1 bords relevés. 1 à 2 mm bords droits sans écartement, 2 à 4 mm bords droits avec écartement. Ep > 4 mm chanfrein en V 70/90°, méplat 1,5 mm.

Angle en fine épaisseur uniquement.

Avantages: souple (chantier). Large gamme de matériaux soudables par ce procédé.

Inconvénients: faible puissance spécifique. Risques liés à l'acétylène.

Méthodologie: Inclinaison 45°.

En tirant (« à droite ») pour épaisseurs > 5 mm.

En poussant (« à gauche ») pour fines épaisseurs.

Procédure de pointage (points alternés) --> mise en compression de l'ensemble des points.

Espacement = 30 * ép

Faire 1 « talon » pour éviter le pb de fissuration au retrait (cordon de qqes cm commençant en pleine tôle et se terminant à l'extrémité).

Dia buse = 100 l/mm d'épaisseur.

Dia fil d'apport = $e/2 + 1$

Performances:

Hygiène/sécurité:

Risques liés à l'acétylène (majorité des accidents de soudage en France).

Manipulation des bouteilles. Ne jamais coucher une bouteille d'acétylène. Pression maxi acétylène 1,5 bar. Respect du débit maxi. Protection des bouteilles vis à vis des chocs et échauffement.

Diaphragme d'éclatement extérieur sur réseau acétylène.

Ne jamais graisser les pièces en contact avec O₂ sous pression (inflammation spontanée).

Vérifier régulièrement l'état des tuyaux souples.

Centrales de détente: respecter les consignes du producteur de gaz.

Capacité détenteur > pression bouteille. Pb de givrage.

Retour de flamme sur chalumeau.

Protection individuelle: lunettes, chaussures, éviter tissus inflammables, casquette.

Air s'enrichit en O₂ --> risque d'inflammation ou de combustion accélérée.

Autres gaz:

Crylène (mélange éthylène, acétylène, propylène). 2930°C. Livré à l'état liquide.

Proche de l'acétylène sans les risques. Mais pas de zone réductrice (Oxycoupage).

Propane C₃H₈. 2820°C. Très stable. Etat liquide. Faible puissance spécifique (oxycoupage).

Gaz naturel CH₄. 2800°C. Bon marché. Surpresseur (canalisations gaz de ville). Faible puissance spécifique (oxycoupage).

Hydrogène. 2790°C. Oxycoupage en eau profonde. Dangereux.

SOUDEGE A L'ARC AVEC ELECTRODES ENROBEES – SAEE/SMAW - 111

1907

Domaine d'emploi: chantier, tous types d'industries, rechargement, réparation.

Aciers de construction non alliés ép > 1,5 mm, aciers alliés, fontes soudables, alliages Ni/Cu/Al 25/30% du métal déposé en Fr.

Source de chaleur: arc électrique.

Mode de protection: gaz provenant de la décomposition de l'enrobage. Pendant le transfert dans l'arc, au niveau du bain et pendant ref.

Principe: arc entre électrode et pièce à souder (âme/enrobage/électrode/arc/laitier/cordon)

Générateur CC carac statique verticale.

Courant continu ou alternatif (en fonction enrobage). CC dans majorité des cas.

Paramètres:

-Type enrobage.

-Diamètre électrode: 2,5/3,2 en passes péné et tôles fines, 4 et 5 en remplissage, 6,3 pour taux de dépôt élevé. Plage industrie: 2,5 à 5.

-Polarité: directe (- à l'électrode) pour passes de péné, inverse (+ à l'électrode) pour taux de dépôt (passes de remplissage) possible en basique et cellulosique.

-Intensité: en fonction du dia âme. Plage courante 70 à 200 A. I = 50 (D -1) ou 30 à 40 D.

Mieux vaut être au dessus qu'au dessous. Sous-intensité --> nombreux défauts (manque de péné, cordons bombés, inclusions), sur-intensité --> caniveaux, projections, effondrements.

-Longueur d'arc (le plus court possible), corrigée en permanence par le soudeur.

-Tension conventionnelle à l'arc: $U_2 = 20 + 0,04 I_2$ pour $I_2 < 600$, au delà $U_2 = 44$ V.

Tension à vide géné > tension d'amorçage de l'arc (en particulier en CA).

Electrodes: constituée d'une âme (dia de l'électrode = dia âme) et d'un enrobage.

Ame: fil métallique plein de nature voisine du métal à souder.

Dia normalisés: (1,6)/ 2/ 2,5 / 3,2 / 4 / 5 /6,3

Longueurs normalisées: 350 (jusqu'à dia 4) et 450 (3,2 à 6,3).

Enrobages: matières minérales et organiques. 1 cinquantaine d'éléments. Isolant électrique à froid.

Rôles de l'enrobage:

Electrique: ionisation de l'air entre électrode et pièce pour permettre l'amorçage et la stabilité de l'arc. A froid il est isolant et protège le soudeur des chocs électriques.

Mécanique et physique: guidage (cratère en bout d'électrode de par le retard à la fusion de l'enrobage), souffle de l'arc (toujours dans le même sens quelle que soit la polarité) de l'électrode vers la pièce ce qui permet le soudage en position. Coffre et forme le cordon (le laitier se solidifie + vite que le métal).

Métallurgique: remplacement des éléments volatilisés (Mn, Si, Cr), protection contre l'oxydation, désoxydation du bain (Mn et Si), augmentation du rendement (poudre de fer dans enrobage) rendement = poids de métal déposé / poids de l'âme métallique, apport d'éléments (Cr Ni Mo), diminution de la vitesse de solidification (meilleure compacité, meilleur dégazage), diminution de la vitesse de refroidissement (favorise dégazage, moins de risque de trempe), élimination S et P captés par carbonates.

Types d'enrobage:

Oxydant O: oxydes de Fe, silice et silicates. Laitier lourd et compact. Arc peu pénétrant.

Carac méca cordon faible. Position gouttière à plat. CC polarité directe ou CA. Tension amorçage 40/45 V.

Acide A: oxydes de Fe et Mn, silicates, éléments désoxydants et dénitrurant. Propriétés méca cordon bonnes, très bel aspect. Arc peu pénétrant. Position à plat, angle gouttière et à plat. CC polarité directe ou CA. Tension amorçage 40/45 V. Laitier abondant.

Rutile R: oxyde de Ti TiO₂. Laitier auto-détachable. Propriétés méca cordon bonnes, bel aspect, toutes positions (éviter descendante). Arc moyennement pénétrant. Tension à vide 45V, CC polarité directe ou CA. 70% des électrodes en France. Taux hydrogène élevé.

Epais au rutile RR

Basique B: carbonates de Calcium. Laitier facile à détacher. Très sensible à l'humidité --> étuvage (350°C 2h) et conservation à 120°C. Propriétés méca cordon excellentes, constructions performantes, toutes positions sauf descendante. Arc moyennement pénétrant. Tension à vide 65 V, CC polarité inverse ou CA.

Cellulosique C: matières organiques combustibles. Propriétés méca cordon bonnes. Arc puissant et pénétrant. Projections et fumées importantes. Tension à vide 70 V, CC polarité inverse ou CA. Vertical descendant (oléoducs/gazoducs).

Mixtes: cellulosique au rutile RC, acides au rutile RA, basiques au rutile RB (soudage des inox et Duplex).

Préparation des pièces: pièces propres.

Jeu --> après pointage.

Bords franc avec jeu = dia âme pour épaisseurs 2 à 4 mm.

Chanfrein en V pour épaisseurs 5 à 15. Jeu et méplat = dia âme (sauf cellulosique jeu 1,6 mm).

Angle pas trop fermé (60/70°).

Chanfrein en X: ép > 15 mm. Accès des 2 côtés. Angle, jeu et méplat idem V.

Avantages: facile à mettre en oeuvre, polyvalent. Faible coût de l'installation. Dépôt de qualité. Vaste domaine de produits de soudage, vaste domaine d'utilisation.

Inconvénients: faible facteur de marche opérationnel (rarement automatisé), procédé « lent », faible taux de dépôt, présence de laitier, étuvage des électrodes basiques.

Méthodologie:

Amorçage au « frotté » - soudage en tirant.

Passes étroites (tirées) --> corniche. Meilleure résilience.

Passes larges (balancées).

Inclinaison électrode: 70 à 80° dans le sens d'avance.

Refonte cratère en reprise. Retour en arrière en fin de cordon pour minimiser le cratère.

Pointer en surintensité.

Performances:

Taux de dépôt: 1 à 2,5 kg/h (3kg /h en haut rdt)

Vitesse à plat en remplissage: 15 à 30 cm/min.

Facteur de marche opérationnel: 25/30 % .

Hygiène/sécurité:

Risques de brûlures (projections).

Dangers liés au courant électrique --> mise à la terre, disjoncteur différentiel.

Accidents oculaires, « coup de soleil » (rayons UV/IR) --> masque ou lunettes obligatoire.

Inhalation / ingestion de poussières métalliques (fumées) --> torche/hotte aspirante.

Procédés dérivés: Procédé 114: fil fourré sans gaz.

SOUDAGE A L'ARC AVEC ELECTRODE REFRACTAIRE – TIG – GTAW - 141

1924

Domaine d'emploi: industrie chimique et alimentaire, chaudronnerie inox, nucléaire, aéronautique. Totalité des métaux soudables (aciers inox, Alu, Cu, Ti, Zr...). Ep 0,5 à 8 mm. Passes de pénétration uniquement au delà.

Source de chaleur: arc électrique.

Mode de protection: par gaz inerte (Ar, He ou mélange Ar/He, H₂ dans certains cas) – attention courant d'air. Protection de l'électrode et du bain contre agents oxydants de l'air ambiant. He + énergétique que Ar (performances accrues: vitesse, péné, largeur cordon augmentée), H₂ augmente l'énergie de l'arc (performances accrues: vitesse, péné, largeur cordon diminuée). Aciers: Ar (faible ép) ou Ar+He pour fortes épaisseurs/matériaux à hte conductibilité thermique. inox (austénitiques): Ar ou Ar + H₂ (5 à 10 % --> arc chaud) + protection envers Ar ou N₂ (sinon rochage).

Alu: Ar ou Ar + He

Ti Ta Zr: traînard à l'arrière de la torche pour protéger le métal solidifié mais encore chaud et sensible à l'oxydation, boîte à gant.

Principe: arc entre électrode et pièce à souder, métal d'apport ou non, buse. Refroidissement torche à l'eau pour intensités > 200 A.

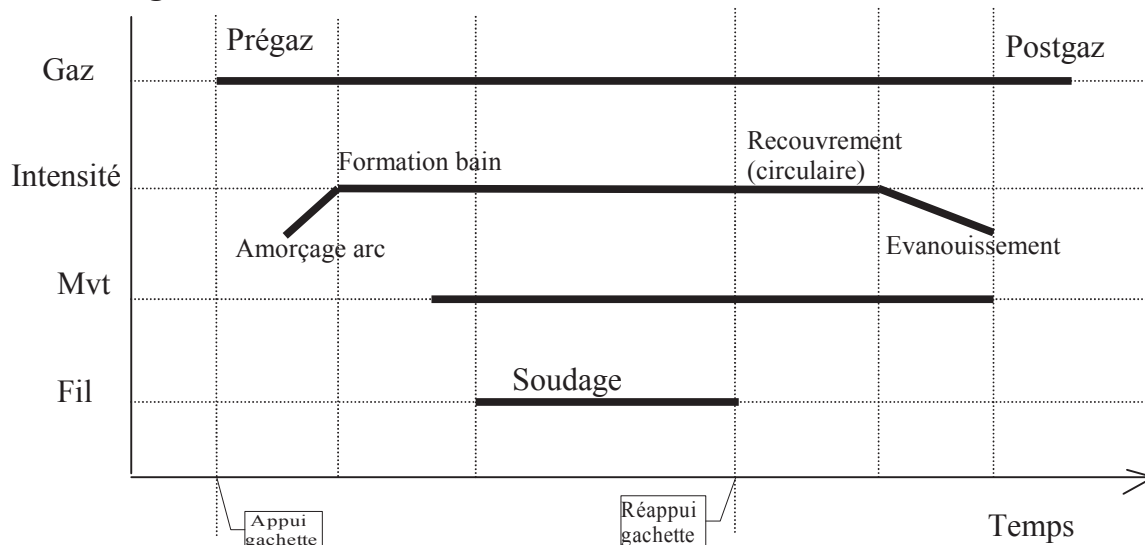
Amorçage: pollution de l'électrode si amorçage au contact. Gaz en TIG + ou - facilement ionisables, tension à vide peut être insuffisante. Amorçage à distance de l'arc par étincelle pilote en courant continu ou alternatif (haute tension 6000/15000 V et HF) ou arc pilote en courant continu (établi entre électrode et buse pe). Ionisation du gaz --> amorçage de l'arc principal spontané par rapprochement des pièces. En procédé automatique on amorce au contact.

Générateur carac statique plongeante ou verticale. 10 à 400 A / tension à vide 60 à 90V.

CC électrode au – pour métaux lourds et Ti. Arc stable, bain de fusion étroit et profond. Polarité négative permet de préserver l'électrode.

CA pour aluminium et ses alliages. Alternance + --> décapage « électronique » de la couche d'oxydes (Alumine), alternance - favorise la péné et minimise échauffement électrode.

Cycle de soudage:



Paramètres:

- Préparation des surfaces: parfaitement propres, dégraissage + décapage mécanique ou chimique.
- Intensité: 60 à 85% de l'intensité maxi préconisée par le fournisseur d'électrode. 80 A par mm pour électrode WT, 60 A par mm pour électrode WP. Aciers/Alu 30A/mm d'ép, Alu pur 40A/mm, inox 25A/mm.
- Diamètre de buse: + I est élevée + dia grand.
- Débit gaz: maxi en l/min = dia buse (5 à 8 l/min couramment), 1 à 3 l/min en protection envers. Si trop de gaz --> turbulences, protection dégradée. Prégaz : inertage avant amorçage de l'arc. Postgaz: protection soudure pendant son refroidissement (environ 10s).
- Tension conventionnelle à l'arc: $U_2 = 10 + 0,04 I_2$ jusqu'à $I_2 = 600 \text{ A}$, 34 V au delà.

Electrode: matériau réfractaire et thermoémissif. Tungstène pur ou avec addition d'oxydes (ThO₂, ZrO₂, LaO₂, CeO₂) pour augmenter le pouvoir émissif et faciliter l'amorçage de l'arc.

Longueurs normalisées: 50 - 75 -150 -175 mm.

Diamètre normalisés: 0,5 -1 - 1,6 - 2 - 2,5 - 3,2 - 4 - 5 - 6,3 - 8 - 10

En CC: WT20 rouge , WC20 gris / en CA : WP vert , WZ8 blanc .

Affutage en CC pour favoriser l'émission des électrons (angle 30 à 60°, hauteur pointe = 1,5 * dia), Tronc de cône (90°) en CA, il se forme 1 arrondi en bout au cours du soudage.

Métal d'apport: baguette en manuel, bobine en automatique.

Fils dia 0,8/0,9 en TIG orbital.

Préparation des pièces:

Préparation doit être soignée pour une soudure de qualité.

Epaisseurs < 3 mm: bords francs avec jeu = dia MA , jointif si pas de MA.

