

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: La lutte contre les effets de retrait

Autor: Bierett, G.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-2933>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

III b 3

La lutte contre les effets de retrait.

Zur Beherrschung der Schrumpfwirkungen.

Controlling the Effects of Shrinkage.

Dr. Ing. G. Bierett,

Professor am Staatl. Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem.

Lors de l'exécution des ouvrages rivés on ne travaillait à chaud, à l'intérieur des ateliers de construction, que le matériau de rivetage; l'application de la soudure amenait par contre l'emploi d'un processus de fonte dans les ateliers travaillant le fer. Outre les difficultés qui accompagnent chaque procédé métallurgique, les conditions sont spécialement difficiles car un matériau liquide, à une très haute température doit être coulé en petite quantité dans un matériau froid de masse beaucoup plus grande.

Exigences du matériau.

Cette fonte locale représente des rapports de température fortement inégaux et aussi des rapports inégaux d'allongement et de refroidissement. Cette irrégularité de température est cause des formations, désignées dans la technique de la soudure par effets de retrait:

Les vitesses de refroidissement sont différentes suivant le procédé de soudage employé: à l'arc électrique, à résistance, Arcatom ou autogène et dans le cas de la soudure à l'arc électrique suivant les électrodes employées: nues, enduites ou enrobées et suivant les conditions de construction ainsi que suivant le mode de travail. Elles sont parfois très grandes et défavorables, assimilables au cas de la trempe. Pour la formation du retrait, les grandes vitesses peuvent avant tout avoir de l'importance, lorsque l'on utilise des matériaux qui, lors d'un refroidissement trop rapide, peuvent présenter des apparitions de trempe et de fragilité.

Ceci peut se présenter dans les aciers à forte contenance de carbone et dans les aciers alliés d'éléments durcissants tels que le manganèse, le chrome, etc. au-dessus d'une certaine proportion, spécialement lorsque le refroidissement se fait assez rapidement.

La fonte engendre des modifications lors du refroidissement. L'austénite qui existe après la solidification se transforme en formes de structure intermédiaire: martensite, troostite, sorbite pour devenir à l'état définitif de la perlite ou de la ferrit-cimentite. Lors d'un lent refroidissement ces transformations se font dans les zones fortement chauffées dans lesquelles les variations de volume, liées à la transformation, n'engendrent aucune contrainte.

Lorsque le carbone et les alliages se trouvent au dessus d'une certaine mesure ces transformations peuvent engendrer des contraintes car lors d'un refroidissement rapide ces transformations s'étendent dans les zones de température plus basse, dans lesquelles se produisent de grandes résistances contre la variation de volume et dans lesquelles les contraintes thermique prennent des valeurs appréciables. Il est aussi possible que la transformation souhaitable austénite — perlite qui est produit dans les aciers ordinaires, ne s'effectue pas pour certains alliages et dans certaines conditions de refroidissement brusque mais qu'au contraire il se produise à l'état définitif dans les zones des cordons de soudure une structure intermédiaire et dans le cas le plus défavorable la martensite dure et cassante.

L'acier sans alliage et à faible contenance en carbone que l'on emploie dans les constructions métalliques ne présente, ainsi que l'expérience nous l'a montré, aucune formation dangereuse de ce genre. Lors de l'emploi d'aciers avec faible alliage cette question peut acquérir déjà une plus grande importance. Pour éviter ces formations défavorables on exigeait un essai de pliage après trempe. Au cours de cet essai l'acier porté à 900° C était immergé dans de l'huile à la température ordinaire, après quoi l'acier à la température normale devait supporter un pliage autor d'un mandrin d'un diamètre double de l'épaisseur de la tôle.

Dans les aciers destinés au soudage le soufre et le phosphore ne doivent pas dépasser une certaine mesure. Le soufre rend l'acier cassant à chaud; lorsque la contenance en soufre est trop forte, le danger de fissuration à chaud augmente dans une forte proportion. Le phosphore donne à l'acier la tendance à se rompre à froid et dans les aciers contenant trop de phosphore il se produit facilement la formation de gros grains et il se forme souvent alors des fissures aux environs des soudures.

Une capacité de déformation suffisante du métal d'apport refroidi ne donne seule aucune garantie de la non susceptibilité à la rupture. Les fissures se produisent vraisemblablement déjà à haute température (6^e Partie).

Lorsque l'épaisseur des profilés ou des tôles augmente, en d'autres termes lorsque le volume et la rigidité des parties à souder augmentent, le danger de fissuration croît, en grande partie à cause de la transmission plus rapide de la chaleur, de telle sorte que ce que nous avons dit ci-dessus pour les aciers à forte contenance en carbone peut aussi acquérir de l'importance pour les aciers de construction à faible contenance en carbone.

Par des essais appropriés il faudra éliminer les sortes de baguettes à souder qui tendent à la formation de fissures lors du soudage avec les aciers en question. La Société des Chemins de fer allemands fait exécuter depuis peu un essai sur la prédisposition à la fissuration au cours des contrôles d'éprouvettes (fig. 1); de tels essais mais dans une forme plus sévère sont exécutés avec emploi d'épaisseurs de tôles plus grandes par plusieurs maisons, pour le développement des électrodes.

La préparation mécanique des zones des soudures (7^e partie, b) pour la lutte contre les effets de retrait exige souvent, comme autre exigence mécanique, que les soudures puissent être travaillées à chaud et à froid de telle sorte que des électrodes et des conditions de soudage qui exigent de l'oxygène et de l'azote en quantité dangereuse doivent être exclues.

Si l'on tient compte des effets de retrait, il est nécessaire d'éliminer les électrodes trop exothermes, c. à. d. qui fondent en développant une grande chaleur. Un jugement très simple de l'effet de température est possible par détermination de la largeur des zones d'influence à côté de la soudure. Des électrodes qui présentent des zones d'influence de température trop larges doivent être éliminées a priori en construction métallique.

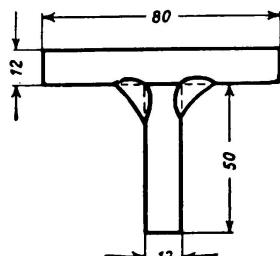


Fig. 1.

Essai sur la prédisposition à la fissuration des électrodes.

2^o Processus d'extension et de retrait.

Les influences de l'échauffement, en tant que déformations sous forme de raccourrissements, recourbements et ondulations ne doivent être expliquées que pour autant qu'il est nécessaire pour saisir la question des contraintes et des fissures de retrait. La lutte contre les déformations est beaucoup plus développée que la lutte contre les contraintes et les fissures car les déformations apparaissent comme beaucoup plus significatives. Les mesures adoptées pour la réduction de déformations désagréables engendrent souvent un accroissement des contraintes et du danger de fissuration. C'est pourquoi l'on doit souvent employer un procédé transitoire pour atteindre des rapports satisfaisants au point de vue des déformations et des contraintes.

a) Le retrait transversal.

Le matériau fondu et liquide s'efforce de se répartir uniformément dans toutes les directions lorsqu'il peut se mouvoir tout-à-fait sans entrave.

L'hypothèse d'un retrait sans contrainte en sens transversal ne peut se réaliser en pratique que dans les soudures bout-à-bout et même dans ce cas seulement dans les soudures qui peuvent être exécutées en peu de temps. Dans le sens longitudinal il n'existe en aucun cas une possibilité de retrait sans entraves.

Le retrait transversal lors du soudage de tôles placées d'une contre l'autre et pouvant se mouvoir librement provient du rétrécissement de la fente de soudage par suite de l'échauffement des parties à souder et du retrait du métal d'apport fondu. La première cause l'emporte dans la suite. La quantité de chaleur apportée détermine le retrait transversal, elle dépend de la grandeur de la section du cordon et de l'emploi spécifique de chaleur pour la fonte de l'électrode.

*H. Koch*¹ et *R. Malisius*² ont effectué des recherches complètes sur le processus de retrait transversal dans les soudures bout à bout. Nous en avons tiré les données suivantes.

¹ *H. Koch*: Schrumpfungen und Schrumpfspannungen bei der Lichtbogenschweißung. Dissertation présentée à L'Ecole polytechn. de Hannovre 1935.

² *R. Malisius*: Die Schrumpfung geschweißter Stumpfnähte. Collection: Aus Theorie und Praxis der Elektroschweißung. Edition Vieweg, 2^e cahier, et Elektroschweißung 7 (1936), p. 1 à 9.

Le retrait se produit dans les soudures continues car le métal d'apport est fondu en suivant, non pas régulièrement sur toute la longueur, mais d'une façon progressive linéaire pour les différents points des soudures. Une bonne fixation réduit d'une manière appréciable le retrait et exige un retrait progressant d'une façon parallèle.

Le retrait croît avec une épaisseur de tôles croissante car la largeur moyenne de la soudure augmente (fig. 2). Une réduction importante de la section du joint, pour autant que le permet un bon soudage, diminue le retrait transversal (fig. 3).

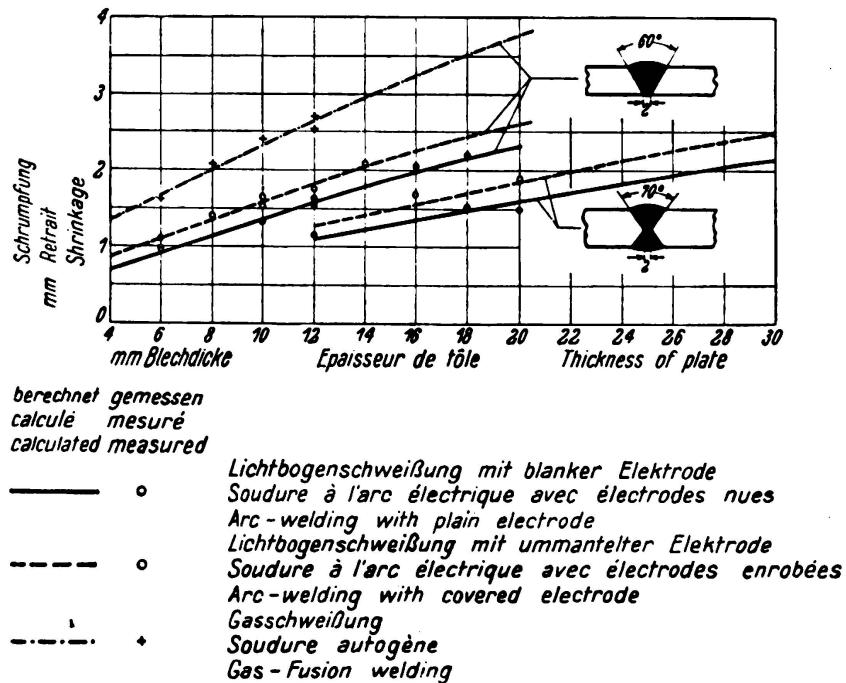


Fig. 2.

Retrait transversal de soudures bien maintenues en place.