Chanfrein en V pour épaisseurs 3 à 8. Jeu = dia MA. Méplat ou non. Angle 70°.

Prépa en tulipe ou double tulipe pour passes de fond sur pièces épaisses.

Alliages légers: tomber la carre côté envers.

Epaisseur < 1 mm : bords relevés.

Entre 1 et 5 mm : bords droits.

Epaisseur >= 4 mm chanfrein en V.

Avantages:

Procédé fiable: risques de collage faibles. Soudures de haute qualité.

Arc doux

Tous types de métaux

Travail en position possible. Facile à piloter en faible énergie.

Vitesse de refroidissement faible.

Peu de projections et de fumées.

Inconvénients:

Procédé lent. Taux de dépôt très faible.

Limité aux faibles épaisseurs.

Déformations

Perturbations radioélectriques (HF).

Robotisation délicate (amenée du fil).

Méthodologie: « Tête inclinée A Gauche » - soudage en poussant.

Inclinaison torche 70/80°, MA 10 à 20°. Distance torche pièce 2 à 3 mm. Sortie électrode/buse: la pointe uniquement.

Performances:

Taux de dépôt: 100 g/h en manuel, 2 kg/h en automatique maxi.

Vitesse à plat en remplissage: 10 cm/min.(15 à 30 cm/min à plat en remplissage).

Facteur de marche opérationnel: 30/40 % .

Hygiène/sécurité:

Risques de brûlures.

Pas de soucis vis à vis des fumées de soudure.

Air s'appauvrit en O₂ (Ar + lourd que l'air) --> risque de malaise, asphyxie.

Grande quantité d'ozone dégagée, soucis si endroit confiné.

Rayonnement lumineux extrêmement riche en IR et UV --> verres de protection. Attention aux réflexions multiples en soudage inox et Alu.

Dispositif d'aspiration des poussières pour éviter inhalation des métaux lourds lors de l'affutage des électrodes.

Dangers liés au courant électrique --> mise à la terre, disjoncteur différentiel.

Procédés dérivés:

TIG pulsé dans le cas où on recherche une maîtrise de l'En, volume bain et péné (pe métaux lourds en CC, alliages légers en CA).

TIG orbital: raboutage de tubes. Totalement automatisé.

TIG double flux: constriction de l'arc par 1 gaz annulaire. Augmentation des performances (intensité moindre pour une épaisseur donnée, volume du bain + faible, cordon étroit, ZAT et déformations limitées).

TIG fil chaud: chauffage du MA par effet Joule. Taux de dépôt 3 à 4 fois + élevés (4 kg/h maxi). Soudage automatique.

TIG multi cathodes: 3 ou 4 têtes TIG réduites placées l'une derrière l'autre. 1 alim par tête. Bain de fusion unique. Première tête: préchauffage, suivantes péné et soudage, la dernière lissage du cordon. Vitesse multipliée par 10 / TIG manuel.

A-TIG: dépôt d'une mince pellicule de flux activant. Effet de constriction de l'arc par vaporisation de ce flux. Péné augmentée. Soudage automatique.

SOUDAGE A L'ARC AVEC FIL ELECTRODE FUSIBLE – MIG/MAG – GMAW – 131/135

MIG 1942 MAG 1960

Domaine d'emploi: tous types d'industries (charpente métallique, ferroviaire, mécano soudure, agricole, automobile, rechargement, réparation).

Aciers de construction non alliés ép > 0,5 mm, aciers alliés, alliages Ni/Cu/Al

Soudage métaux ferreux et non ferreux (bases Ni).

60% du métal déposé en France.

Source de chaleur: arc électrique.

Mode de protection: par atmosphère gazeuse.

MIG: gaz inerte (groupe I) He ou Ar. Alliages légers Al, base Ni, base Cu, Ti, Zr..

MAG: gaz actif (groupe C) CO₂ ou CO₂+O₂ aciers ou mélanges activés (groupe M) Ar/CO₂ ou Ar + CO₂ + O₂ pour aciers non alliés.

Ar + O₂ ou Ar+CO₂+H₂ inox austénitiques (CO₂ < 5% pour limiter l'apport en C).

Prévoir protection envers si soudage en pleine péné Ar ou N₂ (sinon rochage).

Influence des gaz:

Ar: potentiel d'ionisation le + faible --> bon amorçage et stabilité de l'arc. Pas possible d'obtenir du court circuit. Bain de fusion en « doigt de gant » - risque de soufflures.

He: conduit mieux la chaleur. Arc instable. En de soudage augmentée, améliore la péné. Racine massive et bon mouillage. Gaz cher.

CO₂: se décompose dans l'arc en CO + O₂. CO très réducteur désoxyde le bain mais carbure le métal fondu. Cordon bombé: bonne péné mais mouillage moyen. Pas possible d'obtenir de la PA. Principalement utilisé en mélange.

H₂: très réducteur (groupe R) --> cordons brillants/bel aspect. Bonne conductibilité thermique, faible tension d'ionisation --> forte péné. Jamais utilisé seul car très inflammable.

O₂: fortement oxydant. Jamais utilisé seul (mélange, <10%). Bon mouillage, stabilité d'arc. Risque collage et soufflures car cordon en doigt de gant.

Principe: arc électrique établi entre fil électrode et pièce à souder. Fusion du fil auto-régulée (d'où le nom semi-automatique). En conditions stables vitesse fusion fil = vitesse dévidage fil. Si l'arc s'allonge U augmente et I diminue rapidement. Le fil fond moins vite et la longueur d'arc diminue. Si l'arc diminue, U diminue et I augmente rapidement. Le fil fond plus vite et l'arc s'allonge.

Refroidissement torche à l'eau pour intensités > 250/300 A.

Générateur carac statique plate. U vide 10 à 60 V. Icc élevée --> amorçage arc instantané.

CC + au fil dans 99% des cas. Fil soumis au bombardement électronique fond mieux, arc + stable, bonne péné et taux de projection mini.

3 modes de transfert:

Court circuit : tension et vitesse dévidage faibles (Imoyen < I critique = 250A/mm² pour Ar/CO₂ 200A pour Ar/O₂, V 3 à 4 m/min). Arc court --> la goutte en formation touche le bain (court circuit). Elle se détache par effet de pincement dû aux forces électromagnétiques. Icc est très élevé et provoque de nombreuses projections. Une self est introduite dans le circuit pour limiter les variations trop brusques d'intensité. Cette inductance ne sert à rien dans les 2 autres modes. MAG uniquement épaisseur ≤ 6 mm, passes péné, toutes positions, fil 1,2 maxi. Sensible au collage et nombreuses projections. Pas possible avec gaz inerte pur (collage).

Grosses gouttes ou globulaire: régime intermédiaire. Croissance goutte lente, se détache par la pesanteur. Faible péné et nombreuses projections. A éviter. Remplace CC et PA quand il ne sont pas possibles.

Pulvérisation axiale: tension et vitesse dévidage élevées ($I > 250 \text{ A/mm}^2$, $v 12 \text{ m/min}$). Arc long et stable. Les champs magnétiques sont suffisants pour pincer le fil (force de Laplace) --> fines gouttelettes projetées à grande vitesse --> péné importante. Peu de projections, moins sensible au collage, excellent taux de dépôt. MAG non ferreux et aciers alliés épaisseur $> 5 \text{ mm}$. Pas possible avec gaz actif pur (risque de soufflures). Pas de travail en position (réservé au remplissage).

Paramètres: bon fonctionnement = équilibre vitesse dévidage / vitesse de fusion

-Tension conventionnelle à l'arc: $U_2 = 14 + 0,05 I_2$ jusqu'à 600A, 44V au delà. Dia fil augmente --> tension augmente.

-Intensité ou vitesse de dévidage du fil. Gamme d'intensité 100 à 350 A, $v 0,8$ à 12 m/min

-Valeur de la self: en court circuit. Trop forte --> bain « froid », cordons bombés, collage, trop faible --> projections.

-Longueur de fil sorti: échauffement du fil par effet Joule --> vitesse de fusion influencée.

-Sens d'avance:

en tirant: péné et surépaisseur + importantes. Vitesse + faible car visibilité joint – bonne. Utilisé en PA --> grandes vitesses de dépôt.

En poussant: péné moins importante, surépaisseur peu marquée. Vitesse + grande car vision totale (Al ne se fait qu'en poussé).

-Nature et débit gaz: l/min par mm de dia de buse (10 à 25 l/min). Buses dia 10 à 25 mm.

La nature du gaz de protection influe sur le transfert du métal dans l'arc et sur l'aspect et péné des cordons.

Métal d'apport: fils pleins dia normalisés 0,6 – 0,8 – 1 – 1,2 – 1,6 – 2 – 2,4 – 3,2 mm. Pas de court circuit au delà de 1,2.

Préparation des pièces: pas d'épaisseur limite en théorie.

Aciers et inox:

$\text{ép} \leq 1,5 \text{ mm}$: bords droits sans jeu

1,5 à 4 mm inclus : bords droits avec jeu = $\text{ép}/2$

5 à 12 mm: chanfrein en V \acute{e} , angle 45 à 60°. Jeu = 2 mm quelle que soit épaisseur.

$\text{Ép} \geq 12$: chanfrein en X ou tulipe selon l'accès.

Le talon n'est pas nécessaire en MIG/MAG mais peut permettre de gagner du volume à déposer.

Alliages légers:

1,5 à 6 mm inclus: bords droits

6 à 12 mm inclus : chanfrein en V \acute{e}

$\text{Ép} > 12$: chanfrein en X ou tulipe selon l'accès.

Tomber la carre côté envers pour l'aluminium afin d'éviter la formation des « paires de fesses ».

Avantages:

Autorégulation de l'arc.

Productivité élevée.

Facilité de formation.

Soudage dans les 2 sens.

Pas de laitier.

Entièrement automatisable.

Inconvénients:

Risque de collage en court circuit.

Peu recommandé pour les appareils à pression.

Nombreuses projections.

Maintenance de l'installation (tube contact, gaine, buse).

Méthodologie: difficulté = maîtriser la longueur du fil sorti. Si trop sorti on chauffe le fil par effet Joule --> risque de collage. Longueur de fil libre 18 mm valeur communément admise.
Il faut ajuster la longueur d'arc à la vitesse de dévidage.
Inclinaison torche 80° (90° en robotique).
Nettoyage fréquent de la buse.

Performances:

Vitesse 35 à 50 cm/min en manuel --> 1m/min en robotique (jusqu'à 3,5 m/min).
Facteur de marche opérationnel: 40 % .
Taux de dépôt: 2,5 à 4 kg/h en remplissage.

Hygiène/sécurité:

Risques de brûlures. Projections.
Dangers liés au courant électrique --> mise à la terre, disjoncteur différentiel.
Accidents oculaires, « coup de soleil » (rayons UV/IR) --> masque ou lunettes obligatoire.
Inhalation / ingestion de poussières métalliques (fumées) --> torche/hotte aspirante.
Air s'appauvrit en O₂ (Ar + lourd que l'air) --> risque de malaise, asphyxie.

Procédés dérivés:

MIG pulsé: réunit les avantages du mode court circuit (bonne maniabilité et faible volume bain, travail en position, faibles épaisseurs) avec ceux de la PA (absence de projections, mouillage, aspect cordons).

Source de courant pulsé: formation et détachement goutte en période forte intensité, maintien de l'arc sans fusion en période faible intensité. Intensité moyenne faible (<Icrit) proche de celles du court circuit, bain reste petit et maniable. 1 goutte par pulsation si réglage optimal.

Pas de risque de collage puisque l'arc est maintenu en permanence.

Utilisé pour alliages légers en faible épaisseur, soudage en position, mise au point très fine pour matériaux délicats (base Ni ou Ti).

Prix élevé, complexité des réglages.

Mode synergique: lois de variation des paramètres de pulsation établies par les constructeurs en fonction du matériau à souder, du dia et nuance fil, du gaz et de la vitesse fil. Le générateur ajuste automatiquement les paramètres de pulsation en fonction des variations de la vitesse du fil.

Soudage à 2 fils/2 générateurs: « MIG tandem ». Bain unique. Intensités élevées, générateurs pulsés et synchronisés pour éviter problème de soufflage magnétique*. Soudage grande vitesse (jusqu'à 3,5m/min), épaisseurs jusqu'à 6 mm.

Variante « bifil »: 2 fils fins avec 1 seul géné. Bain plus étroit et vitesse + importante qu'avec 1 seul fil.

*Soufflage magnétique: n'apparaît que sur matériaux magnétiques, en courant continu. Soudures d'angle ou en chanfrein profond. I en général > 250 A.

Solutions: courant alternatif / Réduire intensité / Arc court / Appendices aux extrémités des pièces à souder / Pointage soigné / Position torche ou électrode / Pas de pèlerin / Position câble de masse (au plus près) / Doubler les connecteurs de masse / Démagnétiser les pièces avant soudage.

Arc rotatif: 1 quatrième mode est possible « time process ». I supérieur à la PA / forte énergie.

Champ électromagnétique tournant créé dans la colonne d'arc --> arc rotatif. Cordons larges et taux de pénétration diminué. Applications particulières (automatisées). V fil jusqu'à 30m/min / 13 à 25 kg/h.

Court circuit contrôlé ou forcé: générateurs à caractéristique verticale avec régulation électronique (multiprocédés: permettent de faire du TIG ou électrode enrobée). Permet de limiter la hausse

brutale de I lors du court circuit. Applications : tôles minces, passes péné tubes ou tôles, raboutage avec jeu variable. Qualité soudure équivalent TIG mais vitesse 2 à 3 fois plus élevée. Compétence personnel en matière de réglage et maintenance. Formation soudeur simplifiée.

Fil fourré sous protection gazeuse: 136/137 FCAW.

Fil fourré = enveloppe métallique remplie de poudre.

Principe de base: rés fil fourré > fil nu donc fond + vite --> vitesse de dévidage augmentée.

Meilleure stabilité de l'arc car densité de courant + importante.

Courant continu – polarité selon type fil. 136 même comportement que 135.

Stick out plus important: 20/25 dia fil. Paramètre important. Si insuffisant: mauvaise combustion des produits de fourrage --> risques de soufflures et caniveaux. Pb plus prononcé en fils fourrés sans gaz.

Avantages:

Accroissement productivité (20% environ). 5 à 7 kg/h, facteur de marche 35 à 55%.

Meilleure souplesse opératoire.

Excellentes carac méca des dépôts. Utilisation pour appareils à pression.

Préparation simplifiée.

Inconvénients:

Difficulté d'utilisation en passes de fond.

Coût du fil.

Galets de dévidage spéciaux (crantés/ systèmes 2 voire 4 galets).

Laitier à éliminer.

Fil sans laitier: à poudre de fer type M essentiellement. Taux de dépôt augmenté par rapport au fil plein .

Fil avec laitier: grande variété de fils, grande souplesse. Aciers fortement alliés essentiellement (protection envers assurée). Soudage en tirant uniquement.

Fil fourré sans gaz: 114 FCAW --> automatisation du soudage à l'électrode enrobée.

Brevet américain INNERSHIELD. Gamme étroite de produits d'apport. Principe du fil fourré avec gaz et avec laitier mais le gaz est produit par le fourrage. + de laitier. Le fourrage a les mêmes fonctions que celui de l'électrode enrobée.

Taux de dépôt 1,5 à 15 kg/h > SAEE mais < fil fourré avec gaz.

Applications: chantier (moins sensible au vent), construction métallique.

Installation idem fil fourré avec gaz ou installation spécifique (générateur + puissant, à carac statique verticale , système électronique de régulation d'arc). Polarité + ou – selon les fils.

Soudage en tirant. Stick-out très important (50 mm).

Préparations: sur lattes support, passes de remplissage en chanfreins fermés (45°).

Fumées et projections abondantes.

SOUDEAGE A L'ARC SOUS FLUX EN POUDRE – SAFP – SAW – 121

1935

Domaine d'emploi: Industrie lourde : charpente métallique, construction navale, off shore, réservoir de stockage, bouteilles gaz.

Aciers (non alliés, faiblement et fortement alliés), épaisseur mini 5 mm (mais applications en épaisseur 2 mm).

Source de chaleur: arc électrique. Partie de l'énergie transmise au bain par effet Joule (flux conducteur).

Mode de protection: Cavité de gaz (CO et CO₂) créée par la fusion du flux en poudre. Laitier sur cordon refroidi.

Principe: arc entre fil/électrode et pièce à souder (flux/fil électrode/arc/laitier/cordon/réservoir flux). Procédé automatisé --> guidage tête de soudage par potence ou banc.

CC en majorité (génératrices ou transfo/redresseur à thyristors). + au fil en majorité (- si rechargement).

Géné doit permettre le réglage de U et I séparément.

Caractéristique plate jusqu'à 450 A, tension constante, I asservie à vitesse fil. Amorçage immédiat comme en MIGMAG (I_{cc} suffisant).

Carac plongeante ou verticale au delà, I constante, U asservie à vitesse fil.

Dispositif d'amorçage spécifique (HF...) ou matelas de paille de fer au bout du fil qui se volatilise à l'amorçage.

Amorçage "à la volée": fil vient au contact de la pièce mais ne colle pas du fait du mouvement du chariot.

Applications en CA (transfo monophasé) : tandem et/ou fortes intensités > 450A (pb de soufflage magnétique), matériaux sensibles (9% Ni). Carac plongeante.

Intensité 250/400 A en monofil, jusqu'à 1500 A en multifils et feuillard (I > 600 A pb de soufflage magnétique).

Tension à vide CC 50 à 70 V / CA 70 à 80 V.

Paramètres:

-Intensité: influence la pénétration mais peu largeur cordon et surépaisseur. Si I trop élevée --> effondrement et résilience diminue, I trop faible collage et manque pénétration.

-Tension conventionnelle à l'arc: $U_2 = 20 + 0,02 I_2$ jusqu'à $I_2 = 1000$ A, 40 V au delà. Si U trop forte --> largeur cordon et conso flux augmentent + risque caniveaux. Si U trop faible cordons bombés et risques collage.

-Vitesse de soudage: si trop élevée --> cordon étroit et peu pénétré. Si trop élevée cordon large et pénétration moins bonne. Il existe 1 vitesse idéale pour la pénétration.

Si hauteur cordon > largeur: risque de fissuration.

-Diamètre du fil: s'il augmente densité de courant et pénétration diminuent.

-Longueur de fil sortie (« stick out »): 5 à 7 fois dia fil. Si inférieur: échauffement tube contact, si supérieur mauvais guidage, pénétration diminue, arc – stable, taux de dépôt augmente.

-Polarité: si – au fil pénétration diminue, stabilité arc moins bonne, vitesse fusion et taux dépôt augmentent.

-Hauteur talus flux: 5 à 7 fois dia fil (un peu au dessus du tube contact). En dessous: mauvaise protection, au dessus --> déformation des cordons (poids du flux).

-Position prise de masse: 1 dans le prolongement de la soudure pour tôles minces, 2 (1 à chaque extrémité ou de chaque côté) pour tôles épaisses.

-Préparation des bords: travailler en jointif ou avec support.

Métal d'apport: couple fil/flux. Trio fil/flux/métal de base.

Choix selon matériau à souder, épaisseur, MOS (procédé/nb de passes/prépa bords/postchauffage).

Compo chimique métal déposé dépend du fil, du flux et des paramètres U et I. Si I augmente les échanges diminuent (compo tend vers celle du fil). Si U augmente échanges fil/flux augmentent.

Fil électrode dia: (0,8) – 1,2 – 1,6 – 2 – 2,4 – **3,2** – 4 – 5 – 5,5 – (6) mm.

Système de redressage fil impératif.

Plage d'intensité que peut supporter le fil: entre 100 et 200 fois le dia.

Courbe de fusion du fil = taux de dépôt en fonction de I. Dépend du dia fil, de la nature du courant (CC ou CA), de I, du « stick out », de la polarité, de la nature du fil (acier doux ou inox).

Pour 1 même fil on peut utiliser plusieurs flux avec des résultats différents.

Flux: rôles électrique, physique, métallurgique. 2 familles:

flux fondus: structure granulaire. Fusion au four + broyage + tamisage. Faible reprise d'humidité, homogènes. Soudage intensités élevées.

La granulométrie influe sur la soudabilité opératoire.

Granulométrie fine --> meilleure mouillabilité, moindre péné, facilité angle avec forte gorge, conso + importante.

Granulométrie « grosse » --> dégazage + facile.

flux agglomérés: grains compactés. Broyage + mélange / granulage + liant + séchage au four. Sensibles à la reprise d'humidité (pour taux H diffusible < 5ml/100g métal fondu --> étuvage 200°C/2h mini). Fusion plus douce, laitier facilement détachable.

Il existe des flux pour grande vitesse (facilitant le dégazage).

Préparation des pièces: elle influe sur la composition finale de la ZF (nb de passes).

Tôles fines: 2 à 5 mm sans prépa ou petit chanfrein pour éviter surépaisseur --> dilution jusqu'à 70% (ZF est à majorité MB).

Bord soyé pour ép 2 à 4 mm.

Tôles épaisses: multipasses, 6 à 12 mm bords droits jeu 0 à 6 mm.

12 à 15mm bords droits jeu 5 à 7 mm , prépa en Y (talon 5 à 7 mm) ou prépa avec chanfrein en V angle 60° ou en X --> dilution faible. Petites passes décalées sur les bords plutôt que grandes passes centrales pour faciliter le décrassage.

Angle positionné ou non, en angle extérieur, à clin, par recouvrement.

Sans support envers --> péné partielle. Pour péné totale --> support envers (latte Cu ou céramique, latte acier MB subsistante ou non, la pièce elle-même, lit en poudre plaqué par baudruche, support adhésif). Latte « perdue »: elle participe à la fusion.

Support envers refroidi pour fortes énergies.

Avantages:

Dépôt de bonne qualité (compacité et carac méca). Cordons lisses, mouillage excellent. Pas de projection ni fumées.

Pouvoir de péné élevé (1 passe BW 15 mm bords jointifs).

Vitesse d'avance élevée, taux de dépôt élevé.

Inconvénients:

Difficulté de soudage en position (réservé pour soudure à plat ou en corniche).

Réservé aux grandes longueurs.

Installations coûteuses (système de guidage, vireurs, potence, chariot, dispositif d'aspiration flux, étuvage et recyclage flux).

Nécessite 1 support pour tenue du flux.

Méthodologie: prévoir appendices (ou martyrs ou abouts) aux 2 extrémités des soudures longitudinales.

Tête décalée de l'axe en soudage circulaire pour solidifier à la tangence.

Performances:

Vitesse d'avance 15 à 300 cm /min.

Taux de dépôt : 2,5 à 12 kg/h (monofil). Maxi 18 kg/h.

Péné 10 mm.

Facteur de marche opérationnel: 70% .

Hygiène/sécurité: peu de risques.

Arc invisible --> pas de rayonnement.

Pas de fumées.

Procédés dérivés:

122 avec électrode en bande (rechargement / feuillard). Faible densité d'énergie --> péné limitée.

Déformations importantes --> ép tôle mini 16 mm. CC polarité directe (- au feuillard).

Réparation ou dépôt de revêtement (inox pe).

125 fil fourré.

Arc tandem (2 fils): 1 fil CC , 1 fil CA. 1 seul moto-réducteur entraîne les fils simultanément.

Tandem: action des 2 fils successive. Allongement source de chaleur --> augmentation vitesse d'exécution jusqu'à 50%.

Transverse: chaque arc attaque une rive du joint (prépa des joints peut être moins bonne).

Semi-transverse: position intermédiaire des 2 précédentes.

Fil chaud: procédé à haut taux de dépôt. Ajout d'un 2ème fil fin chauffé par effet joule (CA), à l'avant du bain.

SOUDAGE PAR FAISCEAU D'ELECTRONS – FE - 76

1954

Domaine d'emploi:

Automobile / industries aéronautiques et spatiales.
Tous les métaux, épaisseur qqes mm à 50 mm.

Source de chaleur: faisceau d'électrons focalisé. Fusion instantanée et localisée des pièces à assembler.

Mode de protection: vide.

Principe: focalisation d'un faisceau d'électrons dans le vide (pour limiter les obstacles). Le niveau de vide dépend du matériau à souder.

Energie cinétique électrons transformée en énergie calorifique à l'impact.

Pas d'apport de métal.

Formation du cordon de proche en proche par déplacement du capillaire de vapeur ("Keyhole").

Transfert direct de l'énergie au coeur de la pièce.

Cordon très étroit et pénétrés (rapport péné/largeur varie de 20 à 1). ZAT très étroite.

Bourrelet ext correspondant au retrait.

Régime débouchant côté envers: 25% de la puissance, projection de particules de métal.

Meilleur contrôle de la péné, meilleur dégazage, toute position. Mais limité en ép à plat (25/30 mm sur acier) sinon effondrement du métal liquide, cordons irréguliers et bombés, caniveaux, sous-épaisseur.

Régime non débouchant: cordon plat, bel aspect, bonne tenue bain à plat. Ep jusqu'à 120 mm de péné à plat. Mais péné irrégulière (« spikes »), mauvaise tenue bain en position, dégazage par 1 seule face (risque de porosités).

Paramètres:

-Electriques:

-Tension d'accélération 30 à 150 kV (environ 1000 fois la tension d'un arc). Influe sur la prof du cordon.

-Intensité 1 mA à 1A (environ 1/1000 ème de I arc).

-Puissance P(kW) * 2 -> ép à souder en mm.

-Intensité de focalisation: param électrique pour ramener le point de focalisation sur la pièce. Donne la qualité de la soudure. Selon épaisseur et matériau, se détermine sur coupon.

Réglage optimum.

Ifoc trop forte: faisceau remonte au dessus de la pièce --> cordon altéré.

Ifoc trop faible --> défocalisation --> faisceau rentre dans la pièce (qualité – altérée).

-Déflexion / vibration.

-Géométriques:

-Distance de tir (habituelle 20 cm).

-Position de soudage

-Vitesse de soudage: si v augmente largeur et prof cordon diminuent.

-Niveau de vide (vide secondaire 10^{-4} à 10^{-6} mbar / vide primaire 10^{-2} mbar). Influe sur la forme du cordon (largeur, prof, surépaisseur).

-Choix du couple vitesse/puissance (intensité): influe sur la largeur du cordon. Puissance faible et vitesse lente --> cordon large (intéressant en série car meilleure tolérance sur le positionnement du faisceau). Classique en soudage 8 kW (jusqu'à 45 / 100 kW).

Puissance forte et vitesse rapide --> cordons fins, risque de manque de fusion si faisceau mal positionné.

Canon à électrons:

Partie électrostatique (puissance du faisceau): échauffement d'une cathode (filament en W ou matériau thermoémissif) – accélération électrons par ddp (50 à 150 kV) entre wehnelt et anode.

Partie électromagnétique (optique de focalisation): bobine de focalisation magnétique, bobine de déflexion. Faisceau de 1 mm de dia environ.

Déplacement de la pièce à chaque fois que c'est possible (canon fixe de préférence).

Machines à canon externe ou interne (enceinte de qqes dixième de m3 à qqes centaines de m3).

Machines à vide local (pistolet de soudage, ventouse).

Préparation des pièces:

Soignée. Accostage. Usinage rugosité Ra 3,2.

BàB (dénivelation acceptable), angle, à emboitement, par transparence, sur bords relevés, à clin (le plus délicat).

Avantages:

Procédé universel.

Soudure de qualité (vide).

Automatisé / cadences élevées --> 2 à 6 m/mn.

Très faibles déformations (retrait transversal 1/100 à 1/50 ème de l'épaisseur) --> pièces finies d'usinage (procédé de mécanicien). Pas d'outillage de bridage.

Pas de MA dans la plupart des cas.

Inconvénients:

Coût élevé.

Peu productif.

Accostage des bords soigné.

Taille et forme pièces à souder limitées.

Pas possible sur pièce avec aimantation rémanente (risque de déviation du faisceau).

Méthodologie:

Ep maxi soudable acier = 2 * puissance canon.

Performances:

Tenue en traction --> aucun effet car ZF très fine. Résistance aux chocs: attention à la fragilisation en ZF et ZAT (trempe).

Rendement 60%.

Péné maxi 25 mm en BàB bords droits.

Hygiène/sécurité:

SOUDEGE PAR FAISCEAU LASER – 751

19xx

Laser à gaz CO₂ (10 à 15%), He transmet En électrique au CO₂, N₂ pour ref. Pompage par décharge de condensateur.

Longueur d'onde 10,6 µm. Emission en continu.

Transport par miroirs (optiques chères). Focales 150 à 500 mm.

Puissance maxi 25 kW (industrie).

Laser à solide YAG (cristal Yttrium Aluminium Garnet). Pompage par flash de lumière blanche.

Longueur d'onde 1,06 µm (soudures plus fines). Emission par impulsions (qqes ms).

Transport par miroirs (optiques simples) ou par fibre optique. Focales 100 à 200 mm, 50 mm en pulsé.

Puissance maxi 1 kW (industrie) en pulsé, 4,5 kW en continu (pompage par lampes ou par diodes).

Laser diodes: très compact. Performances dégradées par rapport aux 2 autres techno.

Longueur d'onde 808 à 940 nm. Emission en continu. 3 kW

Laser de coupage diffère du laser de soudage (source et tête).

Domaine d'emploi:

Aéronautique / spatial / médical.

Tous matériaux (métaux, bois, textiles...). Puissance élevée pour matériaux à forte conductibilité thermique (Al Cu Ag Au). Difficultés sur Cu et Al et leurs alliages (réflectivité).

Ep maxi 20 mm.

Possibilité de souder à l'état de traitement thermique final.

Source de chaleur: énergie radiative monochromatique et cohérente focalisée. Rayonnement électromagnétique.

Mode de protection: gaz inerte (Ar ou He, voire N₂).

Principe: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Amplification de la lumière par émission stimulée de radiation. En électrique transformée en En lumineuse. Excitation / Absorption / Emission spontanée / Emission stimulée.

Décharge électrique entretenue dans un mélange de gaz sous pression réduite. Emission de photons avec amplification par réaction en chaîne (photons dans la même direction, même sens et même longueur d'onde). Miroirs parallèles de chaque côté du tube (résonateurs). 1 des 2 semi-transparent récupère une partie des photons.

Focalisation – densité de puissance atteinte environ 70 kW/mm².