Le soudage à plusieurs passes, employé en général lorsque l'on a affaire à des tôles épaisses, engendre en plus du retrait parallèle un retrait angulaire qui peut produire de fortes courbures. Le retrait total d'un tel assemblage est la somme du retrait parallèle et du retrait angulaire (fig. 4).

Le retrait angulaire croît fortement avec l'épaisseur des tôles, le retrait total de même. Le nombre de passes employé a aussi une forte influence. Ces rapports sont donnés à la fig. 5 pour un joint en V et pour des tôles de 12 et 18 mm. Pour maintenir faibles le retrait angulaire et le retrait total il est par conséquent avantageux d'employer des passes moins épaisses avec des électrodes épaisses que beaucoup de passes plus minces. Les points de vue sur la conformation de structure et le danger de fissuration exigent d'autre part l'emploi d'un nombre suffisant de passes.

L'application de sections de joints symétriques ou à peu près symétriques améliore sensiblement les rapports, principalement lorsque les passes de l'ouverture supérieure et inférieure sont soudées alternativement.³

³ E. Höhn: Schweißverbindungen im Kessel- und Behälterbau. p. 56/59, Edition Springer 1935.

Dans les soudures d'angle, le retrait transversal et le retrait angulaire sont importants. De même que dans les soudures bout à bout, il est possible de les réduire lorsque les électrodes n'exigent pas un trop grand apport de chaleur et

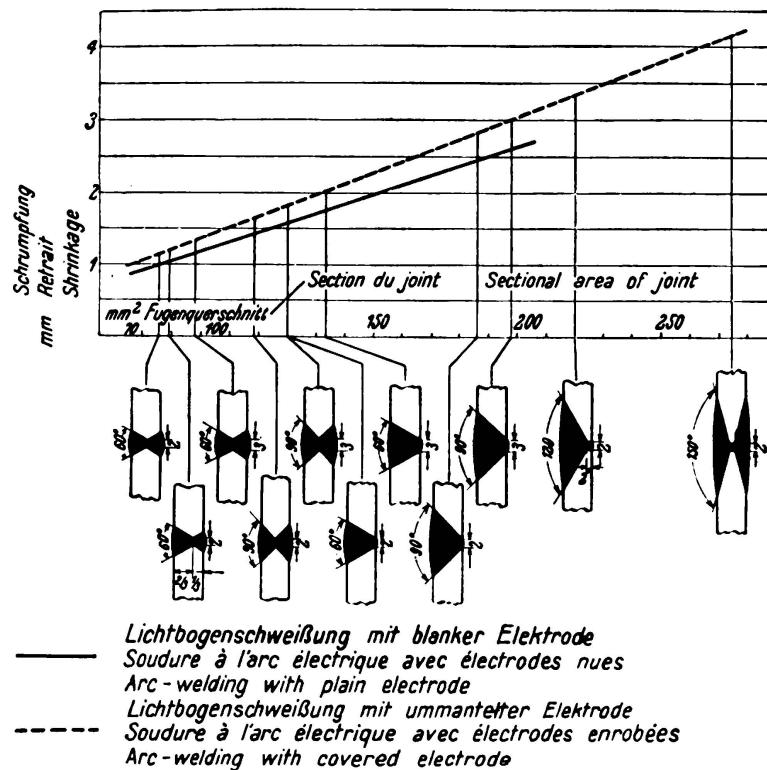


Fig. 3.

Retrait de soudures bout à bout dont le joint est conformé de différentes façons (épaisseur de tôles 12 mm).

lorsque les sections des soudures sont maintenues aussi faibles que le permet la résistance. Il y a cependant danger de fissuration lorsque l'on emploie des soudures d'angle trop minces ou des passes trop minces à la racine.

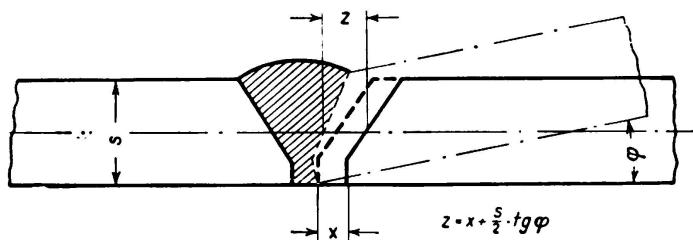


Fig. 4.

x = Retrait transversal parallèle φ = Retrait angulaire z = Retrait transversal total
Décomposition du retrait transversal.

Le retrait transversal est plus faible dans les assemblages avec soudures d'angle⁴ que dans ceux avec soudures bout à bout (fig. 5) car la zone fondue n'agit que sur une certaine partie de l'épaisseur des tôles. On ne peut pas

⁴ Lottmann: Schweißen im Schiffbau. Société d'éditions allemandes Strauß, Vetter et Co. Berlin et „Elektroschweißung“ 1 (1930), p. 133/4.

s'attendre à une relation entre le retrait transversal et l'épaisseur des tôles, ainsi que c'était le cas pour les soudures bout à bout, en admettant une section constante des soudures; on aura plutôt une réduction lorsque les tôles sont épaisses. Le retrait dépendra dans une forte mesure des électrodes employées, de leur diamètre et du mode d'exécution. Comme chaque entreprise a certaines habitudes pour l'exécution des soudures, on peut recommander des essais sur des types d'assemblages qui se présentent souvent.

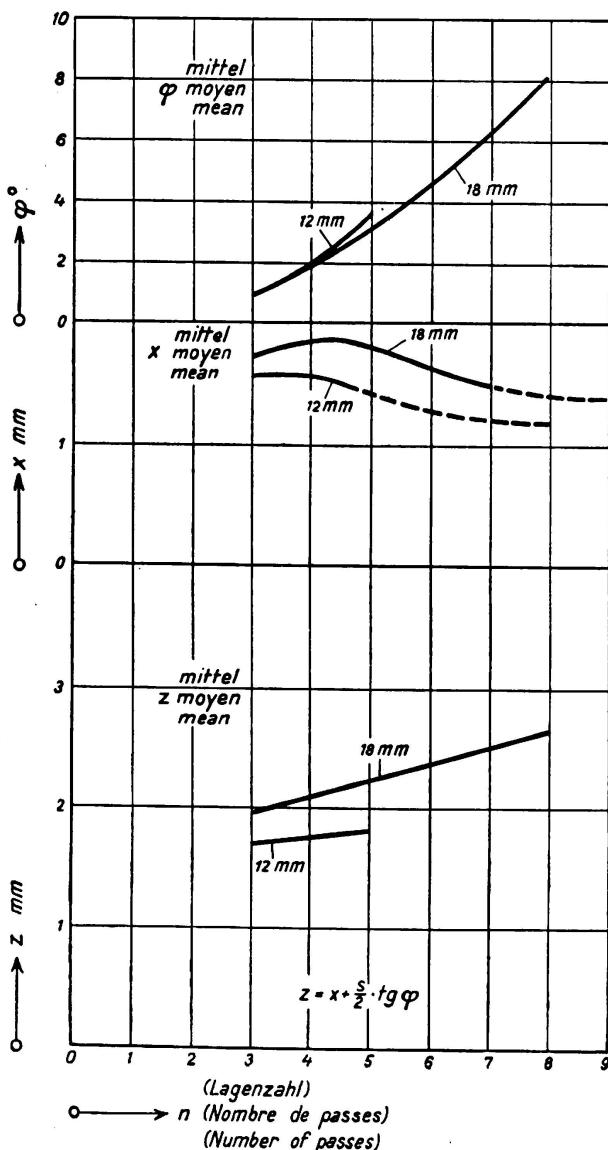


Fig. 5.

Le retrait en fonction du nombre de passes pour une épaisseur constante des tôles (12 et 18 mm) d'après H. Koch.

constant:

$l =$ longueur de la soudure
180 mm;

b = largeur totale 240 mm;
soudure en V;

v = largeur du joint 3 mm.
 Procédé de soudage: Arc électrique, courant alternatif, avec électrodes enrobées de 4 et 5 mm.

Intensité de courant normale; fixé aux deux extrémités.

b) *Le retrait longitudinal.*

Lors de la fonte du métal d'apport liquide et chaud on constate un allongement des zones voisines de la soudure qui sont de même fortement chauffées. Cette déformation ne peut cependant se produire dans la direction de la soudure qu'en relation avec la déformation des parties avoisinantes toujours plus froides. La chute de température relativement brusque, que l'on constate dans tous les procédés de soudage, et le coefficient d'allongement thermique, non constant mais croissant dans les zones de haute température, conduisent à un refoulement

plastique dans les zones très chauffées. C'est là qu'est la cause du retrait et des contraintes de retrait permanentes dans le sens longitudinal.

Dans les aciers au carbone ordinaires la limite d'écoulement commence à apparaître à des températures de $600-700^{\circ}\text{C}$ pour croître alors relativement vite

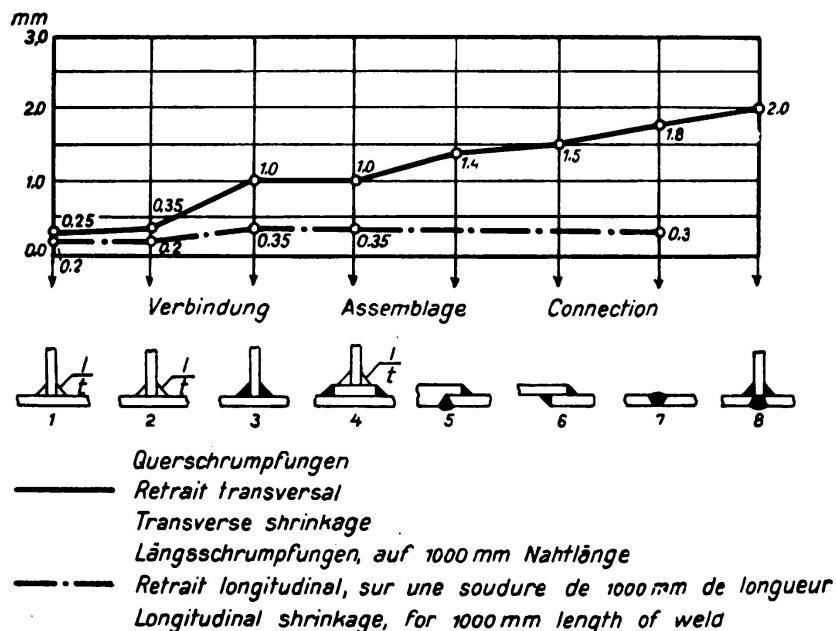


Fig. 6.

Retrait transversal et longitudinal des assemblages soudés, d'après Lottmann.

avec une température décroissante (fig. 7). Dans les régions où la température est de 600°C , les zones avec faibles résistance à la déformation voisinent des zones à résistance croissante à la déformation de telle sorte que l'on a là le maximum du refoulement plastique.