Formation du cordon de soudure:

En mode continu: déplacement d'un front de fusion et de solidification avec le capillaire.

En mode pulsé: formation et solidification stationnaires du capillaire. Un point de soudure est généré à chqe impulsion. Notion d'incrément (distance entre 2 points). Points séparés ou cordon continu si incrément faible. Soudage plus lent qu'en mode continu.

Paramètres:

-Faisceau laser:

-Mode pulsé: énergie du pulse, durée d'impulsion: si trop faible --> porosités. Si fréq de pulsation puissance crête trop faible --> pas de péné; trop forte --> caniveaux, sous-épaisseur.

-Mode continu: puissance moyenne. Domaine de Soudabilité Opérateur DSO --> couple vitesse / puissance. V importante + pui faible --> péné incomplète. Pui forte et vitesse faible --> effondrement. Domaine de morphologie de cordon acceptable avec absence de porosités.

Puissances classiques en soudage: 6 à 8 kW.

-Longueur d'onde

-Carac faisceau avant focalisation: répartition énergétique, divergence.

-Optique de focalisation: type, focale (en mm)--> soudage/coupage/traitement thermique selon la focale (péné diminue si focale augmente), distance de travail / point de focalisation (le point de foc peut être au dessus de la pièce).

-Transport du faisceau: fibre optique, chemin optique à miroir.

-Matériau:

-Nature: coeff d'absorption, T° fusion et vapo, conductibilité thermique, intervalle de solidification, réactivité avec atm ambiante.

-Géométrie de joint: épaisseur, type assemblage, accessibilité, position de soudage.

-Air ambiant sec et dépoussiéré (pas de nécessité de vide).

-Gaz de soudage: rôle (protection envers/endroit, soufflage du plasma --> assure la péné, interaction laser/matière), nature (pur ou mélange), débit, traînard (pour matériaux avides d'O₂).

-Type buse (dia), positionnement

-Vitesse de soudage.

Tête de soudage: lentille (focalisation), buse (arrivée gaz de protection), système de ref par eau.

Préparation des pièces:

Soignée. Accostage. Usinage rugosité Ra 3,2.

BàB (dénivellation acceptable ép/10) jeu 0,02 à 0,3 mm selon ép, angle, à emboitement, par transparence, sur bords relevés, à clin (le plus délicat).

Avantages:

Rapide et fiable: automatisé / cadences élevées --> 2 à 6 m/mn.

Très faibles déformations (retrait transversal 1/100 à 1/50 ème de l'épaisseur) --> pièces finies d'usinage (procédé de mécanicien). Pas d'outillage de bridage.

Pas de MA dans la plupart des cas.

Inconvénients:

Coût élevé (surtout CO₂ et YAG continu) --> nécessité d'une productivité optimisée.

Accostage des bords soigné.

Méthodologie:

Epaisseur soudable sur aciers: 1 à 1,5 fois la puissance.

1 mm - 1 m/min - 1 kW.

Performances:

BW inox épaisseur 1mm, 300 W, vitesse de soudage 20 cm/min (60 pour épaisseur 0,5 mm).

Rendement 5 à 30% --> beaucoup d'énergie perdue (refroidissement nécessaire).

Péné maxi 15 mm (CO₂) en BàB bords droits.

Hygiène/sécurité:

exposition aux rayonnements directs ou indirects. Brûlures cutanées et oculaires, lésions irréversibles sur l'oeil.

Lunettes de protection / éviter surfaces réfléchissantes.

Laser de classe 1.

SOUDEGE PLASMA – SP – PAW - 15

1922

Domaine d'emploi:

Matériaux --> tous les métaux métallurgiquement soudables sauf alu et ses alliages (polarité directe --> pas de décapage). Cuivre difficile (limité à 4 mm). Fontes à graphite sphéroïdal, Titane (20/25 mm en jet débouchant 1 passe).

Industries chimiques, tubes soudés.

Soudage faibles énergies « mini-plasma » ou microplasma: épaisseurs 1/100 à 8/10 mm, 0,2 à 10 A, gaz plasmagène 1 à 3 l/min, procédé manuel voire automatique. Proche du TIG.

Soudage fortes énergie: épaisseur 2,5 jusqu'à 10 mm, 500 A, gaz plasmagène 15/20 l/min, procédé automatique. Technique du jet débouchant ou « keyhole ». Jet conditionné pour traverser toute l'épaisseur. Trou dia 1 à 3 mm. Le métal liquide passe de chaque côté du jet et se solidifie à l'arrière. Cordon en forme de verre à pied. Possibilité d'utiliser du MA. Procédé automatique.

Source de chaleur: jet de plasma concentré. Plasma = 4 ème état de la matière = milieu gazeux fortement ionisé. T° atteinte très élevée (5 à 20000°C dans la colonne plasma) torche et électrode refroidies par eau.

T° fonction de la nature du gaz, du débit, de l'intensité et du diamètre de l'orifice de la tuyère.

Mode de protection: écoulement d'un gaz par 1 buse extérieure concentrique au plasma. Protection du bain, du plasma et du MA.

Gaz de protection : Ar pur, mélange Ar/H₂ (--> 10%), mélanges Ar/O₂ (--> 5%), Ar/CO₂ (--> 20%). O₂ et CO₂ destinés à améliorer le mouillage.

Débit 15 à 20 l/mn.

Protection envers: Ar ou Ar/H voire N₂ (neutre jusqu'à 750/800°C).

Principe: dérivé du TIG. Procédé à forte énergie.

Colonne gazeuse constrictée brutalement au droit d'un arc TIG.

Electrode réfractaire (cathode) / gaz plasmagène / gaz de protection / tuyère.

Si anode est buse torche --> arc soufflé. L'arc est établi entre la cathode et la buse, la pièce n'est atteinte que par le jet de gaz chaud (utilisé en projection à chaud). Faible rendement 30%.

Si anode est pièce --> arc transféré. 1 arc auxiliaire de très faible énergie est établi entre la cathode et la buse pour l'amorçage, on ferme alors le circuit entre la cathode et la pièce --> l'arc est transféré sur la pièce. + gde énergie (utilisé en coupage et soudage). Rendement 50/60%.

CC électrode au -. Générateur carac statique plongeante ou verticale (transfo/redresseur). Tension à vide imp (80V mini).

Amorçage par étincelle pilote entre électrode (cathode) et tuyère (HF). Ionisation partielle du gaz (débit réduit) --> établissement de l'arc pilote (arc soufflé). Cet arc ionise le gaz plasmagène et chauffe l'électrode favorisant ainsi l'émission des électrons.

Paramètres:

-Tension: le double du TIG à intensité égale. 24 à 30V.

-Intensité: 100 à 500 A (300/400 A couramment).

-Réglage hauteur électrode/orifice.

-Débit gaz plasmagène.

-Type de tuyère (dia orifice).

Gaz plasmagènes: : pour souder gaz avec inertie chimique totale.

Ar (faible potentiel d'ionisation et faible conductibilité thermique) --> cordons étroits.

Mélange Ar/H₂ (H₂ à 5%, vitesse de soudage augmentée).

He (conductibilité thermique élevée) --> cordons larges. Utilisé en rechargement.

Mélange Ar/He.

Débits 3 à 10 l/mn.

Buses: double circuit de ref. 2 circuits gaz indép. Réglage de l'électrode en hauteur et centrage/orifice.

Désignées par la puissance maxi de l'arc (pui max 10kW pour inox, 15 kW pour aciers).

Préparation des pièces: épaisseur maxi soudable en 1 passe dépend du matériau mais aussi de sa nuance (var d'une coulée à l'autre). Dépend également de la vitesse de soudage. Réglages d'autant plus pointus que l'épaisseur augmente.

En jet débouchant: bord à bord sans écartement. Sans soutien envers (dégagement de 15 mm environ pour que le jet débouche sans obstacle). Evanouissement délicat sur soudures circulaires.

Bords bruts de sciage. Jeu faible acceptable (péné augmente) jusqu'à 1 mm.

Chanfrein au delà de 12 mm – talon peut aller jusqu'à 10 mm. Chanfreins de formes diverses, peuvent être plus fermés.

Avantages:

Vitesses beaucoup plus élevées que le TIG. Péné + imp que TIG.

Préparation simplifiées.

Inconvénients:

Onéreux.

Peu souple.

Performances: 10/12 mm en 1 passe sans chanfrein sans MA sur inox. A plat et en position.

Rendement 50/60 % arc transféré.

Facteur de marche opérationnel 90%.

Vitesse 50 à 120 cm/mn.

Taux de dépôt : nul intrinsèquement.

Hygiène/sécurité:

Risques de brûlures.

Pas de soucis vis à vis des fumées de soudure.

Air s'appauvrit en O₂ (Ar + lourd que l'air) --> risque de malaise, asphyxie.

Grande quantité d'ozone dégagée, soucis si endroit confiné.

Rayonnement lumineux extrêmement riche en IR et UV --> verres de protection. Attention aux réflexions multiples en soudage inox.

Dangers liés au courant électrique --> mise à la terre, disjoncteur différentiel.

Bruit important.

Procédés dérivés:

Arc semi-transféré: 2 arcs soufflé et transféré. 2 génés dont le + est relié à la buse pour l'1, à la pièce pour l'autre. Rechargement par projection à chaud.

SOUDAGE PAR RESISTANCE PAR POINTS – RPP – RW- 21

1877

Domaine d'emploi:

Essentiellement construction automobile (tolerie carrosserie) / électro-ménager / ferroviaire / mobilier.

Tous types d'acier (non alliés, alliés, revêtus, HLE/THLE, fortement alliés), alliages légers (Alu --> décapage pour retirer l'alumine), bases Ni.

Tôles minces qqes 1/100ème jusqu'à 7/8 mm. Facteur maxi de 3 entre 2 ép différentes.

Couramment 0,5 à 3 mm.

Soudure bimétallique: ok si rés de contact > aux autres, résistivités peu différentes, dispersion des calories homogène.

Source de chaleur: effet Joule (transfo énergie électrique en énergie calorifique). Energie proportionnelle à somme des résistances, carré de l'intensité et temps de passage du courant.

Mode de protection: noyau de métal fondu protégé par métal froid environnant (creuset plastique) et les électrodes.

Principe: procédé sans fusion, par pression. Passage d'un courant électrique + effort de forgeage. Pièces à souder serrées entre 2 électrodes en Cu refroidies. Echauffement par effet Joule au droit des électrodes. Echauffement maxi à l'interface des pièces (résistance de contact). Noyau de métal liquide maintenu grâce à l'effort exercé par les électrodes.

La constance du résultat dépend de la constance des résistances de contact.

La phase d'initiation dép des rés de contact.

Au début de la soudure: compromis --> rés de contact entre pièces élevée pour assurer l'effet thermique tout en ayant un accostage correct.

Augmentation des rés pures des tôles dans la zone de contact --> petit volume métal fondu.

Propagation chaleur --> création du noyau entouré de métal froid appelé creuset plastique et des électrodes en contact. Vol noyau dép des rés de contact, de l'accostage, de la raideur des tôles, de l'énergie, des pertes thermiques.

Pénétration des électrodes dans la peau des tôles --> indentation.

Arrêt du courant: ref rapide du creuset plastique --> retassure + risque de fissures. Une phase de forgeage (effort maintenu ou augmenté après l'arrêt du courant, pendant le ref) permet de limiter ces défauts. Favorise aussi l'affinage du grain.

Paramètres: se recherchent sur l'ép la + faible

-Résistances:

- résistances intrinsèques des électrodes: dépend de la nature des électrodes.

- Résistances de contact: entre électrodes et pièces (augmentent lorsque les électrodes s'échauffent ou se dégradent), entre pièces (doit être toujours la + grande pour que le point se réalise). Rés contact > rés pure (de l'ordre de qqes centaines de μohm à l'ambiante, quasiment nulles à l'échauffement). Dépend de la nature des matériaux (dureté, résistivité), état de surface (rugosité, traitement, oxydes, élaboration), forme des électrodes, T° (diminue quand T° augmente), effort appliqué (diminue quand l'effort augmente) et tps de soudage.

- Résistances intrinsèques des pièces à souder.

Rés pure = $\rho * l / s$. De l'ordre de qqes μohm à T° ambiante, qqes dizaines de μohm à l'échauffement.

ρ : résistivité du métal ($\mu\text{ohm/cm}$), l longueur de la résistance (en cm), s section active (en mm^2).
 ρ augmente avec la T° $\rho = \rho_0 (1 + a (T - 20))$

ρ_0 résistivité à 20°C / a coeff de dilatation linéaire du matériau / T T° considérée.

-Intensités: élevées pour conserver la même puissance (rés diminuant avec l'effort). Cste pendant le soudage. 8000 à 17000 A. I sert à obtenir le liquide. Réglage par l'angle d'ouverture des thyristors. Réglage en pourcentage de puissance et non en Ampères.

-Tension: de l'ordre de 10V.

-Effort sur électrodes: + il est élevé + la dispersion des rés est faible. De l'ordre de 250 à 750 daN.

-Diamètre des électrodes: trop faible (trop pointue) --> formation bourrelet et projections.

Trop élevée --> pas de point.

-Temps de soudage: fait la taille du point, de l'ordre de 7 à 40 périodes de 50 Hz (unité de temps = 1 période = 20 ms). Temps total de 1 à 2 s.

-Cycle: simple --> accostage / soudage (passage courant avec effort) / Maintien effort. Tps maintien = tps de soudage.

Cycles composé (plus complexes): refroidissement avec effort supérieur = forgeage (diminue le volume de la retassure et affine le grain), montée progressive intensité (fortes intensités), réduction vitesse de ref (pente dégressive en intensité), pulsations intensité pour diminuer tps de soudage (temps froid), avec pré ou post chauffage, effort variable, trempe, recuit...

A la volée = cycle répété indéfiniment (réglage de la cadence = tps entre 2 cycles).

Machine de soudage par points:

Vérin de serrage: effort constant ou variable. Vérin pneumatique ou hydraulique (+ rapide) ou moteur électrique (machines récente, contrôle de l'effort, pilotage par ordi). Mesure de l'effort appliqué par dynamomètre.

Transfo: rôle abaisser U et augmenter I ($I_1 * n_1 = I_2 * n_2$). Courant alternatif monophasé. Carac d'un transfo: puissance (fait les performances de la machine), rapport de transfo, impédances circuit primaire et secondaire.

Interrupteur électronique: pilote le passage du courant dans le transfo. Principe du thyristor (impulsion gachette permettant de laisser passer le courant comme 1 diode). On retarde le déclenchement des thyristors pour abaisser intensité.

Séquenceur: réglages pour la bonne exécution des points de soudage (durée du cycle, intensité, effort de forgeage, cycle de recuit, cadence...).

Dispositif de ref: ref du thyristor, du transfo et des électrodes. Dans certains cas: câbles du secondaire.

Electrodes: monobloc ou rapportées. Emmanchement conique la plupart du temps pour faciliter leur démontage. Différentes formes et dim selon l'application.

3 rôles

--> électrique: véhiculer le courant. Conductibilité élec (Cu).

--> Mécanique: accostage, maintien du creuset plastique, forgeage. Carac méca nécessaire (Cu allié au Cr) --> dureté.

--> Thermique: évacuer les calories à leur point de contact, limiter l'expansion du creuset plastique.

Pièce d'usure (nécessite 1 rodage régulier).