Lors du soudage à l'arc électrique, principalement avec électrodes non enrobées, la région chauffée au-dessus de 600° est très étroite de telle façon que le plus

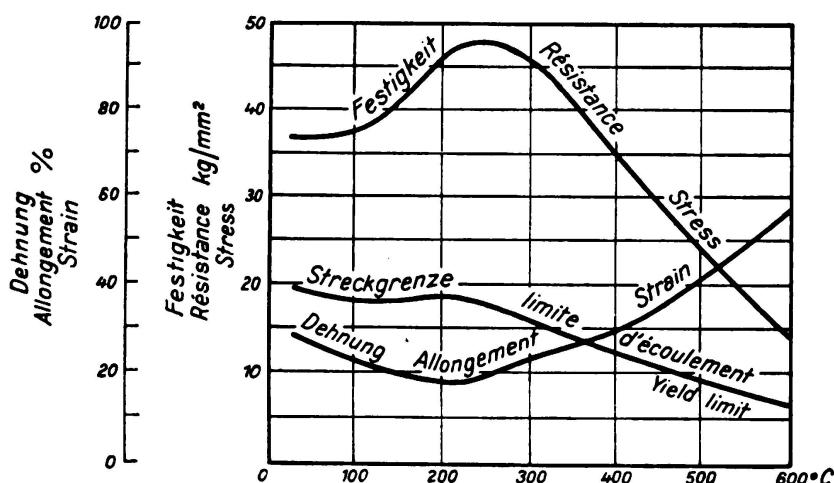


Fig. 7.

Propriétés de résistance de l'acier sans alliage, d'après G. Urbanczyk.

C = 0%; Mn = 0,51%; P = 0,016%; S = 0,032%.

grand refoulement se produit directement à la soudure. Quand les zones chauffées sont plus larges, les endroits de grand refoulement s'éloignent de la soudure (fig. 8). Par suite de la transition douce de température, lorsque la zone chauffée est grande, la transition du métal à faible résistance à la déformation, au métal à plus grande résistance à la déformation est elle-même adoucie. Le refoulement maximum est par conséquent réduit.

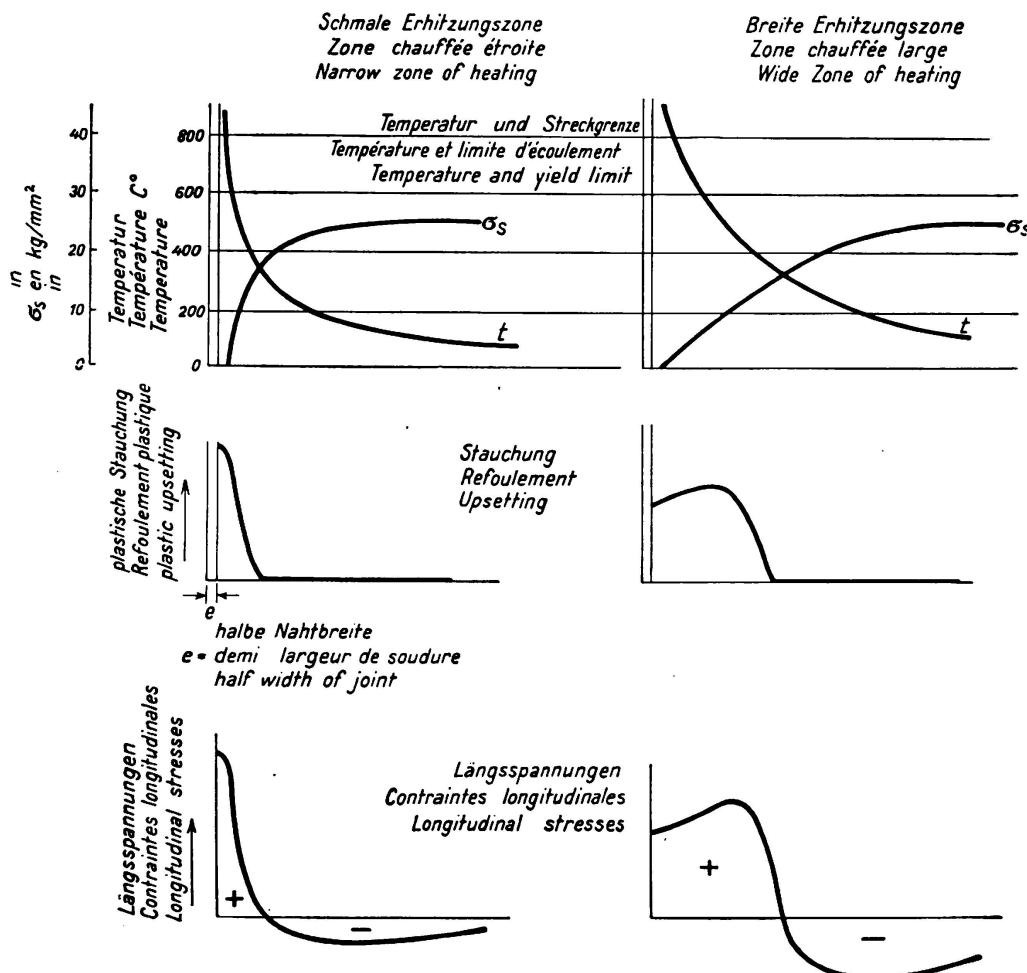


Fig. 8.

Rapports de température, de refoulement et de contrainte pour des zones chauffées étroites et larges.

Le retrait longitudinal ne représente pratiquement qu'une fraction du retrait transversal (fig. 6). On en a souvent conclu autrefois que les contraintes de retrait permanentes étaient aussi faibles dans la direction de la soudure, de telle sorte que l'on n'attribuait qu'une faible importance au retrait longitudinal et aux contraintes dues au retrait longitudinal. Pour traiter d'une façon rationnelle le problème des contraintes de retrait, contrairement à cette conception, il est nécessaire de partir du retrait longitudinal et de ses effets.

3° — *Les contraintes de retrait lors du soudage sans fixation.*

Au cours du refroidissement, les parties qui même durant le soudage ne furent que peu chauffées et qui ne se déforment qu'élastiquement, doivent reprendre de

nouveau leur longueur primitive, tandis que les zones qui voisinent la soudure, raccourcies par le refoulement, veulent prendre une longueur qui est moins grande que la longueur primitive. Elles en sont cependant empêchées par leurs rapports avec les parties n'ayant subi qu'une déformation élastique. Il se forme ainsi un état de contraintes produites par le soudage, dans le sens de la soudure, avec grandes contraintes de traction dans la soudure et les zones fortement chauffées et, pour des raisons d'équilibre, des contraintes de compression correspondantes, dirigées dans le même sens (contraintes de réaction) dans les parties peu ou pas chauffées.

Dans les zones chauffées étroites il se produit une forte contrainte de traction limitée à une zone étroite; lorsque les zones chauffées sont larges, les contraintes de traction sont plus petites, la valeur maxima se trouve souvent à l'intérieur de la soudure, la zone de traction est sensiblement plus large. Les compressions de réaction sont faibles lorsque les zones chauffées sont étroites, elles sont fortement agrandies quand les zones chauffées sont larges, les refoulements deviennent plus grands (fig. 8).

Il se forme des contraintes transversales en même temps que les contraintes longitudinales. Cette considération ne s'entend d'abord qu'aux soudures bout à bout, les relations sont beaucoup plus complexes pour les soudures d'angle (paragraphe 5d). Nous admettons d'abord que le retrait transversal n'est pas empêché par un encastrement ou une fixation interne (paragraphe 5a).

Le chauffement du joint de soudure engendre une faible courbure, souvent imperceptible des arêtes vers l'extérieur de telle sorte que les extrémités du joint ont une distance plus grande que les parties médianes. Lors du refroidissement il se produit un redressement, renforcé spécialement par l'influence de l'effort de retrait longitudinal des zones raccourcies des environs de la soudure. Le métal

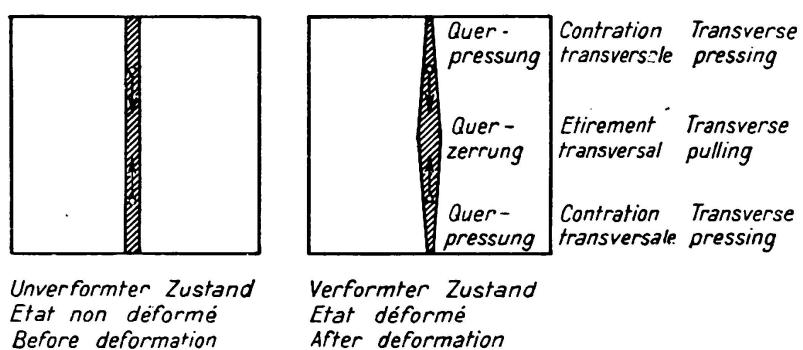


Fig. 9.

Le retrait longitudinal engendrant les contraintes transversales lors d'un soudage libre.

d'apport se refroidissant est contracté, sous ces influences, aux extrémités de la soudure, et il est étiré dans les parties médianes (fig. 9). (L'expression «soudage sans fixation» ne désigne que les conditions extérieures).

Les contraintes longitudinales et transversales doivent satisfaire les conditions d'équilibre (fig. 10). Je désignerai l'état de contrainte par *état naturel de contrainte au soudage*, car il correspond à la propriété de la soudure d'exécuter des assemblages par des cordons de soudure étroits.

Dans la pratique on doit toujours compter sur certaines fixations (paragraphe 5). Le cas d'un soudage sans fixation transversale n'existe que lors du soudage simultané de toute la longueur et de toute la hauteur du cordon et lors de l'emploi de la soudure à résistance. Effectivement les effets de fixation transversale sont si réduits dans bien des assemblages importants avec soudures bout à bout que les conditions d'un soudage sans fixation sont déterminantes. Les contraintes transversales qui résultent seulement du retrait longitudinal lorsque l'on n'a aucune fixation transversale sont en réalité si grandes que même dans les cas où il existe une forte fixation on ne peut les négliger.