Liaison avec secondaire: au moins 1 liaison souple pour déplacements. Câbles/tresses pour grands déplacements, shunt à lamelles pour faibles déplacements.

Différents types de machines:

Presses de soudage (massives, fixes).

Pincés à transfo incorporé (machines autonomes mais limitées en puissance). Palan.

Pincés à souder avec transfo déporté (robots ou machines automatiques).

Machines multi-points: plusieurs points en même tps.

Double point parallèle: 2 ou plusieurs points en même tps. Difficulté: accostage (équilibrages des forces). Intensité * nb de points.

Double point série: 2 points réalisés par le même courant de soudage. Contre-électrode massive.

Point indirect: pour les pièces où la pince ne passe pas. 1 seul point / contre-électrode.

Push-pull: 1 transfo envers. Synchronisation / coût * par 2. Pas de pb d'effet de shunt ni impédance secondaire.

Point: dia optimal $5 * \sqrt{\text{ép}} / 3,5 * \sqrt{\text{ép}}$ mini ou $2 * \text{ép} + 3$ mm.

Ép la + fine – définit également le dia optimal des électrodes.

Carac:

Indentation: dia = dia utile électrode. Profondeur $\leq 10\%$ épaisseur.

Soulèvement de l'interface $\leq 10\%$ épaisseur.

Noyau: dia \leq dia utile électrode.

Contrôle des points: IR en cours de soudure, mesure rés en cours de soudure, visuel, déboutonnage, traction cisaillement, torsion, macro/micro, radio / US.

Retassure acceptable = jusqu'à $0,5 * \text{dia noyau}$.

Préparation des pièces:

Joint à recouvrement sur tôles d'épaisseur identiques ou différentes, 3 ou 4 épaisseurs en tôles minces.

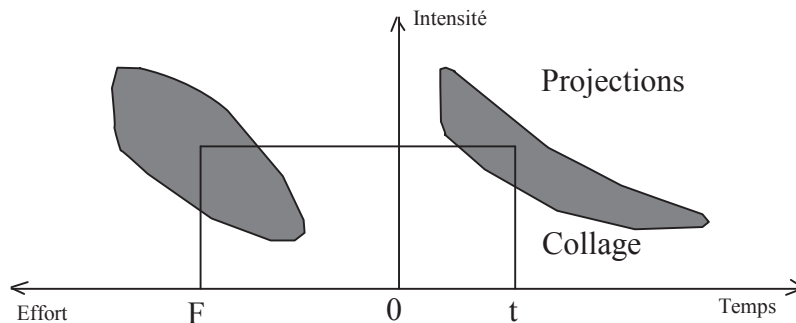
Avantages:

Robotisation facile, rapidité d'exécution

Inconvénients:

Conso élec, assemblages limités, peu polyvalent, pas de soudure continue (étanche).

Méthodologie: diagramme de soudabilité



3 domaines: soudabilité correcte / collage / projections.

Performances:

Facteur de marche: 5 à 10% en cycle automatisé.

Hygiène/sécurité:

Risque de défaut d'isolation entre primaire et secondaire du transfo --> 380 V au secondaire !

Procédés dérivés:

Soudage à la molette 22 --> réalisation de points en continu. Electrodes sont des roues en Cu.

Courant permanent ou séquentiel.

Points imbriqués (soudure continue) ou distincts, + ou – espacés en fonction vitesse rotation molettes et fréquence trains d'impulsions courant.

Puissance beaucoup + importante pour compenser la déviation du courant par les points déjà réalisés.

1 paramètre supplémentaire: vitesse d'avance.

Application: soudures étanches des radiateurs.

Soudage par bossage 23 : déformation locale de la tôle qui assure la fonction de concentration d'effort et de courant.

Bossages de différentes formes: semi-hémisphérique, oblongs, annulaires.

Bossages naturels: géométrie des pièces canalise le courant (fil en croix, vis, bouchon de tube).

Bossages artificiels: fabriqués par emboutissage / matricage.

La forme et dim du bossage dépendent de l'ép et de la nuance, de I, du temps de passage du courant, de la section de contact des électrodes et de l'effort appliqué.

Avantages:

- soudage de plusieurs bossages en 1 cycle -- > productivité améliorée

- localisation précise des points

- pas de déformation

- empreinte que sur 1 tôle

- faible usure d'électrode

- permet de rapporter des éléments mécaniques sur 1 tôle (vis,écrous...).

Inconvénients:

- puissances élevées, bâtis robustes et rigides

- éléments mobiles d'effort doivent accompagner l'effondrement du bossage

- outillages de positionnement

- électrodes avec usinage précis.

Soudage en bout par résistance pure 25: séquence identique --> présentation / contact (effort)/ échauffement / forgeage. Effet Joule.

Pièces à assembler serrées dans machoires qui amènent le courant. Déplacement manuel ou automatique.

Faces soigneusement préparées (usinage) --> contact sur toute la surface.

On opère en phase solide (courant coupé avant que la zone de liaison ne fonde).

Applications: soudage de métaux de même résistivité et de même section (rails de chemin de fer).

Soudage en bout par étincelage 24 : 4 phases: présentation / contact (effort) / étincelage / forgeage

Echauffement de la pièce par micro-arcs électriques.

Contacts locaux établis, ponts qui sont le siège de courants très denses (arcs), fusion instantanée, éjection et vaporisation métal vers l'extérieur --> nouvelles aspérités qui provoquent de nouvelles éjections... Le phéno s'étend à toute la section. Couche de liquide expulsée en fin d'étincelage.

Profondeur de chauffe plus faible que la résistance pure. Phase solide également.

Avantages:

- Aucune préparation des faces (contact imparfait des pièces nécessaire). Rapidité d'exécution. Joint d'excellente qualité.

- Applications: tout matériau soudable, soudage en atelier ou sur chantier de rails de chemin de fer, soudage de tôle et tubes minces, résistivité et sections peuvent être différentes. Formes très variées.

- Déformations limitées. Possibilité d'automatisation.

- Inconvénients: section des pièces admissibles en fonction de la capa machine, grande puissance électrique, perte de matière, bourrelet externe à éliminer.

Soudage par décharge de condensateurs: microsoudage. Chargement d'une batterie de condensateurs à tension déterminée et réglable. Décharge dans le primaire d'un transfo.

Avantages: appel courant réseau faible (pas de surcharge), énergie de soudage répétitive.

Soudage en courant triphasé redressé: forte capacité.
Répartition équilibrée sur les 3 phases du réseau.

Brasage par résistance: machines utilisées comme moyen de chauffage.
Difficulté pour maîtriser les jeux, flux solide (à cause de l'effort de serrage).

PROCEDES DIVERS

Soudage à l'arc des goujons:

1918

4 phases: présentation accostage/ écartement amorçage / Régime d'arc fusion / coupure courant pression (plongée du goujon).

3 techniques:

amorçage arc avec courant auxiliaire / plongée goujon / coupure courant

amorçage arc par courant soudage / coupure courant / plongée goujon

amorçage arc par couronne fusible / plongée goujon / coupure courant

Eléments désoxydants à l'extrémité du goujon (Si-Mn ou Al)

Coupelle céramique au delà de dia 6 pour mouler le métal en fusion (aspect) + retient les gaz et liquide lors de la fusion (protège contre l'oxydation).

Temps de soudage court 2 à 3 /10 ème de s.

Aluminothermie: 71

1894

Réaction chimique entre oxydes métalliques (de fer ou de Cu) et poudre d'alu.

$Fe_2O_3 + 2Al \rightarrow Al_2O_3 + 2Fe + 181500 \text{ calories.}$

Réaction qui se produit vers 1300°C. T° atteint 2450°C. Dure 30 à 120 s.

Amorçage de la réaction chimique par poudre d'allumage (magnésie...).

Charge contenue dans un creuset au dessus du moule (oxyde ferrique pour soudage acier).

Préchauffage du moule.

Raboutage de rails / chemin de roulement.

Avantages: pas d'énergie extérieure, soudage des alliages de Cu.

Inconvénient: utilisation très limitée.

Soudage vertical sous laitier: 72

1953

Aciers forte épaisseur (20mm à 2m) / BW monopasse.

Construction navale / chaudronnerie lourde.

1 ou plusieurs fils d'apport plongent dans un bain de laitier et fondent par effet Joule (laitier résistant électriquement).

Régime d'arc uniquement pour le démarrage.

Patins de cuivre refroidis pour maintenir le bain de fusion et le laitier.

Déplacement vertical au fur et à mesure de l'avance de la soudure.

Bain de laitier fondu hauteur 40 à 60 mm = source de chaleur et protection contre l'oxydation

Appendices en début et fin de cordon.

CC polarité positive ou CA (évite électolyse du laitier).

Avantages: procédé entièrement automatisé, pièces très épaisses, pas de prépa particulière des bords, peu de déformation angulaire, peu de risque de fissuration à froid.

Inconvénients: déformations et risques de fissuration (retassures énormes). Structure obtenue en ZF grossière (TTAS) --> carac méca moyennes. Reprise difficile en cas d'interruption du soudage.

Equipement complexe et coûteux, position verticale uniquement.

Procédé dérivé: soudage vertical sous gaz de protection (73).

Soudage par induction:

Chauffage par courants induits dans la pièce. Courants basse, moyenne ou haute fréquence.

Basse et moyenne fréquence (4000/5000 Hz): chauffage obtenu par effet joule – soudage comme en bout par résistance. Refoulement pour assurer la liaison.

Haute fréquence (250 à 500000 Hz) courants induits localisés en peau (sur qqes 1/10 de mm) , formation film de métal liquide sur les rives à assembler. Effort de serrage assez faible et refoulement réduit.

Soudage par friction: 42

1950 procédé mécanique.

Fabrication mécanique et forgée. Automobile grande série. Aéronautique petite série.

Thermoplastiques, pièces de révolution. Assemblages hétérogènes (où il n'y a pas d'autre solution). Chaleur nécessaire au soudage provoquée par frottement d'une pièce en rotation contre une pièce immobile (phéno de frottement/grippage). Ref rapide (vitesse ref ne change pas beaucoup les caractéristiques métallurgiques de la soudure). Grain 1 peu + fin en ZL.

3 étapes: mise en rotation (accostage – effort faible) / friction (effort augmenté) / forgeage (arrêt rotation + effort supplémentaire).

Ni fusion ni dilution --> permet assemblage de matériaux non compatibles métallurgiquement pour les autres procédés.

Protection: les efforts appliqués protègent les faces à assembler (contact étroit).

Attention à la coaxialité des pièces (tolérances des moyens de préhension).

Paramètres:

-pression de frottement: maintient 1 contact étroit entre les surfaces et évite la contamination atmosphérique.

-Vitesse de rotation: 75 à 150 m/min. Vitesse initiale pour l'inertielle.

-Effort: 150 à 750 bars pour aciers.

-Vitesse d'échauffement: selon exigences métallurgiques, conditionne la vitesse de ref.

Vitesse échauffement rapide --> ZAT limitée, bourrelet faible, conso matière faible.

-Temps de soudage: dép de la vitesse de rotation et de la forme des pièces.

-Pression de forgeage: dép de la capa de déformation à chaud des métaux à souder. Favorise l'interpénétration cristalline des joints de grains --> bonne continuité métallique.

- Masse du volant d'inertie.

Friction pilotée: moteur CA ou CC entraîne la pièce mobile à vitesse constante. 3 niveaux d'effort dont le dernier à vitesse nulle. Echauffement par conduction thermique.

Friction inertielle: volant d'inertie lancé à vitesse déterminée. Désolidarisation dès le début de soudage. Vitesse diminue au fur et à mesure qu'avance l'opération de soudage (elle s'annule en fin de soudage). Production méca de chaleur de proche en proche.

Contrôles: examen visuel bourrelet (angle arrondi au niveau du bourrelet témoigne d'une bonne soudure). Contrôles destructifs (macro/micro...). Non destructifs: ressuage après usinage bourrelet, radio, US, magnéto.

En fabrication --> simple surveillance des param (pression, conso matière, tps, vitesse, couple résistant) ou enregistrements (courbes des efforts...). Contrôle dimensionnel.

Préparation: l'état rugueux favorise le grippage en améliorant le coeff de frottement --> pas de prépa.

Avantages: soudage de pièces de formes et de nature différentes, pas de MA, pas de protection gazeuse, perte métal relativement réduite, tolérances serrées et reproductibles, pas de prépa surf particulière, bonne tenue méca des soudures, échauffement rapide gradué et localisé, excellent rendement énergétique, pas besoin de main d'oeuvre qualifiée, facilement incorporable dans 1 chaîne de production, puissance installée faible, entretien réduit.

Inconvénients: pièces de révolution uniquement, mise en rotation d'une des 2 pièces, difficultés pour métaux à faible coeff de frottement, limité en dia (barre 150 / tube 250 mm).

Dérivés:

Friction orbitale: dérivée de la friction pilotée. Vitesse des 2 pièces différentes. Combinaison du mvt de rotation et de translation.

Soudage par oscillations angulaires: 5 à 20°. Fréq 30 à 50 Hz. Phase d'échauffement longue --> pièces tubulaires de faible section.

Soudage par oscillations linéaires: pièces prismatiques. Déplacements 1 à 4 mm. 20 à 50 Hz.

Soudage par arc tournant: 185

1973

Soudage de tubes, profilés fermés, de faible épaisseur. Tous types d'aciers non alliés/faiblement alliés. Aciers moulés et de décolletage.

Pas de MA.

Action d'une induction magnétique sur un arc électrique --> génère un effort qui fait tourner l'arc (loi de Laplace).

Mise en contact des pièces (faible effort), mise en place de la bobine / Début soudage (arc/alim bobine et débit gaz protection simultanément), écartement des pièces / soudage (rotation de l'arc), fusion pâteuse (localisée) des bords / Mise en contact des pièces (forgeage), arrêt courant, champ magnétique et gaz.

En bout: le + courant. L'arc se déplace entre les pièces sous l'effet d'un champ magnétique.

Forgeage.

A bord relevé: cas particuliers. Faible épaisseur. ZF 0,2 à 0,5 mm. Electrode auxiliaire. Amorçage HF ou au contact.

Machines verticales ou horizontales. Mouvements hydrauliques. Géné CC, tension à vide élevée, forte pente.

Bobine intérieure aux pièces ou extérieures aux pièces.

Paramètres

I 50 à 1000 A / U 30 V environ.

Pression de départ (20 N/mm²).

Gaz de protection CO₂ sauf aciers austénitiques. Débit 20 l/mn.

Ecartement pièces: fonction ép (1,5 à 2,5 mm).

Temps de chauffage: fonction de l'ép.

Effort de forgeage.

Raccourcissement pièces (capteur de déplacement).

Avantages:

Tous types d'aciers au C, pièces de grande longueur, positionnement précis des pièces, faible consommation, pas de MA, bourrelet arrondi (pas d'arêtes vives), pas de prépa sp, tolérances serrées et reproductibles, temps soudage très court, rendement énergétique excellent, pas besoin de main d'oeuvre qualifiée, facilement incorporable dans 1 chaîne de production, entretien réduit, contrôle param en continu.

Inconvénients:

pièces de révolution fermées dia maxi 300 mm, ép 0,8 à 5 mm, tubes « acier noir » uniquement, bourrelet à éliminer, nécessite 1 gaz de protection.