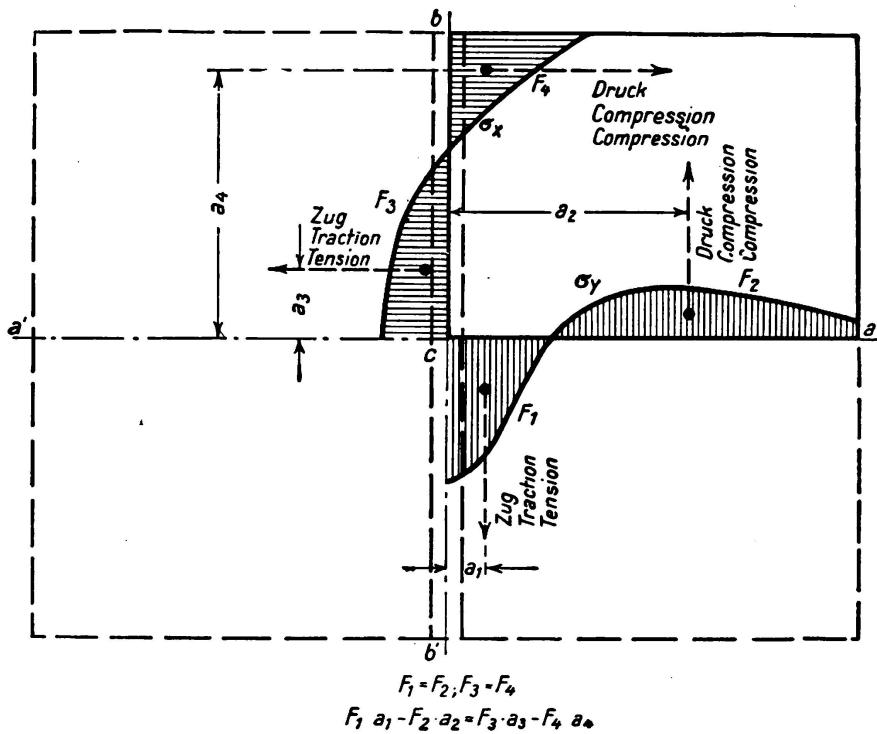


Fig. 10.

Relation entre les contraintes longitudinales et transversales sur la base de l'équilibre interne.

Par des recherches expérimentales on a confirmé la disposition des contraintes longitudinales et transversales dans des soudures bout à bout (fig. 11, plaques 20, 3 et 15). Même dans les longues soudures et aussi dans les soudures épaisses établies en plusieurs passes,⁵ cet état de contrainte se produit approximativement

⁵ G. Bierett: Versuche zur Ermittlung der Schrumpfspannungen in geschweißten Stumpfnahtverbindungen. Z.V.D.I. 78 (1934), p. 709/715.

G. Bierett et G. Grünig: Schrumpfspannungen in autogen geschweißten Teilen. Autog. Metallbearbeitung 27 (1934), p. 259/266.

G. Grünig: Die Schrumpfspannungen beim Schweißen. Stahlbau 7 (1934), p. 110/112. Ces trois derniers travaux sont rassemblés dans les Mitt. der Deutschen Material-Prüfungsanstalt cahier spécial 25, p. 65/86.

F. Bollenrath: Eigenspannungen bei Lichtbogen und Gasschmelzschweißung. Abhandlung Aerodyn. Inst. Techn. Hochschule Aachen. 1934 cahier 14, p. 27/54.

F. Bollenrath: Weitere Untersuchungen über Eigenspannungen in einfachen Schweißnähten. Archiv für das Eisenhüttenwesen 2 (1935/36) cahier 4, p. 203/207.

de telle sorte qu'il faut lui attribuer une grande signification pratique. Le plus important est la formation de fortes contraintes de compression aux extrémités des soudures, ce qui exige une consolidation de ces extrémités.

L'influence des contraintes transversales, résultant du seul retrait longitudinal, sur la résistance ne permet aucune hésitation lorsqu'elle est seule en considération.

4° — *Les contraintes de retrait longitudinal.*

Les contraintes de retrait longitudinal ont une grande importance en construction métallique pour les soudures parallèles à la direction des forces principales. La section des zones de soudure ne représente qu'une petite partie de la

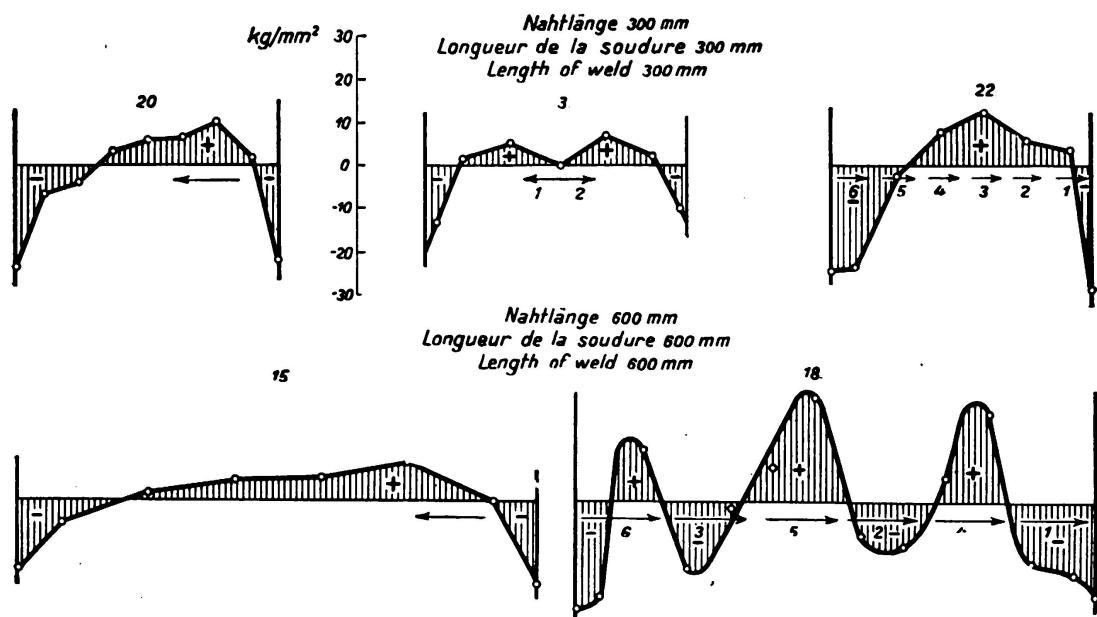


Fig. 11.

Matériau: St. 37. Epaisseur: 12 mm. Procédé de soudure: à l'arc électrique.

Electrodes: Seelen Böhler Elite. Nombre de passes: 3.

Contraintes transversales dues au soudage pour un soudage libre et différents sens de soudage.

section totale. Par zone de soudure nous n'entendons pas seulement ici la section de la soudure elle-même, mais aussi la partie de section chauffée et plastiquement refoulée. A part quelques exceptions, la section totale (section normale à la soudure) est toujours très grande par rapport à la section de la zone de soudure.

Dans les zones de soudure il existe toujours de fortes contraintes de traction, le reste de la section est principalement sollicité à la compression. Les conditions de contrainte dans les zones de soudure elles-mêmes sont importantes pour les parties qui, en service, sont sollicitées à la traction; les contraintes de compression engendrées par le soudage (contraintes de réaction) dans les autres parties de la section sont importantes pour les parties sollicitées à la compression.

Les contraintes longitudinales dans les soudures sont maxima dans les zones chauffées étroites et dans un métal d'apport ou en métal de base très solide. Lorsque le matériau n'est pas approprié et spécialement lorsque les parties sont médiocres il y a donc danger de fissuration transversale dans les soudures. Des

matériaux et des électrodes qui favorisent de tels inconvénients sont à éliminer a priori.

La grandeur des contraintes longitudinales dans les soudures peut être réduite par une zone chauffée plus large. Des électrodes à grand développement de chaleur et des procédés de soudage correspondants sont à ce point de vue très favorables. Dans des pièces soumises à la traction seulement il faudrait tenir compte de ces considérations. Il ne faut cependant pas oublier qu'avec une zone chauffée plus grande, la force de retrait résultante, agissant sur une plus grande largeur augmente et en même temps les contraintes de compression opposées. Dans les pièces soumises à la seule compression on établira plus volontiers une contrainte de traction dans la soudure, forte et agissant sur un petit domaine, que des contraintes de traction plus petites, agissant sur un domaine plus grands et entraînant de fortes contraintes de compression. Lors du choix des électrodes ces relations ne devraient pas être négligées. Dans l'emploi de la soudure à l'arc électrique on devrait par exemple se baser, pour des pièces comprimées, sur d'autres considérations, comme par exemple la capacité de déformation. Lors de la construction des poutres, on évitera au moins de choisir des zones chauffées trop étroites pour les soudures longitudinale de la membrure tendue, tandis que dans la membrure comprimée on limitera autant que possible l'étendue de cette zone. Ce choix ne se fait actuellement pas dans la pratique, l'utilisation de ces possibilités permettrait certainement une amélioration.

Il n'existe que peu de données exactes sur la grandeur des compressions de réaction, qui peuvent acquérir de l'importance pour la construction, si l'on tient compte du danger de flambage et pour l'atelier, dans leurs effets d'ondulation, spécialement dans les pièces minces. *Doernen** a déterminé ces contraintes de compression dans l'âme des poutres soudées en I.

On voit d'après ces recherches que le constructeur doit limiter les sections des soudures à la dimension vraiment nécessaire. Dans de tels cas, l'atelier doit d'autre part faire son possible pour limiter la section des zones de soudure par des procédés appropriés. C'est ici que l'on peut recommander l'emploi d'électrodes sans développement exagéré de chaleur et le maintien de la section donnée pour la soudure.

La fig. 12 donne les résultats de mesures de contraintes propres, effectuées sur des profilés soudés, dans lesquels existent de fortes contraintes dans les arêtes. Même lorsqu'il semble que dans de tels cas de fortes compressions propres n'influent pas fortement la stabilité, ainsi que le montrent les résultats des essais de flambage exécutés sur de telles pièces au Laboratoire officiel d'essai des matériaux de Berlin-Dahlem, il faut cependant adopter toutes les mesures du genre indiqué pour exécuter une construction très résistante.

5^o — *Les fixations transversales.*

a) *Fixations transversales extérieures et intérieures.*

Dans le sens transversal il est possible d'entraver l'allongement et le retrait:

1^o par des *fixations extérieures*. Par fixation extérieure nous entendons l'agrafage nécessaire pour des raisons constructives, des parties à souder entre

*) J. Doernen: Schrumpfungen an geschweißten Stahlbauten. Stahlbau 6 (1933), p. 22/24.

elles, avant le commencement de l'exécution d'un cordon. Comme exemple nous pouvons citer les soudures reliant une âme à des semelles continues, ou assemblées elles-mêmes par soudage, et les soudures reliant à une âme des pièces de dimensions importantes.

2^o par des *fixations intérieures*. Par fixation intérieure d'une soudure nous entendons l'agrafage des pièces primitivement libres et mobiles l'une par rapport à l'autre, au moyen des parties de soudure ou des passes, qui rendent impossible une exécution sans contraintes transversales des cordons de soudure sur toute

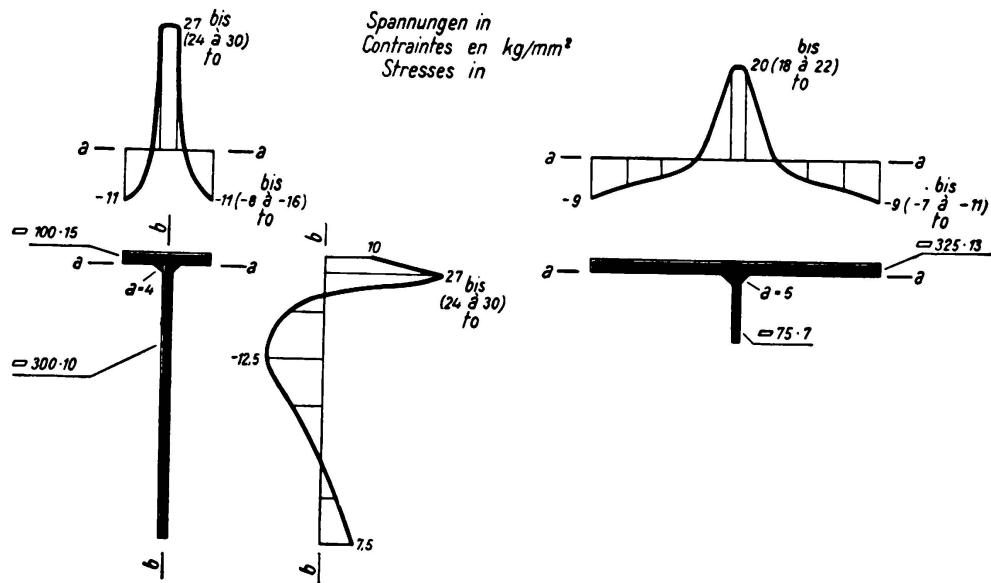


Fig. 12.

Contraintes dues au soudage suivant la direction des soudures dans les profils assemblés par des soudures d'angle. Procédé de soudage à l'arc électrique.

Remarque: Les nombres entre parenthèses donnent les valeurs limites déterminées par plusieurs essais identiques.

leur longueur ou sur toute leur hauteur. Ces contraintes résultent de la fonte, du chauffement et du refroidissement non pas continus mais successifs, des différentes parties de soudure sur la longueur du cordon et des différentes passes sur la hauteur du cordon.

3^o Les fixations agissent comme un encastrement extérieur dans *l'exécution des soudures d'angle*.

4^o *Le soudage interne ou appliqué* représentent des cas spéciaux, c'est-à-dire le soudage interne d'une plaque de réparation ou le soudage appliqué de plaques, en grande partie par des soudures sur tout le périmètre. Même dans le cas d'une exécution simultanée il se produit des fixations transversales. Les conditions sont les mêmes que dans une fixation extérieure.

5^o On rencontre très souvent en même temps une fixation extérieure et une fixation intérieure.

b) *Les contraintes transversales en fonction des conditions de température et des propriétés physiques des matériaux.*

L'allongement thermique des parties chauffées avoisinant la zone de la soudure produit, lorsque l'on a une fixation, un refoulement des zones de la soudure dans

le domaine des hautes températures. Ce refoulement est d'autant plus fort que la zone chauffée est plus large. Les contraintes additionnelles de retrait transversal dépendent donc en grande partie de la quantité de métal d'apport introduit et de l'emploi spécifique de chaleur par unité de volume du métal d'apport fondu. Les retraits transversaux indiqués à la fig. 3 représentent précisément une échelle pour les différences de contrainte dans des sections de soudures de différentes grandeurs. Cependant ces retraits ne sont que le résultat du rétrécissement du joint de soudage sous l'effet de la chaleur et du retrait du métal fondu, tandis que ces différences augmentent encore par suite de l'encastrement résultant de l'effet de refoulement dans les zones chauffées. Lors du soudage, la progression du retrait dans la soudure est toujours d'abord opposée à l'allongement des pièces soudées sous l'effet de l'écoulement de la chaleur. Lors d'un soudage avec fixation cet allongement comprime la zone de la soudure. Les propriétés physiques du matériau jouent un grand rôle dans ces processus: coefficient d'allongement, chaleur spécifique, capacité de transport de la chaleur et limite d'écoulement. Ces valeurs ne sont pas fixes mais dépendent de la température et par conséquent leur calcul est très difficile. Si l'on estime l'effet des facteurs que nous venons d'indiquer, on peut facilement voir que lorsque l'on apporte une grande quantité de chaleur on a des relations beaucoup plus défavorables, ainsi que nous l'ont montré les essais et l'expérience pratique.

c) *Mesures destinées à réduire l'effet de fixation.*

En maintenant faible la section des soudures et en éliminant les électrodes qui exigent une trop grande quantité de chaleur spécifique, on satisfait aux conditions les plus importantes de la réduction des effets de fixation extérieure et intérieure et de l'exécution de soudures sans contraintes transversales trop grandes.

Des fixations extérieures ou une fixation d'un type semblable aux fixations extérieures seront réduites de la façon la plus sûre par déformation élastique des parties avoisinant le joint de soudage et par une suite appropriée des différentes soudures. Une légère courbure préliminaire des arêtes de la soudure hors du plan de la tôle (dans des sections de soudure asymétriques, vers le côté de la plus grande ouverture) donne une souplesse élastique qui facilite sensiblement un travail difficile lors du soudage interne de plaques, au moyen de deux soudures à exécuter parallèlement, et lors du soudage interne et appliqué au moyen de pièces soudées sur tout leur pourtour. Un exemple important est donné par le joint de l'âme dans un joint universel d'une poutre (fig. 13). Dans ce cas l'application d'une pièce intermédiaire pas trop longue et légèrement courbée en forme de cylindre, et la préparation de joints d'allongement dans les parties extrêmes de l'âme en n'exécutant pas les soudures de gorge, facilitent l'exécution du joint de l'âme, même lorsque les joints des semelles sont déjà terminés. *L'empêchement du retrait des joints des semelles, par suite de la résistance au frottement, peut être éliminé par des mesures qui facilitent le retrait, par l'application de manchons de serrage ou d'autres moyens de ce genre.*

Les fixations intérieures d'une soudure qui, ainsi que nous l'avons dit au paragraphe 5 a, ne proviennent que du processus de soudage à l'intérieur de la soudure ne peuvent par conséquent être éliminées que par une exécution appropriée

de la soudure. La succession du soudage à l'intérieur d'un cordon, la vitesse de soudage et le nombre de passes jouent ici un rôle important.

La fixation transversale qui se produit sur la longueur de la soudure est une conséquence de la succession de la fonte et du refroidissement. Ces fixations transversales sont d'autant plus faibles que la température est plus régulière entre le point où le cordon est terminé et le début du cordon. De grandes vitesses de soudage servent donc à réduire la fixation transversale sur la longueur de la

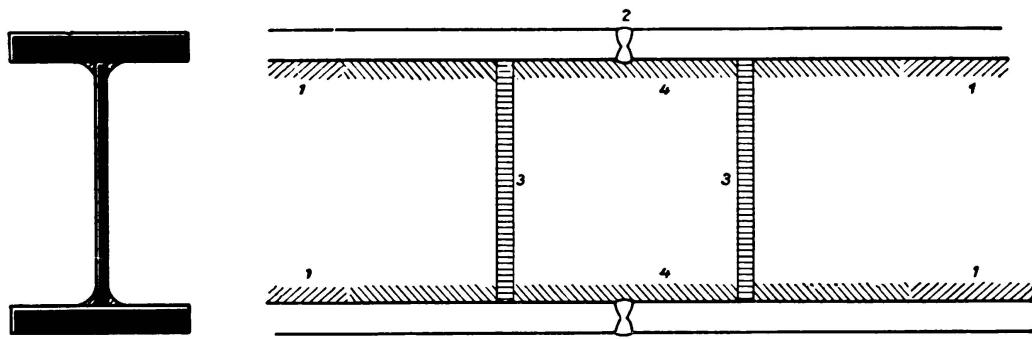


Fig. 13.

Succession appropriée du soudage dans un joint de poutre.

soudure. Pratiquement il est possible de réduire fortement cette fixation transversale par emploi de chaleur durant le soudage (paragraphe 7a) ou, ainsi que cela se fait actuellement, *par application du soudage graduel*. Le mieux est l'emploi du soudage à pas de pélerin, soit en partant d'une extrémité du cordon soit en partant du milieu et en progressant des deux côtés symétriquement (fig. 14). *Cette progression de la soudure est surtout avantageuse pour la première passe* car le danger de fissuration (paragraphe 6) et le recouvrement des extrémités non terminées de la soudure, qui peut facilement se produire lors d'un soudage continu, par suite de la propagation de la chaleur, sont fortement réduits tandis que les autres passes peuvent très bien être soudées d'une manière continue en variant la direction principale. Les pas seront choisis de 10 à 40 cm suivant la longueur de la soudure et l'épaisseur des tôles mais dans les soudures très longues

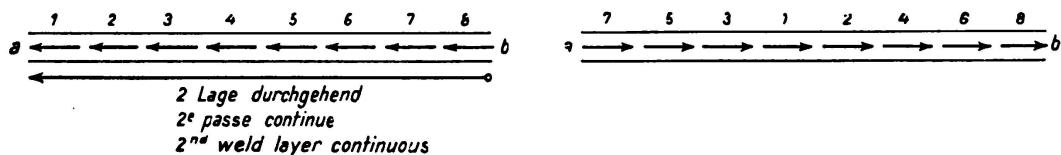


Fig. 14.

Soudage à pas de pélerin.

on peut encore choisir des pas plus longs. Un attachage bien fait et serré est nécessaire à la distance de la longueur des pas. Un soudage par sauts est très défavorable car il peut engendrer de fortes contraintes transversales (fig. 11, plaque 18).

L'application du soudage graduel a pris une grande extension en construction navale où il faut exécuter des soudures très longues. Lors du soudage intérieur de plaques on ne peut éviter son emploi. Dans la construction des poutres cette

application peut être importante pour l'exécution des longues soudures de l'âme, avant tout pour le soudage de la reprise à la racine et peut-être aussi pour les longues soudures continues.

Pour les petites longueurs jusqu'à 400 mm le soudage graduel ne présente aucun avantage. Pour les soudures bout à bout de 500 à 800 mm qui se présentent souvent en construction métallique, ce soudage peut présenter des avantages pour l'exécution des reprises à la racine, lorsque l'on a une fixation extérieure. Dans la règle on peut exécuter ces soudures sans difficulté d'une manière continue ou en deux sections. Lors de la division de la soudure en deux sections il faut s'attendre, lorsque l'on n'a pas de fixation extérieure, à des fortes compressions aux extrémités de la soudure, pour un soudage allant des bords vers le centre ou du centre vers les bords. Si l'on a une fixation extérieure, le

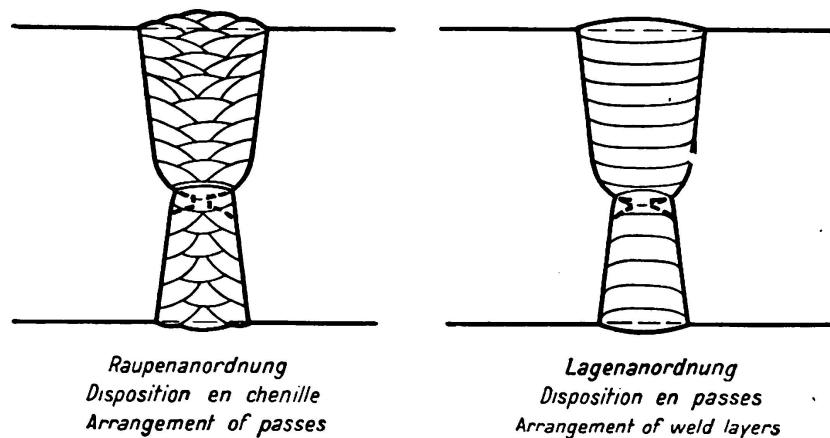


Fig. 15.