Soudage par ultrasons:

1950

Matériaux métalliques ou plastiques faibles épaisseurs.

Matériel électrique.

Soudage à froid en phase solide. Soudage par friction à l'échelle pelliculaire.

Assemblage par recouvrement. Pièces serrées entre enclume et sonotrode. Vibrations transversales -

-> frictions localisées qui découpent les surfaces et élèvent la T° jusqu'à formation soudure.
Générateur électronique qui fournit En HF pour vibration tête.
Tête de soudage : transducteur (transforme En électrique en En vibratoire), amplificateur et sonotrode.

Nombreuses associations de métaux (ni diffusion, ni fusion, ni surchauffe car temps de soudage très court qqes 1/100 ème s).

Soudage par diffusion: 45

Procédé opérant en phase solide de manière statique.

Pièces maintenues en contact sous effort et portées à T° définie pendant 1 temps contrôlé.

Déformations plastiques locales des surfaces --> contact intime, diffusion des atomes via lacunes du réseau cristallin ou le long des joints de grains. Phéno en phase solide (pas de fusion). Temps relativement long.

Paramètres: T° / tps / effort / coeff de diffusion des matériaux.

Métaux et alliages qui dissolvent leurs propres oxydes, métaux nobles.

Avantages: possibilité de souder des métaux de nature différente ou à des matériaux non métalliques. réalisation de liaisons difficiles. Déformations limitées. Pas de transfo de phase.

Inconvénients: atmosphère contrôlée voire enceinte à vide. Pièces de petites dimensions. Prépa de surf soignée. Très coûteux. Difficile sur matériaux de coeff de dilatation très différents.

Soudage par explosion: 441

1957

Fabrication de matériaux plaqués / Eléments bi-métalliques.

En libérée par une charge d'explosif. Collision dirigée entre les 2 surfaces à assembler.

Déplacement régulier de la ligne de contact pendant l'explosion.

Tir en parallèle ou en dièdre.

L'explosion projette violemment le revêtement sur le support , mince jet de métal plastifié précède le front de contact. Ce jet arrache les oxydes et assure ainsi la propreté parfaite.

Etat de phase solide. Liaison intermétallique par déformation plastique (vagues/ondulations).

Joint de qualité.

Interposition d'un amortisseur en caoutchouc ou en chlorure de polyvinyle entre explosif et placage pour éviter détérioration superficielle de ce dernier.

Avantages: liaisons difficiles --> matériaux très dissemblables métallurgiquement (Alu/Acier, Cu/acier), métaux altérables à chaud (Ti Ta Zr), pièces ne supportant pas le colaminage. Placage plan , cylindrique ou tubulaire.

Inconvénients: coûteux. Mise en oeuvre difficile et dangereuse, soumis à autorisation ministérielle.

Soudage par friction malaxage (stir welding): 42

1992

Raboutage Aluminium (série 2xxx et 7xxx notamment), Al/Cu, Al/acier, Mg/Cu, Cu/acier.

Soudure de très haute qualité avec peu de déformations.

Aéronautique, automobile, ferroviaire, chantiers navals.

Pièces maintenues rigidement dans 1 bâti. Outil rotatif ou fraise + mouvement linéaire.

Chaleur dégagée par le frottement de l'outil --> mise à l'état plastique de la matière, mélange à l'état pâteux (pas de fusion).

Avantages: productivité élevée / automatisation, pas de prépa joint, pas de conso (MA, gaz), assemblages hétérogènes, déformations et contraintes faibles, qualité de joint.

Inconvénients: limitée à BàB linéaire, limitée en matériaux, développement en cours.

Hygiène/sécurité: pas de fumées, pas de projections.

BRASAGE

Brasage = opération consistant à assembler des pièces métalliques à l'aide d'un métal d'apport, à l'état liquide, dont la T° de fusion est inférieure à celle des pièces à réunir et mouillant le MB qui ne participe pas par fusion à la constitution du joint. Opération qui peut être réversible.

Brasage fort: T° fusion $> 450^\circ\text{C}$ --> Applications: base Ag, Cu, Ni.

Brasage tendre: T° fusion $< 450^\circ\text{C}$. Applications: métaux blancs Sn Pb, gouttières, électronique.

Soudobrasage = brasage de proche en proche (technique opératoire analogue à celle du soudage autogène par fusion). Pas d'action capillaire. T° fusion MA $> 450^\circ\text{C}$. Applications: carrosserie auto, cycles.

Brasage par diffusion: assemblage des pièces réalisé par chauffage à 1 certaine T° , MA déposé au préalable ou formé in situ passant à l'état liquide. Le MA diffuse dans MB de façon à ce que les carac du joint soient très voisines de celles du MB. Phéno pas réversible. Aéronautique, nucléaire.

Réussite d'1 brasage: surf propres, jeu suffisant, T° suffisante, protection des surf pendant l'opé, apport suffisant.

Phéno fondamentaux:

Mouillage: étalement d'1 liquide sur 1 surface solide. Caractérisé par l'angle de contact entre liq et surf solide (angle obtus --> pas de mouillage, angle aigu --> mouillage). Phéno régit par forces de tension superficielle .

Pour améliorer la mouillabilité: diminuer les tensions superficielles solide/liquide et liquide/air en décupant les surfaces, en dégraissant, en utilisant 1 flux (pour supprimer la couche d'oxydes).

A l'échelle microscopique le mouillage se scinde en 2 phases: adsorption physique (rapprochement des atomes des 2 parties en présence par forces d'attraction), adsorption chimique (mise en commun des électrons de valence --> liaisons fortes).

Diffusion: diffusion réciproque à l'interface favorisée par l'agitation thermique. Formation d'1 nouvel alliage AB sur qqes angstrom d'ép.

Paramètres: T° , temps, contrainte, coeff de diffusion des matériaux.

Ce phéno de diffusion peut entraîner 1 fragilisation du joint (formation de composés intermétalliques fragiles). Ep \neq qualité du brasage (1 ép trop imp peut être néfaste). Pour limiter la diffusion: diminuer durée brasage, T° brasage et qté MA.

Capillarité: force capillaire --> force permettant au MA de pénétrer dans le joint.

Loi de Jurin (colonne de liq en éql sous l'action des tensions superficielles, hauteur de liq inversement prop au jeu). Paramètres: MB, couple MA/flux, atm, cycle therm, moyen de chauffage, jeu.

Phéno connexes:

Dilatation-jeu: les jeux interviennent sur la capillarité et la rés méca du joint brasé. Jeu à chaud est très imp. Prévoir le métal le + dilatable à l'ext pour mettre le joint brasé en compression. Jeux à chaud recommandés dép de la nuance à braser et du MA.

Tension de vapeur (T° de volatilisation des métaux): éviter certains métaux d'apport (Zn et Cd très volatiles). Pollution si soudage sous vide, diminution de la durée de vie des appareils de pompage. Remède: injection gaz neutre à 1 certaine T° pour augmenter la pression.

Conception des joints: ne jamais faire travailler 1 joint brasé en flexion (uniquement traction/compression). Privilégier les solutions à emboîtement ou à recouvrement.

Prévoir événements pour évacuation des gaz.

Eviter les matériaux dissemblables, ép uniforme / profilés minces.

Etat de surface: rugosité $2 < Ra < 4 \mu\text{m}$ bon mouillage (surf brute d'usinage: augmentation de la surface de contact). Pas de polimiroir.

Etat physico-chimique de la surf: surf propre et non oxydée (décapage + rinçage et séchage), le flux ne peut pas tout éliminer. Films chimiques (oxydes), atomes ou molécules (O_2 H_2 H_2O), pellicule de graisse (dégraissage), corps solides dégazent sous vide et diminuent la mouillabilité.

Choix des métaux d'apport: dép de la finalité de la pièce, du milieu environnant.

Désignation selon normes AF, EN ou ISO.

Brasage tendre: Sn Pb, + Ag (mouillabilité) + Sb (carac méca).

Brasage fort: Al Si + Mg, Cu P, Cu Zn, base Ag, base or, base Ni.

Etats de livraison: fils (fourrés, enrobés), bandes, préformés, pâtes...

Choix selon impératif conception (carac méca, rés corrosion, T° service, prix), selon le moyen de chauffage.

Flux décapant: s'étale avant de réaliser la brasure.

Rôles: nettoyage des surf, protéger MA et pièces de l'oxydation au moment du chauffage et du brasage, éliminer facilement les résidus (oxydation du MA).

Doit pouvoir s'étaler sur les pièces à basse T° .

T° fusion $<$ T° fusion MA.

Réactions chimiques limitées avec MA.

Doit être efficace à la T° de brasage et pendant toute la durée de l'opé.

Stable au transport et stockage.

Pas de flux universel: flux non corrosif, à corrosivité réduite, corrosif, gaz flux. Flux résineux, organique ou inorganique.

Sous forme de poudre, pâte, liquide, enrobé autour des baguettes du MA.

Elimination des flux après brasage par choc thermique (eau froide), lavage, voie méca (brosse).

Désignation selon norme EN ou ISO.

Atmosphères: dans le cas de brasage au four, par induction ou par résistance.

Atmosphère réductrice: H 100%, ammoniac craqué, combustion hydrocarbure.

Atmosphère raréfiée: élimine les gaz au moment du brasage, dissocient les oxydes, pas besoin de flux. Attention au problème d'éls très volatiles.

Atmosphère inertes: He, Ar, N.

Moyens de chauffage: T° 50 à 100°C + élevée que la T° fusion apport.

Fer à braser: différentes formes de panne selon plage d'accueil et la pièce à braser.

Chalumeau oxygaz (oxyacétylénique, oxypropane, gaz de ville).

Avantages: peu onéreux, automatisable, pièces compliquées.

Inconvénients: adjonction d'l flux, nettoyage pièces avant brasage, chauffage localisé (déformations), ne convient pas pour tous les métaux (ex Ti).

Induction: chauffage par effet thermique d'l courant induit (de Foucault) dans 1 pièce (effet Joule).

Avantages: mise en T° rapide, chauffage généralisé au droit du joint, automatisable.

Inconvénients: adjonction d'l flux ou gaz protecteur, réalisation d'l inducteur par type de pièce, difficile si pièces sans révolution.

Fours: enceinte régulée en temps et en T° , sous atm contrôlée.

Avantages: chauffage isotherme des pièces (contraintes et déformations réduites), pas d'oxydation

des pièces. Reproductibilité.

Moyens de chauffage: rés électriques, gaz, fuel...par convection forcée.

Types de fours: continu (à passage), discontinu, sous vide, à atm contrôlée.

Atmosphère réductrice: chauffage par combustion de gaz.

Avantages: production en série, peu onéreux.

Inconvénients: difficulté d'avoir des points de rosée très bas, pas possible pour matériaux adsorbant H (ex Ti), marche en continu.

Atmosphère raréfiée (chauffage par résistor)

Avantages: automatisable, pas d'oxydation, possibilité de coupler avec 1 TT.

Inconvénients: installation onéreuse, entretien périodique, choix des MA, dim pièces limitées aux dimensions enceinte, prépa pièces, volatilisation des élts à faible tension de vapeur.

Brasage au trempé: pièces immergées dans 1 bain d'apport fondu (enduites de flux au préalable si nécessaire). Réservé aux pièces de petites dimensions.

Brasage à la vague: brasage d'1 grand nombre de joints rapidement. Grande reproductibilité. Application aux cartes électroniques. "Fontaine" d'alliage d'apport. Fluxage et préchauffage intégrés dans le cycle.

Brasage en phase vapeur: pièce à braser plongée dans 1 liquide fluocarbone chauffé à son point d'ébullition (vapeur saturée). La T° est contrôlée avec précision par le point d'ébullition de ce liquide.

Brasage laser: point par point. Chaleur concentrée.

Brasage par résistance: principe de la soudure par résistance (effet Joule).

Chauffage direct (rés élec globale suffisante et effet Joule suffit à atteindre la T° fusion apport).

Chauffage indirect: pièces de faible résistivité élec. Electrodes terminées par pastille en matériau à haute résistivité pour créer 1 point chaud --> chaleur transmise par contact aux pièces à braser.

Paramètres: effort (accostage/forgeage), chauffage (durée, mode, intensité), nature des électrodes.

Avantages: chauffage rapide, pièces de série, automatisable, pas de nettoyage après.

Inconvénients: peu de MA utilisables, applications limitées.

Bain de sels: pièces munies du MA préformé immergées dans 1 bain de sels fondus. Ce bain fournit la chaleur et assure la protection. Enceinte chauffée extérieur à travers les parois ou par rés élect à l'int du bain.

MIG/MAG: carrosserie auto.

Contrôles:

d'aspect: par trempage.

Mesure du temps de mouillage, d'étalement, de l'angle de mouillage.

Brasabilité mesurée au moyen d'1 éprouvette à jeu variable. On évalue la capillarité (et donc l'aptitude au brasage).

Qualité de la brasure évaluée par essai destructif d'arrachement --> examen du faciès de rupture par microscope électronique.

Hygiène et sécurité:

Risques dus aux htes T° et aux sources de chaleur: brûlures (flamme, rayonnement, objet chaud), risques d'explosion, d'incendie, contrôle de l'état de pollution de l'atm (fumées toxiques).

Protections du corps (vêtements --> éviter tissus inflammables), des mains (gants isolants et souples), yeux et visage (lunettes, masque).

Anti-retour et pare-flammes sur canalisation gaz au plus près du chalumeau. Etat des tuyaux.

Systèmes de ventilation.

Fumées toxiques: oxydes de cadmium (troubles pulmonaires, rénaux), oxydes de Zn (fièvre), fumées issues de la fusion des flux (fluorures --> irritation aiguë des muqueuses et voies respiratoires).

Risques liés au dégraissage des pièces: effets narcotiques ou empoisonnement chronique lié à l'utilisation de solvants (dérivés chlorés organiques, trichlo pe). Protection des yeux vis à vis des solutions alcalines.

Risques liés à la manutention des produits chimiques et des flux (gants, lunettes).

COUPAGE THERMIQUE

Opération consistant à sectionner par fusion le métal (source de chaleur en mouvement).

Oxycoupage:

Oxycoupage moderne mis au point en 1947.

technique la + répandue mais en perte de part de marché.

Combustion du fer par 1 jet d'oxygène.

Réaction de combustion et d'oxydation du fer contenu dans l'acier. Apport d'O₂ sous pression pour séparer le métal et évacuer les scories.

Réaction chimique entre O₂ et le métal chauffé au rouge vif (1800°C). Oxydation contrôlée et ultra rapide de l'acier. $2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO} + \text{calories}$ (réaction exothermique). Fe₂O₃ / Fe₃O₄

Chaleur apportée par la flamme de préchauffage mais surtout par le jet d'O₂ qui brûle 1 qté de fer importante.

3 conditions pour que l'oxycoupage se fasse:

- la T° d'amorçage de la réaction thermochimique doit être inférieure à la T° fusion de l'acier.

- La T° de fusion de l'oxyde du métal doit être inférieure à la T° de fusion du métal (1370°C pour oxydes de fer).

- La réaction doit être exothermique (pour entretenir le phéno) --> quantité de chaleur dégagée par la combustion du métal dans l'oxyde doit être suffisante pour maintenir l'acier dans la saignée à la T° d'amorçage de la réaction thermochimique.