Le soudage des cordons bout à bout épais.

soudage allant des deux extrémités vers le milieu présente plus de garantie qu'il n'y a que des compressions ou de faibles contraintes de traction aux extrémités de la soudure.

Les fixations suivant la hauteur de la soudure peuvent être réduites par le mode d'exécution de la soudure, avant tout par la forme du joint et le nombre de passes. On peut voir que des formes de soudure unilatérales, exécutées avec un grand nombre de passes minces engendrent une répartition en hauteur très irrégulière et de fortes pointes de tension dans les passes supérieures.

Des sections symétriques ou à peu près symétriques sont avantageuses car elles permettent un soudage alterné.⁶ Il n'y a aucune unité dans les différents domaines de l'art de la soudure au point de vue du nombre de passes, de la disposition des passes dans la section de la soudure et du diamètre des électrodes. Dans la construction des réservoirs on a passé, sur la base de l'expérience, à l'emploi des électrodes épaisses pour le soudage des tôles épaisses;⁷ l'épaisseur des passes ne doit cependant pas être choisie trop grande, elle ne doit pas dépasser 3 à 4 mm mais ne doit non plus pas être trop mince. Le soudage se fait en *passes larges* d'un côté de la soudure à l'autre.

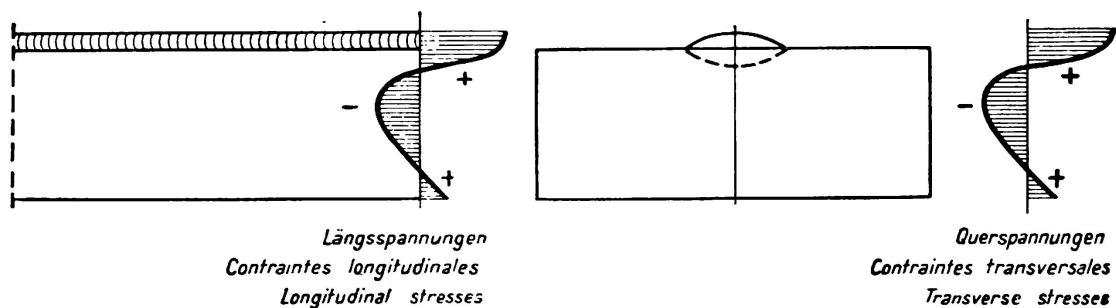
⁶ E. Höhn, déjà cité plus haut.

⁷ Joellenbeck: Elektroschweißung 8 (1936).

On rencontre parfois des électrodes très minces par rapport à l'épaisseur des tôles. Dans ce cas on ne soudera pas en passes larges mais d'une forme en chenille (fig. 15) où les passes placées au milieu sont là pour réduire les contraintes de retrait vers les passes latérales. Le soudage en chenille peut plus facilement conduire à des fautes que le soudage en passes, on peut souhaiter une imitation de la méthode de travail adoptée dans la construction des réservoirs. On peut appliquer des mesures spéciales pour la réduction des fixations (paragraphe 7 b).

d) *Les contraintes de retrait dans les assemblages avec soudures d'angle.*

Les soudures d'angle ne sont fondues qu'à la surface des parties à assembler avec pénétration restreinte. L'allongement et le retrait du métal d'apport sont entravés en sens longitudinal et transversal par le matériau qui se trouve à côté et au dessous de la soudure. Lors de l'exécution d'une soudure à la surface d'une tôle, il se produit en sens longitudinal et transversal les contraintes représentées à la fig. 16. Les contraintes de traction maxima correspondent dans



les deux directions au moins à la limite d'écoulement du métal. A cette sollicitation suivant deux axes, avec fortes contraintes longitudinales et transversales, s'ajoute une forte sollicitation dirigée perpendiculairement, engendrée par la mise en tension produite par le retrait des pièces jointes l'une à l'autre. En tous cas, les zones qui environnent toutes les surfaces passées au feu mais vraisemblablement aussi la plus grande partie de la soudure, sont sollicitées à un état de contrainte spatial avec traction dans tous les sens (fig. 17).

La mise en tension produite par le retrait dans les assemblages en forme de T peut être réduite par l'exécution successive des deux cordons de soudure parallèles, c'est pourquoi l'on adopte souvent pour les longues soudures le soudage décalé des deux cordons. Lorsqu'on a deux soudures d'angle parallèles, par exemple pour l'application d'une plaque, une disposition correspondant à une plus grande distance des deux cordons est favorable.

Les assemblages avec soudures d'angle sont soumis à un plus grand risque de fissuration que les assemblages avec soudures bout à bout, par suite des rapports beaucoup plus défavorables des contraintes propres. Les brèves explications que nous donnons ici seront développées dans le paragraphe suivant qui s'occupe principalement de cette question.

6^o *Le danger de fissuration.*

Les fissures peuvent se produire directement après le soudage, dans l'état chaud, et lors du refroidissement dans la zone de température à capacité de déformation réduite, c'est-à-dire vers $200-300^{\circ}\text{C}$ (zone de rupture au bleu). On peut se demander si des fissures résultant des contraintes de soudage peuvent aussi se produire lors du refroidissement total sans sollicitation extérieure additionnelle. Dans la plupart des détériorations il s'agit vraisemblablement de fissures à plus hautes températures; même les fissures que l'on a observées après achèvement des travaux de soudage ne se sont produites vraisemblablement que sous l'effet de fissures superficielles formées lors du soudage déjà. (Nous

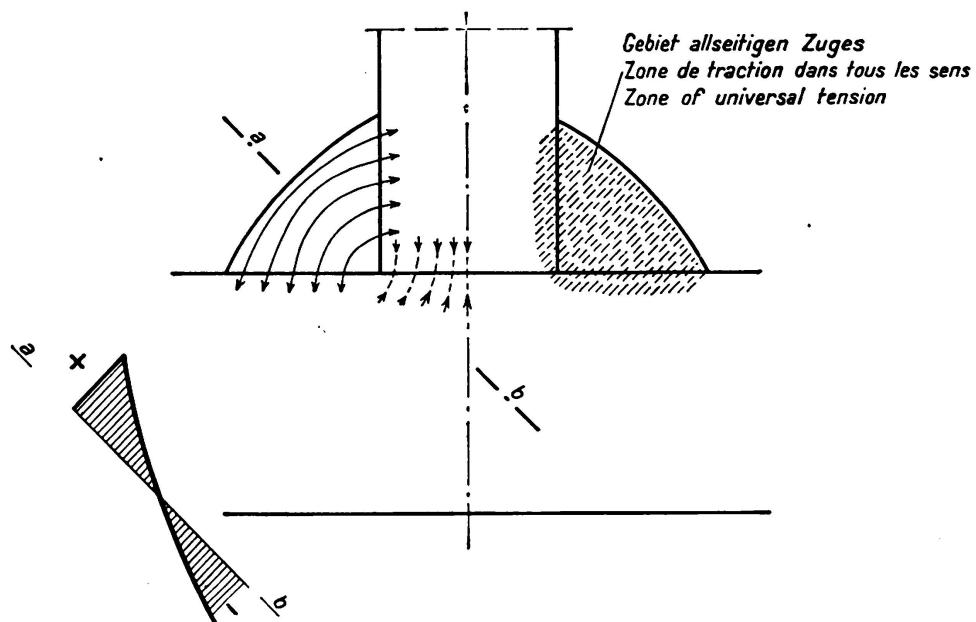


Fig. 17.

Effet de retrait dans les soudures d'angle.

ne parlerons pas ici des fissures aux endroits de fixation et des fissures de cordons légères, engendrées pas l'exécution d'autres sections de soudure.) Dans bien des cas on peut observer des fissures qui ne proviennent que de la chaleur.

L'appréciation du danger de fissuration et des mesures propres à y parer, doit principalement être basée sur les propriétés du métal d'apport à hautes températures. La considération de l'état de contrainte qui reste à l'état froid seulement peut facilement conduire à des conclusions erronées. Par métal d'apport il faut entendre ici le produit mélangé résultant de l'électrode et du métal de base fondus.

Le coefficient d'allongement thermique de l'acier est à la température ordinaire de $1,1 \cdot 10^{-5}$ (par degré) il devient progressivement plus grand au dessus de 100°C . Le retrait total du métal d'apport lors d'un refroidissement de 700°C à la température ordinaire, est d'environ 1% pour un retrait tout à-fait libre. Si l'on a une fixation, il s'ajoute à cette valeur un certain retrait engendré par le refoulement des zones voisines portées à haute température, dont la grandeur dépend des conditions constructives données (degré de fixation)

et des conditions de soudage. *Wörtmann* et *Mohr*⁸ ont fait des considérations plus étendues qui pour un cas déterminé, sous des rapports très défavorables, ont donné un retrait total de 4 à 6,5 % pour différentes conditions de soudage. Par rapport à la capacité d'allongement du métal d'apport fondu, qui est beaucoup plus grande que cette valeur pour les baguettes à souder généralement employées actuellement, spécialement dans le zone des hautes températures, on ne pourrait presque pas expliquer la formation des fissures.

Lors de l'exécution d'assemblages en croix de tôles de 12 mm d'épaisseur, en acier sans alliage jusqu'à une haute contenance en carbone (= 0,7 %), *Zeyen*⁹ a déterminé le danger de fissuration pour C 0,4 % et pour emploi d'électrodes à fort enrobage E 52 h (conditions de livraison des Chemins de fer Allemands). Par contre il n'y a aucune augmentation du danger de fissuration à chaud lors de l'emploi d'électrodes faiblement enrobées et d'électrodes à âme spéciale, qui en général ont un angle de pliage moins grand et qui donnent de moins bons résultats à l'essai de résilience. L'explication en est que pour les deux électrodes citées le mélange avec le métal de base ne se fait pas aussi bien. Dans ce sens ces électrodes sont plus favorables que les électrodes enrobées, de telle sorte qu'au point de vue des propriétés de déformation, des électrodes normalement défavorables peuvent dans certaines conditions spéciales être beaucoup mieux appropriées.