Oxygène = comburant.

Gaz de chauffe = combustible.

Eléments à prendre en compte:

compo chimique du métal à couper (teneur en C).

Homogénéité du métal (qualité d'élaboration / risque de défauts de coupe).

T° initiale pièce (risque de fissuration à froid comme en soudage).

Epaisseur.

Gamme d'épaisseur : de 3 à 1500 mm. Inévitable pour aciers au C au dessus de 50 mm.
Ep augmente --> vitesse coupe diminue, dia buse augmente, débit gaz chauffe augmente.

Peuvent être oxycoupés:

Aciers doux, fer, aciers non et faiblement alliés (< 5% Cr), acier austénitique au Mn.

Aciers à hte teneur en C (> 0,3%) moyennant 1 préchauffage (sinon fissuration).

Titane moyennant réusinage.

Ne peuvent être oxycoupés:

fontes et aciers fortement alliés (inox) --> T° fusion oxydes > T° fusion métal.

Al Cu --> oxydes réfractaires et conductibilité thermique importante.

Ni et ses alliages.

Précision: de l'ordre du mm.

Vitesse de découpe: dépend de l'apport calorifique de la flamme et de la vitesse d'écoulement des scories (liée à la forme du jet de coupe et donc à la forme de la buse ainsi qu'à la pression d'O₂).

La pureté du gaz influe également (O₂ à 99,5%).

Vitesse optimale par épaisseur.

Qualité de coupe: normalisée. Param pris en compte: rugosité, fusion de l'arête supérieure, bavures sur arête inférieure, dépouille (planéité de la coupe), retard à l'avance, scories, arrachement, déviation du jet.

Fusion de l'arête supérieure si trop lent. Stries de + en + marquées sur la tranche si trop vite.

Défauts internes (dédoublures, soufflures) liés au matériau lui même.

Défauts externes liés aux oxydes.

ZAT et zone affectée mécaniquement (écrouissage) --> zone refusionnée au soudage si elle n'est pas trop étendue.

Déformation de la pièce: retrait longitudinal --> contraintes importantes dans la pièce si elle est massive.

Gaz de préchauffage: amorce la réaction et entretient le phéno. La buse est liée au type de gaz.

Gaz caractérisé par sa T° de flamme maxi (3170°C pour acétylène).

Critères de choix: T° de flamme, puissance spécifique, facilité de réglage, approvisionnement.

Acétylène: flamme fortement focalisée, idéale. 93% de la chaleur dans le dard. ZAT réduite. Temps de préchauffage fortement réduits. Gaz le + efficace en productivité.

Applications: tôles fines, élaboration de chanfrein (contrôle de la dépouille).

Pb: conditionnement, impossible de l'approvisionner en vrac.

Crylène: effet thermique comparable à l'acétylène, conditions d'exploitation proche du propane. Bon compromis.

Propane: faible coût, facilité d'emploi. Partie de la chaleur répartie dans le panache --> temps de préchauffage rallongés. Meilleur contrôle de l'arête supérieure. ZAT réduite. Vitesse de coupe comparable à l'acétylène sur ép 50 à 250 mm.

Gaz de synthèse MAPP: mélanges de différents hydrocarbures. Chaleur répartie entre dard et panache. USA.

Gaz naturel: proche du propane mais performance moindre. Faible coût. Faible chaleur spécifique -> longue durée d'amorçage.

Hygiène/sécu: oxycoupage pollue peu excepté CO2 produit par flammes de chauffe. CO2 peut provoquer 1 diminution de la teneur en O2 dans l'air.

Projections.

Lunettes teintées pour risque d'éblouissement provenant de la flamme de chauffe.

Procédés dérivés:

Décrochage (scarfing): en aciérie nettoyage des brames (calamines et défauts de surface) avant laminage.

Gouage: abandonné au profit de l'Arcair.

Forage thermique: trous d'amorce sur pièces de très forte épaisseur.

Oxycoupage sous-marin: avec MAPP, peut être utilisé à des pressions relativement fortes.

Lance O2: pas de flamme. Découpe de tout (béton --> démolition).

Coupage à la poudre de fer: employé sur base Fe qui ne peuvent s'oxycouper (fonte p.e.). Le Fe rajouté active la combustion.

Découpage plasma:

Plasma mis au point en 1954 sur alu et inox (années 80 pour métaux ferreux). Procédé par fusion/éjection. Réservé aux matériaux conducteurs d'électricité.

Plasma = 4ème état de la matière qui concentre le + d'én.

3 conditions: 1 arc pour fournir 1 chaleur minimale requise, 1 fluide pour alimenter le plasma (Ar He ou N2) et 1 pression mini dans 1 espace très confiné.

Ionisation du gaz --> création de l'arc plasma. Energie concentrée dans des tuyères au profil étudié

et transférée vers la pièce à découper. Grande qté d'én concentrée dans le dard (T° environ 10000°C). Gaz éjecté à 3 * vitesse du son. Ejection des scories par la force du jet.

Il n'y a pas oxydation car T° très élevée.

Perçage quasi-instantané jusqu'à 70 mm d'ép.

En-dessous de la gamme 20/40 mm d'épaisseur + rapide que l'oxycoupage. 20/40 --> vitesses du même ordre. Au-delà oxycoupage + rapide.

Complémentaire de l'oxycoupage, mieux adapté pour faibles épaisseurs. Vitesse de coupe décroît très vite lorsque ép augmente.

Déformations moindres qu'en oxycoupage. Très faibles pour ép < 2 mm.

Précision: de l'ordre du mm.

Hygiène/sécu: précautions à prendre.

Fumées métalliques et oxydes d'azote (Nox) --> table à plan d'eau , pièce et torche en immersion de qqes cm. Ventilation.

Pollution phonique du fait des vitesses largement supersoniques --> table à eau.

Protection optique nécessaire (lunettes filtrantes) si pas de table à eau.

Plasma Ar/H2: technique la + ancienne. Rendement énergétique efficace.

Découpage manuel, alu et inox, non ferreux. Facile à mettre en oeuvre mais lent. Coût modeste.

Forte ép 25/30 mm jusqu'à 150 mm.

Plasma air comprimé (vortex Air): « ZIP ». Facile à mettre en oeuvre (prise élec + air comprimé).

Tôles fines jusqu' à 5 mm. Tous types de métaux.

Plasma N2 avec injection d'eau: vitesse de coupe augmentée de façon considérable. Universalité dans le découpage des aciers. Concurrence la découpe oxyacétylénique. Coût de production très intéressant.

Ep 3 à 70 mm- tous types de matériaux.

Plasma O2 avec injection d'eau: vitesse de coupe +30%. Faces de coupe lisse et sans bavures.

Coût d'exploitation élevé. Pb durée de vie des torches .

6 à 35 mm, aciers au carbone.

Plasma hte définition: faisceau plasma considérablement focalisé. O2 comme gaz plasma. Qualité des coupes quasiment identique à celle des lasers.

Ep 1 à 10 mm.

Sérieux concurrent du laser dans les ép moyennes et pour les alliages et aciers inox.

Procédés dérivés:

Plasmamelt: fab acier hte qualité.

Plasmared: réduction du minerai de fer.

Torche à plasma: destruction de déchets polluants.

Découpage laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Technique plus récente. En progression du fait de la qualité de découpe et de la précision.

Procédé par vaporisation quasi instantanée. Flexibilité (CO2).

Mais coût d'investissement et complexité d'utilisation.

Comprend: 1 milieu émetteur / 1 dispositif d'excitation ou de pompage / Amplificateur ou résonateur.

Emission continue ou pulsée (voire super pulsée).
Étroitesse de la ZF fait que les déformations sont négligeables.
Ep 0,5/0,6 mm à 20 mm.
Métaux très réfléchissants -> découpage difficile voire impossible (Al Cu).
Précision: le dixième de mm.

Hygiène / sécu: pas polluant. Fumées éventuelles produites par le matériau travaillé.

Gaz d'assistance: soufflage auxiliaire pour éjecter les scories. Inerte ou non réactif.

Laser CO2 quasi exclusif en découpe. Puissance en découpe: 500 à 3000W.

Technique pulsée et super pulsée en découpe.

He (calme et refroidit), N2 (excite) et CO2 émet.

Gaz de grande pureté.

Avantages: polyvalent, pratiquement tous métaux, grande vitesse en fine ép, contrôle de la source laser.

Inconvénients: transport par miroirs uniquement.

Laser YAG (surtout soudage): en découpe 100 à 3000 W. Emission continue ou pulsée.

Avantages: longueur d'onde bien absorbée par métaux, transport par fibres optiques, applications de précision (microdécoupage ou microperçage).

Inconvénients: vitesse et qualité de coupe < CO2, faible polyvalence.

Découpe jet d'eau: technique plus récente. En progression du fait de la qualité de découpe et de la précision.

Facilité d'emploi.

Compression à 15% de l'eau. Jet d'eau à 3000 bars. Vitesse de l'eau 2 à 3 * vitesse du son.

Coupe réalisée « froide » pas d'altération thermique de la matière.

Dia du jet 0,08 à 0,5 mm. Eau filtrée à 1 µm.

Seul param: vitesse de découpe qui dépend du matériau. Poudre abrasive rajoutée pour matériaux durs (2 param supplémentaires: type et tailles des abrasifs).

Problème de polyvalence. Essais nécessaires. Vitesses d'avance faibles pour les matériaux durs.

Réservé aux découpages impossibles par les autres techniques.

Hygiène/sécu: dégage 1 brouillard d'eau important --> absorption En cinétique du jet par billes inox disposées sous les pièces.

Arc Air: remplace le gougeage au chalumeau.

Electrode en graphite cuivrée. Le Cu améliore les carac méca de l'électrode.

- à l'électrode pour ne pas favoriser sa fusion. Inclinaison 45/80°.

Air comprimé 6 bars pour chasser les particules.

La ZAT est très fine si l'opération est bien conduite.

Pas d'augmentation de teneur en C si opération bien menée (sinon obligation de meulage).

Léger coup de meule après pour blanchir.

Fonctionne avec l'inox.

Hygiène/sécu: procédé très bruyant.

PROJECTION A CHAUD - REVETEMENT DEPOSE PAR SOUDAGE

Rechargement = dépôt localisé. Revêtement = concerne des grandes zones.

Modes d'usure:

-par contact métal-métal:

frottement par glissement (adhésions locales, grippages) --> éléments de rechargement de haute résistance à la compression.

Frottement par roulement (contraintes + élevées qu'en glissement, déformations plastiques) --> éléments de rechargement à Re élevée.

Chocs (déformation plastique répétée) --> éléments durs, à bonne ténacité.

-usure abrasive: érosion.

Gouage: mouvement relatif des 2 surfaces, usinage de la plus tendre (rayures profondes).

Broyage sous forte contrainte: coupe de la surface par particules abrasives --> éléments de rechargement de haute dureté.

Abrasion sous faible contrainte: faibles vitesses, faibles pressions (rayures de surface) --> élément de rechargement de dureté adaptée à l'abrasif.

Erosion: particules abrasives pulvérulentes (de faible masse). Paramètre important: angle d'incidence.

-usure due au milieu:

Fatigue thermique: fluctuations rapides de T° --> fissuration.

Corrosion: corrosion sèche la plupart du temps. Rechargement peu utilisé dans ce cadre seul.

Rechargement par projection à chaud:

Le métal rapporté est fondu par 1 source de chaleur, projeté sur la pièce par 1 gaz sous pression. Accrochage mécanique par l'intermédiaire d'une rugosité et d'1 état de surface (pas de fusion du substrat). Il y a incrustation du produit projeté.

Préparation de la surface nécessaire par grenailage ou usinage mécanique.

Procédé à flamme: acétylène ou gaz organique + O₂. Poudre ou fil dévidoir projeté par air comprimé.

Tous types de substrat (même non métalliques). Produits d'apport: aciers, métaux réfractaires, bases Ni, bases Co, céramiques.

Procédé à arc électrique: 2 fils d'apport reliés à chacune des bornes du géné CC. Arc établi entre les 2. Goutelettes projetées par air comprimé.

Tous types de substrat (même non conducteurs). Produits d'apport par fil nécessairement conducteur (fil plein ou fil fourré).

Procédé par arc plasma soufflé: colonne de plasma établie entre cathode réfractaire et buse et entretenue par 1 arc. Très haute densité d'énergie. Poudre projetée à vitesse supersonique / procédé automatique / très bruyant.

Produits d'apport: matériaux réfractaires.

Substrats: aciers, inox, métaux légers, plastiques.

Rechargement par soudage:

Procédes de soudage classiques. Accrochage par fusion partielle du substrat, reconstruction d'1 réseau cristallin commun aux 2 produits. Il y a continuité métallique.

Nécessite la compatibilité métallurgique des 2 matériaux et la maîtrise du taux de dilution.

Pas de préparation particulière de la surface.

Rechargement par chalumeau oxyacétylénique: procédé manuel, taux de dépôt faible. Faible énergie spécifique. Mais faible coût.

Substrats: pas de pièce massive. Aciers, inox, fontes grises.

Apports: aciers, fontes, alliages base Co, Co/W.

Rechargement par TIG: faible dilution. Surfaces propres. Nécessite 1 source électrique.

Domaine d'application voisin du chalumeau mais énergie spécifique + importante.

Rechargement par électrode enrobée: dilution + importante que les 2 précédents.

Applicable à de nombreuses pièces.

Substrats: tous les aciers, fontes grises, alliages base Co, Ni, Cu.

Apports très divers: aciers, fontes, base Co, base Ni, base Cu.

Rechargement par arc plasma transféré: colonne de plasma Ar. Protection par enveloppe réductrice de gaz Ar (+H₂ éventuellement). Alliage d'apport micro pulvérisé, atomisé et fondu dans l'arc plasma. Alliage liquide homogène.

Substrats: aciers et inox

Apports: alliages base Co, Ni, inox.

Rechargement avec fil fusible sous protection gazeuse: taux de dépôt important. Apport tréfilable et conducteur de l'électricité (fils fourrés ou plein). Courant lisse ou pulsé. Gaz de protection inerte (MIG --> inox, alliages légers, base Cu, Ni ou Co) ou actif (MAG --> aciers, fontes au Cr).

Rechargement au laser: le laser fond le substrat. L'apport est amené dans le bain de fusion sous forme de poudre. Surface très localisée, ZAT réduite. Coûteux. Vitesse élevée.

Substrats: aciers alliés ou bases Ni.

Apports: très réfractaires, bas Co, alliages Ni Cr B Si.

Rechargement par friction linéaire: barre de produit consommable en rotation, mise en contact avec le substrat (pression axiale). Formation d'une couche plastifiée au niveau du consommable, le substrat est alors mis en mouvement. Dépôt d'une couche uniforme.

Rechargement avec fils fusibles sous flux solide: pièces de masse, surface ou épaisseur importante. Taux de dépôt très importants (bi-fils, bi-fils oscillant, feuillard). Intensité élevée (1500 A) courant alternatif.

Substrats: aciers.

Apports: aciers, inox, fontes, bases Co.

Méthodes de rechargement:

Passes étroites: plusieurs couches si ép > qqes mm. Cordons jointifs, passes croisées (couche suivante perpendiculaire à la précédente). Très forte déformation transversale.

Passes larges: même technique passes étroites. Largeur passe 3 à 4 fois dia électrode maxi.

Multiplication des fils ou oscillation tête. Très forte déformation longi.

Passes étroites et larges alternées: passes étroites espacées puis passes larges dans les intervalles. Rapide mais répartit davantage la chaleur.

Par utilisation de moules: moule en cuivre ou graphite destiné à localiser le dépôt et à limiter le volume de métal à rapporter.

Rechargement de pièces circulaires: par les méthodes précédentes en passes soit parallèle à l'axe soit circulaires.

Rechargement d'arêtes: ne pas recharger sur angles ou arêtes vives (augmente la dilution).

Cordons d'usure: par les techniques précédentes. Vérifier compatibilité métallurgique des 2 matériaux --> énergie de soudage / procédé adapté.

Produits d'apport:

Formes: poudres de diverses formes, fils nus (produits tréfilables), électrodes enrobées (âme en tube acier doux rempli de poudre frittée si matériau non tréfilable), fils fourrés (pincés/agrafés ou tubulaires).

Natures:

aciers perlitiques, austénitiques (bas C, au Mn), martensitiques (haut ou bas C), à outils, inox martensitiques.

Fontes blanches alliées au Cr (dureté due à la présence de carbures de Cr).

Alliages de Co: faible coeff de frottement + tenue à chaud. Alliages Co Cr Mo ou Co Cr W.

Alliages de Ni: alliages Ni Fe Cr tenaces et tenue au fluage.

Alliages de Cu: résistance à l'usure métal-métal. Bronzes au Phosphore, Cuproalu...

Compatibilité apport / support:

La dilution diminue les propriétés du revêtement. Elle augmente avec l'intensité de soudage. Soit on met 1 sous-couche, soit on met 1 minimum de passes.

Elle est fonction du procédé (mini en laser, chalumeau, MIGMAG pulsé, maxi en SAFF et EE).

Risque de fissuration lié à :

Compatibilité métallurgique: formation à chaud de composés intermétalliques fragiles (phase sigma, carbures de Cr).

Compatibilité mécanique: substrat avec Re relativement élevée par rapport à celle de l'apport pour jouer le rôle de "matelas élastique". Si Re trop faible --> déformation de la pièce --> traction sur le dépôt fragile.

Compatibilité thermique: si coeff de dilatation très différents et pièce travaillant à hte T° --> contraintes.

Risque de fragilisation:

du dépôt par présence de structures de trempe, d'oxydes, de porosités ou de fissures (à froid).
de la ZAT: zone martensitique sous cordon pouvant conduire à fissuration. Dangereux si pièce soumise à des chocs, à fatigue ou contraintes élevées.

Pour s'en prévenir: on modifie le cycle thermique par 1 préchauffage, post-chauffage ou on dépose une sous-couche en métal ductile (alliage Ni, inox, austéno-ferritique) --> dilution du MB est évitée et la ZAT ne concerne que la sous-couche. Beurrage si la sous-couche participe à la résistance de la soudure.

Autres procédés de rechargement:

Rechargement par soudobrasage: il n'y a pas fusion du substrat. Il faut 1 affinité métallurgique des 2 matériaux.

Rechargement par dépôt et refusion: en 2 étapes. 1 phase de projection (à la flamme), 1 phase de refusion. Pas de surchauffe du MA et du MB. Taux de dilution nul. Chalumeau, four à induction ou four sous vide.

Colaminage: adhésion par diffusion à chaud d'une tôle mince sur la tôle laminée. Pression + haute T°.

Par explosion: collision dirigée. Ligne de contact se déplace régulièrement. Mince jet de métal plastifié. Réservé aux liaisons difficiles car coûteux.

ROBOTISATION

1. Définition

Mécanisme généralement composé d'éléments en série, articulés ou coulissant l'un par rapport à l'autre, dont le but est la saisie et le déplacement d'objet suivant plusieurs degrés de liberté. Il est multifonctionnel et peut être commandé directement par un opérateur humain ou par tout système logique.

2. Principe

L'automatisation des opérations de soudage présente beaucoup d'avantages :

- meilleure productivité (taux de dépôt / facteur de marche / tps de mise en production)

Possibilité d'employer des paramètres de soudage plus élevés par l'utilisation de fils fourrés

- meilleure qualité:

 - aspect des cordons amélioré --> régularité (non aléatoire)

 - esthétique

 - baisse taux de rebus

 - diminution des reprises dans le cas de cordons de grandes longueurs + on peut anticiper les déformations.

 - Tolérances

- Conditions de travail: hygiène et sécurité / formation

- Flexibilité: changement de production + ou – aisé. Machine < homme.

En définitive gain financier.

Mais: soigner les préparations --> pas d'adaptation de l'automate si écart de tolérance.

Paramètres à considérer:

choix des pièces et des soudures à automatiser: soudures simples --> gain maximal. Laisser les soudures complexes à l'« intelligence humaine ». Travailler en positions faciles pour avoir haut taux de dépôt. Ne pas chercher systématiquement 1 automatisation totale.

- choix d'1 technologie adaptée au produit

- choix d'1 technologie adaptée à l'entreprise (culture robotique).

- coûts

Il faut se définir un cahier des charges :

- La définition du besoin
- La définition des objectifs
- La recherche et la validation des solutions
- La rentabilité
- L'aspect social
- La formation
- ...

Cette robotisation n'est utile que sur des moyennes ou grandes séries selon la flexibilité de l'installation.

Responsable unique.

3. Procédés automatisables:

Soudage par résistance -> facile, pas de pb de trajectoire.

Soudage à l'arc:

- Sous flux --> haut taux de dépôt

- MIG/MAG --> le + utilisé

- TIG / plasma --> attention : précision / immunitéHF / orientation du fil

Laser YAG /CO2

Coupage oxyacétylénique / plasma / laser

4. Installation

3 types d'automatismes selon volume des pièces et nb de pièces:

Mécanisation simple

Robots

Machines spéciales

Elle va du chariot motorisé (1 axe) au robot multi-axes.

3.1 Mécanisation simple

1 seul mouvement (translation et/ou rotation torche-pièce).

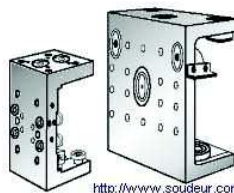
Approche joint par joint.

Présence d'1 opérateur soudeur (surveillance / réglages / ajustement trajectoires).

Soudures linéaires ou circulaires.

Le chariot motorisé

L'utilisation d'un chariot motorisé ou chariot automoteur permet d'automatiser beaucoup de procédés de soudage comme le TIG/GTAW, le MIG/MAG/GMAW, le PLASMA/PAW et l'ARC SOUS FLUX SOLIDE/SAW. La tête de soudage est positionnée et fixée sur le chariot qui assure son déplacement le long du joint à réaliser sur la tôle, sur un rail ou le long d'une poutre rigide et fixe. On rencontre des chariots dits " légers " qui permettent de supporter des torches TIG ou MIG / MAG, le dévidoir de fil d'apport reste alors sur un poste fixe ou sur un accessoire annexe. Les chariots les plus lourds supportent jusqu'à 100 kilogrammes de charge et peuvent embarquer la tête de soudage, la bobine de fil d'apport et pour le procédé A.S.F., la trémie à flux en poudre, voir même le dispositif d'aspiration du surplus de flux



<http://www.soudeur.com>

Le chariot motorisé ou automoteur est caractérisé par :

- Son système de réglage
- Son système de guidage
- Sa ou ses positions d'utilisation
- Son poids
- Son encombrement
- Son type de motorisation
- Sa facilité d'adaptabilité
- Son entretien
- Son système de fixation paroi verticale



<http://www.soudeur.com>

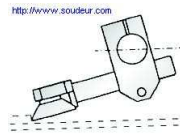
La motorisation du chariot est caractérisée par :

- Son alimentation électrique
- Sa puissance absorbée
- Sa gamme de vitesse d'avance
- Sa précision de vitesse
- Son poids



Le guidage de la tête de soudage sur le chariot est réalisé par une roulette de palpement caractérisée par :

- Son mode de contact
- Sa forme

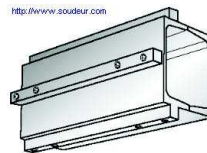


Un rail caractérisé par :

- Sa longueur
- Sa forme
- Son mode de fixation (vis, ventouses, aimants, ressorts)

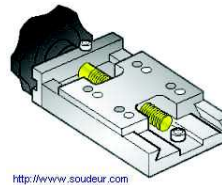
Une poutre caractérisée par :

- Sa longueur
- Sa section
- Sa forme
- Sa rigidité
- Son mode de fixation (pieds, support, etc.)



Le guidage de la tête de soudage sur le chariot est réalisé par une glissière de réglage caractérisée par :

- Son mode de déplacement
- Sa précision
- Sa forme



Les positionneurs

Les **positionneurs** qui permettent d'effectuer des soudures circulaires. La table sur laquelle se fixe la pièce à souder peut être inclinée et mise en rotation à la vitesse de soudage. Les positionneurs permettent d'obtenir une disposition de soudage favorable et un volume de travail optimal. Ils doivent être capables de supporter les pièces à souder et les montages de soudage. Ils doivent être rigides et précis. Ils se composent d'un bâti fixe supportant une table inclinable et tournante. La combinaison de mouvement permet de donner aux pièces à souder une orientation quelconque. Ce dispositif permet de choisir la position de soudage la plus favorable (en gouttière ou à plat par exemple).



Un positionneur est caractérisé par :

- Son couple de rotation et de basculement
- Sa morphologie : table tournante, deux axes, etc.
- Sa capacité de levage

Sa précision de réglage

Les **vireurs** qui ont pour principale fonction de mettre en rotation des pièces de forme cylindrique. Un ensemble vireur se compose d'au moins deux traverses équipées chacune de deux galets. L'écartement des galets se fait manuellement, soit par pas fixes soit par vis à pas contraires.

Ils permettent de mettre en rotation des pièces cylindriques de diamètres et de longueurs variées

Ils sont composés d'une traverse motorisée dont les galets d'entraînement permettent de mettre en rotation les pièces à souder.

Une ou plusieurs traverses équipées de galets fous complètent l'installation.

Les **tables tournantes** (exemple : poupée Top de la SAF) ont pour fonction de mettre en rotation des pièces de forme cylindrique.

Les tables tournantes sont constituées généralement d'un plateau circulaire

Elles permettent de mettre en rotation les pièces à souder.

L'axe des pièces à souder peut être dans la position horizontale ou verticale.



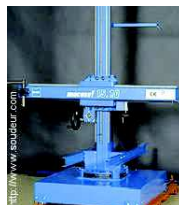
Le banc de soudage

Le **banc de soudage** permet de réaliser à plat les rabouages de tôles ou le soudage en longitudinal (intérieur ou extérieur) suivant une génératrice de virole. La tête de soudage montée soit sur un chariot, soit sur un bâti fixe et rigide permet le raboutage d'éléments fixes. Certains bâtis comportent un chemin de roulement et permettent de souder des pièces immobiles comme la photo ci-contre.



La potence de soudage

La **potence de soudage** permet de positionner et de déplacer la tête dans différentes directions et différents niveaux. La potence peut être fixée au sol ou être mobile sur des rails. Elle permet de placer la tête au-dessus de la pièce à souder qui se déplace, ou bien de mouvoir la tête au-dessus de la pièce à souder qui reste fixe. La potence est souvent utilisée conjointement avec un positionneur ou avec des vireurs.



3.2 Machines spéciales:

Système mécanique dédié à 1 besoin spécifique.

Machine fabriquée pour le produit ou pour le type de soudure (ex raboutage de tubes).

Programmable: adaptation des param de soudage en fonction de la position de la soudure.

3.3 Le robot de soudage

Possibilité de travail en 3D.

Enchaînement des joints sur 1 même pièce avec temps mort minimal.

Reprogrammable pour traiter de nouvelles pièces.

Série minimale pour amortir les temps de prog et de montage.

Gain en cadence et flexibilité.

Le **robot de soudage** permet de positionner et de déplacer la tête dans plusieurs axes de rotation, différentes directions et différents niveaux. Les robots de soudage sont généralement constitués de trois parties : le corps, le bras et le poignet. Le robot de soudage est fixé au sol ou bien est mobile sur des poutres. Le robot permet de placer la tête au-dessus de la pièce à souder qui se déplace, ou bien de mouvoir la tête au-dessus de la pièce à souder qui reste fixe. Le robot de soudage est souvent utilisé conjointement avec un positionneur.



Un robot de soudage est caractérisé par :

- Le mode de commande.
- Les caractéristiques de fonctionnement (charge utile, précision, courses, nombre d'axes)
- --> classique 6 axes: rotation tronc / épaule / coude / roulis avant-bras / tanguage / rotation poignet.
- La conception mécanique (architecture et technologie d'actionnement)
- Sa capacité de levage
- Sa facilité et précision de réglage
- Ses axes intégrés: axes supplémentaires conjugués avec les 6 axes du robot.

Caractéristique robots :	Contrainte
-poids embarqué	Taille pièce
-volume de travail	Morphologie pièce
-morphologie nombre d'axes	Dimension
	Accessibilité int/ext
	Joint multipasses
-précision	tolérance
-vitesse accélération...	Cadence
- contrôle commande	

Le robot de soudage dit "cartésien" :

Ce robot offre trois axes de mouvement (deux horizontaux et un vertical).

Le robot de soudage dit "cylindrique" :

Les axes du bras de ce robot se déplacent suivant un système de coordonnées cylindriques, deux translations (verticale et / ou horizontale) et une rotation.

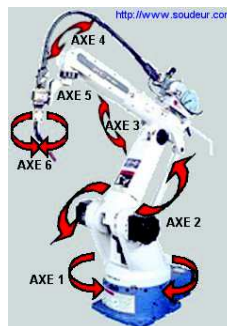
Le robot de soudage dit "polaire" :

Les axes du bras de ce robot se déplacent suivant un système de coordonnées polaires, deux rotations et une translation.

Le robot de soudage dit "rotoïde" :

La structure mécanique du bras de ces robots comprend trois articulations (trois rotations ; coordonnées rotoïdes). Le degré de liberté est déterminé par le nombre d'axes qui caractérise l'aptitude du robot à effectuer une opération sachant que pour définir la position et l'orientation de la torche de soudage, six coordonnées indépendantes sont souvent nécessaires.

Toutefois, le nombre d'axes peut varier en fonction des associations qui peuvent être faites (addition de vireur, association d'un robot rotoïde avec un système de coordonnées cartésiennes, etc.).



Différents types de programmation :

- par apprentissage: tps d'arrêt de prod élevé. Déplacement robot aux points voulus, entrée des paramètres , validation des points. Simple et intuitif.

-Programmation Hors Ligne: tps d'arrêt réduit. Travail d'équipe (informaticien/soudeur). CAO (conception) --> PHL (création prog de soudage, en temps masqué) --> Cellule de production (mise au point finale).

Différents systèmes industriels:

- Recalage préalable / palpage.

- Suivi du joint: mécanique (rustique / SAFF), à travers l'arc (MIG MAG TIG), vision (universel, performant. Caméra laser).

- Soudage auto-adaptatif: vision. Intelligence artificielle. Position optimum de la torche en fonction des tolérances de la prépa + adaptation des param de soudage.