La résistance à haute température, la limite d'écoulement à haute température et la capacité d'allongement pour certaine température, déterminées pour un état de contrainte à un axe ne peuvent pas indiquer la sécurité à la fissuration, car dans les contraintes dues au soudage on se trouve toujours en présence d'un état de contrainte à deux axes et souvent même à trois axes, spécialement dans les assemblages avec soudures d'angle. Comme il est presque impossible de tirer des conclusions sur les relations de cohésion interne du mélange constitué par l'électrode et le métal de base pour les hautes températures, on est obligé d'entreprendre des essais empiriques sur la tendance à la fissuration, ainsi qu'ils sont représentés à la fig. 1. Par de telles essais on obtient un tableau succinct de la qualification matérielle et formelle du métal d'apport. *La question de la forme en tenant compte de la trajectoire des forces de retrait joue ici un rôle important.*

Dans les soudures d'angle on peut s'attendre, d'après la figure 17, à une allure tranquille des lignes de contrainte principale résultant des forces de retrait, lorsque l'on a une limitation à peu près rectiligne du triangle de la soudure; dans les soudures à concavité accentuée il doit se produire un certain dérangement dans l'allure des lignes de force aux environs de la surface, avec pointes de contrainte correspondantes (fig. 18). *L'expérience nous a montré que les soudures à concavité accentuée se fissurent plus facilement que les soudures à section à peu près triangulaire. Les légères fissures que l'on observe souvent aux extrémités de la concavité ne doivent pas être attribuées à cette circonstance. Le gros avantage montré par la connaissance du comportement dyna-*

⁸ *F. Wörtmann et W. Mohr: Wärmespannungen bei Schweißungen und der Einfluß auf die Sicherheit ausgeführter Konstruktionen. Schweiz. Bauzeitung* vol. 100, p. 243/246.

⁹ *K. L. Zeyen: Schweißen unlegierter Stähle höherer Festigkeit. Stahl und Eisen* 56 (1936), p. 654/657.

mique des soudures concaves doit être limité si l'on tient compte des effets de retrait, d'autant plus que ce comportement aux sollicitations dynamiques résulte moins de la concavité de la surface que de la transition douce entre la surface de la tôle et celle de la soudure et que pour certaines sollicitations (soudures à

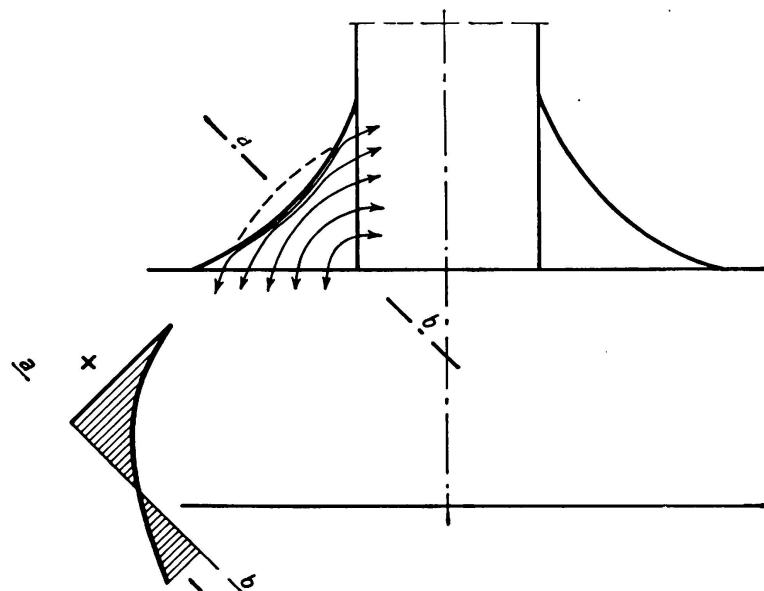


Fig. 18.

Effet de retrait dans les soudures à concavité accentuée.

cisaillement) il ne faut pas attribuer une importance prépondérante à ce point de vue.¹⁰

Même dans les soudures bout à bout la forme des différentes passes est importante, car lorsque la disposition des passes est défavorable, les fissures se produisent plus facilement, toutes les conditions restant les mêmes, que lors d'une disposition favorable des passes (fig. 19).

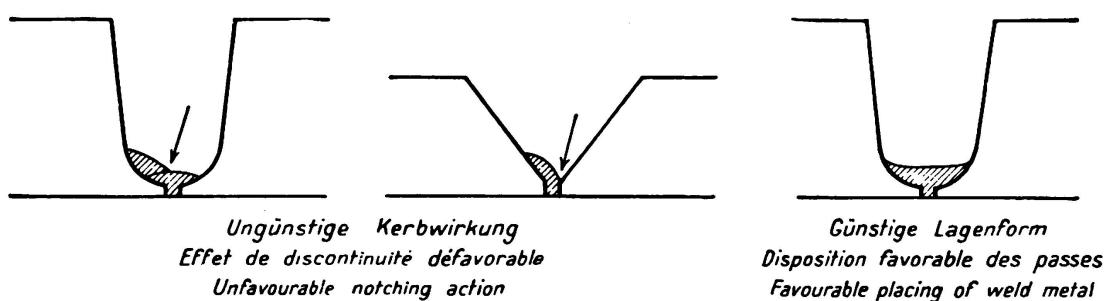


Fig. 19.

Danger de fissuration pour une disposition défavorable des passes.

Des passes trop minces par rapport à l'épaisseur du métal de base, principalement près de la racine, conduisent facilement à des fissures. Dans les soudures bout à bout une passe à la racine trop mince par rapport à l'épaisseur des tôles se fissure pour la plupart des fixations que l'on a actuellement car l'écou-

¹⁰ G. Bierett: Die Lehren der Spannungs- und Festigkeitsforschung für die Ausbildung und Ausführung geschweißter Konstruktionen. Elektroschweißung 6 (1935), p. 141/150.

lement des forces est en lui-même déjà très défavorable (fig. 20). La plupart des fissures partent de la racine, c'est pourquoi en construction de réservoirs on exécute souvent la passe à la racine à l'envers en introduisant une mince plaque du matériau de base (fig. 15). *Pour éviter la fissuration lors de l'exécution des soudures épaisses, les travaux de soudage ne doivent pas être interrompus jusqu'à ce qu'une grande partie de la hauteur de la soudure soit remplie.* Lorsque

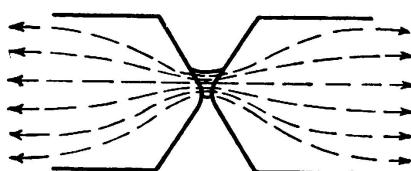


Fig. 20.

Mise en danger des passes situées à la racine par suite de l'effet défavorable des forces.

l'on soude alternativement des deux côtés en retournant les pièces, il faut d'abord terminer la soudure jusqu'à une certaine hauteur. Lors du soudage interne de plaques¹¹ sur tout le pourtour, acier St 52, il est possible d'éviter la formation de fissures en terminant chaque section de la soudure, exécutée par pas, sur toute l'épaisseur (en plusieurs passes), avant d'entreprendre d'autres sections.

On obtient toujours des fissures dans les soudures d'angle dont la passe à la racine est trop mince par rapport à l'épaisseur du matériau de base. Lors du

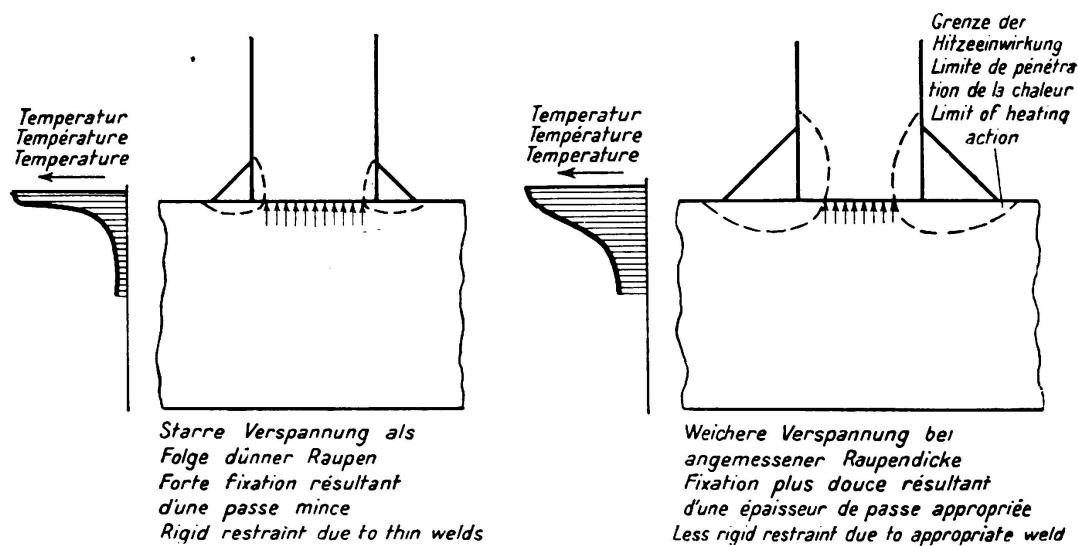


Fig. 21.

Effet de fixation dans les soudures d'angle.

soudage de passes minces la pièce à souder n'est ni chauffée ni rendue plastique sur une profondeur assez grande de telle sorte que l'effet de fixation est très grand (fig. 21).

Dans les pièces épaisses, l'application d'une passe mince peut provoquer un effet de trempe si fort que la zone passée au feu peut se fissurer dans les aciers solides soumis à un état de contrainte à trois axes. On peut aussi observer dans ce cas un écaillage de la passe à partir du métal de base.

¹¹ H. Bühler et W. Lohmann: Beitrag zur Frage der Schweiß-Spannungen. 3. Folge. Eigenspannungen bei der Flickenschweißung. Elektroschweißung 5 (1936), p. 221/229.

L'épaisseur des passes doit être appropriée à l'épaisseur du matériau et non pas trop petite. (A observer aussi dans les soudures d'étanchéité de tôles épaisses.) Les conditions de soudage préliminaire ne doivent pas être trop sévères.

Il est possible de réduire dans une forte proportion les difficultés du genre indiqué, lors de l'exécution des soudures de gorge dans la construction des poutres, par l'emploi de profilés spéciaux tels que les profilés à fourchette (Union) les profilés à bondin (Doernen) et les profilés S. T. (Krupp). L'avantage spécial de tous ces profilés réside dans le fait que les parties lanimées moins massives: fourchette, bondin ou âme introduisent une meilleure conservation de la chaleur et empêchent un refroidissement trop rapide. Afin de réduire le danger de fissuration il faudrait employer ces profilés ou d'autres profilés semblables d'autant plus que l'épaisseur est grande et le métal de base plus résistant.

7^e Mesures spéciales tendant à réduire les contraintes et à éviter le danger de fissuration.

a) Mesures ayant trait à la chaleur.

Des mesures spéciales ayant trait à la chaleur peuvent être employées avant, pendant et après le soudage. Leur but est d'éviter un refroidissement semblable à une trempe, de réduire le danger de fissuration au cours du soudage, de permettre des rapports de contrainte plus uniformes sur la longueur et l'épaisseur de la soudure et d'abaisser les contraintes longitudinales dans les zones de la soudure. Suivant les conditions spéciales l'un ou l'autre de ces points est à prendre en considération de telle sorte que les mesures ayant trait à la chaleur sont à choisir dans chaque cas.

1^e Le chauffage préliminaire est à recommander lorsque les parties sont massives et lorsque les aciers sont résistants, avant la pose de la première passe. La construction métallique devrait faire un emploi plus large qu'actuellement du chauffage préliminaire des arêtes à souder et des surfaces passées au feu. Lorsque les soudures ne sont disposées que d'un côté, par exemple dans la confection des profilés en T, un fort chauffage préliminaire pourrait servir à obtenir un état final sans courbures.

2^e Le chauffage des parties de soudure terminées, au cours des travaux de soudage, pendant que l'on exécute les autres parties de la soudure peut réduire les effets de fixation et par conséquent le danger de fissuration lorsqu'il s'agit de soudures longues et de soudures épaisses.¹² On peut recommander l'établissement d'un champ de température uniforme, dans les soudures longues et continues, par le chauffage subséquent de la partie déjà soudée et avant tout pour les passes à la racine spécialement soumises au danger de fissuration.

Lors de l'exécution des soudures épaisses avec fixation extérieure ou intérieure et spécialement lors de l'exécution des soudures dont les premières passes minces sont soumises au danger de fissuration (fig. 20), il est possible d'empêcher le retrait en maintenant la température, par un chauffage subséquent, jusqu'à ce que soit exécutée une partie plus grande et plus résistante de la hauteur de la soudure. Dans les soudures épaisses il faudrait pouvoir exécuter un chauffage

¹² G. Bierett: Welche Wege weisen die Erkenntnisse über Schrumpfwirkungen den Arbeitsverfahren für die Herstellung von Stumpfnähten im Großstahlbau. Stahlbau 9 (1936), p. 69/71.

subséquent du côté opposé à celui où se trouve le soudeur, afin de réduire les effets de fixation sur l'épaisseur de la soudure. Cette mesure qui cependant paraît très avantageuse n'a été que très peu employée jusqu'à maintenant.

Le chauffage des zones voisines de la soudure durant la soudage peut être employé lorsque l'on a affaire à de forts effets de fixation.

Ces mesures ayant trait à la chaleur servent à réduire le danger de fissuration durant les travaux de soudage. Il ne faut pas s'attendre cependant à ce que les contraintes transversales moyennes qui subsistent, soient plus petites que lorsque l'on n'emploie aucune chaleur additionnelle, c'est plutôt le contraire qui se produit. Comme réactif on peut faire appel à des mesures mécaniques avant tout au martelage (paragraphe 7 b).

3^o Le *chauffage subséquent* peut être employé pour égaliser des contraintes fortement irrégulières à l'intérieur de la longueur de la soudure et sur l'épaisseur de la soudure ou pour réduire fortement les contraintes longitudinales dans la soudure. Lorsqu'il existe une fixation extérieure ou des conditions à effet analogue (cas du soudage interne, par exemple pour réparation), on ne peut pas compter sur une réduction des contraintes transversales moyennes. On peut réaliser une égalisation vraiment favorable de contraintes fortement inégales, en chauffant jusqu'à l'apparition du rouge sombre.¹³

Le chauffage subséquent par bandes des zones de la soudure peut, pour des températures appropriées (550 à 600°C) fortement réduire les contraintes longitudinales de la soudure.¹⁴ Ce procédé est employé dans le soudage des très gros tuyaux.¹⁵ De si forts chauffages peuvent cependant entraîner de grandes paraclases, de telle sorte que ces travaux doivent être exécutés avec la plus grande prudence.

En général, l'emploi intelligent de la chaleur peut améliorer les pièces soudées. Cependant l'emploi systématique de la chaleur doit être basé sur des connaissances techniques.

Il faut faire attention aux mesures destinées à accélérer le refroidissement ou à maintenir artificiellement une basse température des parties à souder. Ces mesures servent à éviter les gondolages et les paraclases mais dans la règle elles relèvent les contraintes. *La chaleur doit être évacuée du cordon de soudure par les pièces à assembler, sans moyen artificiel.* (Des cas spéciaux dans lesquelles une fois peut être un refroidissement artificiel a eu de bons résultats et a pu être exécuté sans détérioration, se présentent presque pas en construction métallique).

b) *Le martelage.*

On martèle les soudures ou les zones qui voisinent la soudure. Le martelage peut se faire soit au rouge, soit à froid.

Le martelage de la soudure au rouge exige un métal d'apport forgeable. Il ne fut presque employé jusqu'à ce jour que lors d'un soudage autogène mais il est

¹³ G. Bierett et G. Grünig: Schrumpfspannungen in autogen geschweißten Teilen. Autogene Metallbearbeitung 27 (1934), p. 259/266.

¹⁴ Evel et Reinhardt: Spannungsmessungen an geschweißten Rundnähten. Autogene Metallbearbeitung 27 (1934), p. 305/310.

¹⁵ R. Schmidt: Einige Bemerkungen zur Frage der Wärmenachbehandlung großer geschweißter Werkstücke. Elektroschweißung 6 (1935), p. 231/232.

aujourd'hui appliqué aussi pour les soudures bout à bout soudées électriquement. Son but n'est pas de réduire les contraintes mais de rendre la soudure plus compacte; on l'emploie pour le redressement. *Le martelage au rouge* des zones voisines de la soudure facilite un soudage sans fissuration lorsque l'on a une forte fixation; ce procédé n'est que peu employé en construction métallique.

Le martelage à froid d'une soudure exige avant tout un métal d'apport approprié dans lequel le martelage ne produise pas la moindre fissure et qui ne devienne pas cassant. Le martelage sert à réduire les contraintes résiduelles. Par le martelage de la soudure les contraintes longitudinales et transversales sont réduites; par le martelage des zones voisines de la soudure, vraisemblablement seules les contraintes transversales sont diminuées. Dans les soudures épaisses on prévoit souvent des martelages intermédiaires des différentes passes pour réduire les sur-contraintes et les gondolages. De la façon la plus appropriée, cela se fait en perçant des joints au milieu de la soudure, sur toute la longueur de cette dernière.

Le martelage exige aussi des connaissances techniques spéciales sur le matériau.

Résumé.

Les phénomènes qui se produisent lors du refroidissement des zones de la soudure peuvent conduire à la fissuration, lorsque les matériaux ont une certaine composition et lorsque les vitesses de refroidissement sont défavorables. Les métaux de base et les baguettes à souder pour la construction métallique doivent par conséquent être choisis en partant du point de vue de l'élimination du danger de fissuration. De même il faut écarter les baguettes qui fondent en développant une trop grande chaleur.

Le métal d'apport se rétrécit uniformément dans toutes les directions lorsque la possibilité de mouvement est complètement sans entrave. En réalité cette possibilité de mouvement n'existe que dans le sens transversal, et même seulement dans les soudures bout à bout exécutées dans un temps très court. La grandeur du retrait transversal dépend de la grandeur de la section du cordon de soudure et de l'emploi spécifique de chaleur de la baguette qui, par conséquent, doit rester aussi limité que possible. A côté du retrait transversal, il se produit encore dans les soudures épaisses un retrait angulaire. Le retrait longitudinal est toujours plus faible que le retrait transversal car aussi bien l'allongement des zones chauffées que les retraits dans cette direction sont entravés par les zones voisines plus froides. Cette entrave engendre de fortes contraintes longitudinales, dont la grandeur et l'allure des deux côtés de la soudure dépend de la largeur de la zone chauffée. Les contraintes longitudinales ont toujours pour des raisons d'équilibre, des contraintes transversales comme conséquence.

Les contraintes de retrait longitudinal ont une importance toute spéciale pour les longues soudures continues dans la direction de la force principale. Comme les contraintes longitudinales dans la soudure sont très grandes on peut recommander d'éviter, dans les soudures sollicitées aussi à la traction, des zones chauffées trop étroites qui engendrent de fortes contraintes dans la soudure.

Lors de l'exécution des soudures il se produit presque toujours de plus ou moins grandes fixations. Il faut distinguer entre les fixations extérieures et les fixations intérieures.

Une des conditions les plus importantes pour la réduction des fixations extérieures et intérieures est de maintenir faible la section de la soudure et d'éviter l'emploi des baguettes qui exigent une quantité de chaleur spécifique inutilement grande. Les fixations de genre extérieur seront réduites de la façon la plus sûre par une mise en forme élastique des parties immédiatement voisines de la soudure et par une suite appropriée d'exécution des différentes soudures. Il est possible de lutter contre les fixations intérieures d'une soudure sur sa longueur et sa hauteur par de grandes vitesses de soudage, par la succession à adopter et par l'élimination d'un trop grand nombre de passes. Le soudage à pas est avantageux pour les longues soudures, principalement pour l'exécution de la passe à la racine qui est très exposée au danger de fissuration. Les fixations suivant la hauteur de la soudure peuvent être diminuées par une forme symétrique du joint de soudure, par un soudage alterné des passes des deux côtés et par la limitation du nombre de passes.

Les rapports des contraintes de soudage dans les soudures d'angle sont sensiblement plus défavorables que dans les soudures bout à bout. Les soudures d'angle sont en général très exposées au danger de fissuration.

Les fissures se produisent dans la règle à l'état chaud et lors du refroidissement dans les zones de température à capacité de déformation restreinte (zone de rupture au bleu). L'explication du danger de fissuration et les mesures propres à le combattre doivent par conséquent principalement reposer sur les processus et les propriétés du métal d'apport aux hautes températures. L'extensibilité qui existe dans un état de tension à un axe ne peut servir de mesure pour l'appréciation du danger de fissuration. Il est absolument nécessaire de prévoir des essais appropriés pour la détermination du danger de fissuration. La forme de la section de la soudure possède aussi une signification pour la sécurité à la fissuration. Les soudures à concavité prononcée se fissurent facilement par rapport aux soudures à section à peu près triangulaire. Des passes trop minces par rapport à l'épaisseur du métal de base, principalement à la racine, entraînent facilement des fissures. L'épaisseur des passes doit être par conséquent adaptée à l'épaisseur du métal de base.

Les mesures spéciales, avant, pendant et après le soudage ont pour but d'éviter un refroidissement assimilable à une trempe, de réduire le danger de fissuration durant le soudage, d'introduire une répartition régulière des contraintes sur la longueur et l'épaisseur de la soudure et de diminuer les contraintes longitudinales dans les zones de la soudure.

Le martelage à froid de la soudure exige un métal d'apport qui ne présente aucune fissure, même de l'épaisseur d'un cheveu, et qui ne devienne pas cassant sous l'effet du martelage. Il sert à réduire les contraintes résiduelles.

Leere Seite
Blank page
Page vide