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

Band: 2 (1936)

Rubrik: IIIb. Disposition et exécution de constructions soudées en tenant spécialement compte des contraintes dues aux variations de la température

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: 08.08.2025

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

III b

Disposition et exécution de constructions soudées en tenant spécialement compte des contraintes dues aux variations de la température.

Berücksichtigung der Wärmespannungen bei der baulichen Durchbildung und Herstellung geschweißter Konstruktionen.

Design and execution of welds with special consideration of thermal stresses.

Leere Seite
Blank page
Page vide

IIIb 1

Influence du soudage sur les efforts internes.

Einfluß des Schweißens auf die inneren Spannungen.

The Influence of Welding on Internal Stresses.

R. Sarazin,
Ingénieur Soudeur, Neuilly-s.-Seine.

Les efforts introduits par la soudure des pièces d'acier sont complexes, se produisant dans deux directions, ils déterminent des efforts secondaires dans le métal adjacent au joint soudé qui sont assez difficilement contrôlables.

Pendant longtemps, on a pensé que la mesure du retrait du métal déposé par la soudure donnait une idée assez exacte de la valeur des efforts introduits par la contraction qui se produit au moment du passage du métal en fusion de l'état plastique à l'état cristallin, pour arriver enfin à l'état définitif correspondant à la température ambiante.

Le retrait d'un joint soudé à l'arc se traduit par une contraction transversale et par une contraction longitudinale; il est difficile de faire la part des efforts dûs à la contraction du métal déposé par la soudure et des efforts dûs à l'échauffement des tôles ou fers soudés, ceux-ci ayant été élevés à une température voisine du point de fusion et ramenés, plus ou moins lentement, à la température ambiante.

Nous ferons, dans la présente étude, une tentative de discrimination entre ces deux sortes de phénomènes pour un cas simple qui représente le dépôt d'un cordon de métal sur un large plat.

Quand on exécute une soudure de tôles ou de pièces d'acier bord à bord, il se produit une contraction telle dans le joint que le métal avoisinant les tôles peut dépasser la limite élastique et produire un allongement permanent.

Dans ces conditions, si l'on se borne à mesurer le retrait consécutif à la soudure par rapport à deux repères placés symétriquement par rapport à l'axe du joint, on voit que l'on peut faire une erreur grossière si l'on désire retrouver, par exemple par martelage, l'écartement primitif entre les repères, ainsi que nous avons eu la possibilité de le démontrer dans une communication au Congrès de la Soudure Autogène à Rome en 1934; le martelage ainsi conduit peut déterminer un défaut plus grave que le mal, l'écrouissage du métal déposé pouvant être exagéré et poussé bien au-delà des limites utiles.

L'examen d'une structure soudée doit, obligatoirement, porter sur la vérification de la tôle ou des fers avoisinant la soudure et, depuis environ 5 ans, nous avons développé une méthode de repérage que nous avons perfectionnée dans le sens d'une simplification de plus en plus grande.

1°) — *Méthode de repérage des structures.* —

Cette méthode de repérage a fait l'objet d'une description au Congrès de Rome de soudure, et nous nous bornerons à en donner une description succincte, en priant le lecteur de bien vouloir se reporter à ce précédent rapport s'il désire des renseignements complémentaires.

Au cours des nombreux essais que nous avons été amenés à faire pour vérifier les retraits dans les constructions soudées, nous avons pu établir que les efforts internes résultant de ces retraits n'étaient pas répartis également dans les tôles, mais qu'ils comportaient une répartition variable, l'effort étant à peu près constant à une certaine distance du joint et commençant à croître à environ 30 ou 40 cm, pour devenir maximum au contact avec le métal déposé.

Il était curieux de constater que, dans certains cas, on assistait au cours de la soudure à l'établissement progressif de cette tension interne, et à une variation du taux de l'extension pouvant déterminer, au voisinage du joint, un renversement de l'effort, une compression se substituant à l'extension. Dans la plupart des cas, les dernières passes de soudure supprimaient cette compression en mettant l'ensemble de la structure en extension.

Nous avons pensé que ce passage d'une extension à une compression, et ensuite à une extension au voisinage du joint, s'expliquait par le fait que la contraction transversale se composait avec la contraction longitudinale et que la résultante déterminait des variations très sensibles du taux des efforts internes.

Nous verrons plus loin, à l'examen de la soudure de larges plats bord à bord, comment se comportent deux bandes soudées, et quelle est la répartition des efforts internes dans le voisinage du joint.

Nous avons préconisé, comme suite à ces études, de repérer les tôles à souder et de vérifier le déplacement des repères au fur et à mesure de la progression de l'opération de soudure; ces repères sont délicats à établir, et il est extrêmement difficile de faire des mesures au millième en retrouvant constamment les mêmes valeurs.

2°) — *Description du tensiomètre R. Sarazin.* —

Cette difficulté a été résolue grâce à notre nouvelle méthode de repérage qui comporte des jalons rapprochés, à l'emploi d'un appareil que nous appelons «Tensiomètre» et à l'utilisation d'un système d'empreintes bien particulier.

Nous proposons de munir l'agent chargé de vérifier la structure d'un poinçon donnant un intervalle déterminé et permettant de placer, d'une manière certaine, les variations à lire dans le cadre des lectures permises par l'appareil. En effet, il va de soi qu'un appareil très sensible ne peut pas avoir des graduations extrêmement étendues, et ce poinçon permet de placer les repères à une certaine distance suffisamment constante, à 1 ou au maximum 2/10ème de millimètre près. Nous avons choisi pour nos essais un écart de 25 mm entre repères.

Après avoir fait de nombreux essais, nous nous sommes fixés sur un système d'empreintes qui permet d'obtenir des lectures absolument précises, et qui consiste dans le perçage de petits trous de 2,5 mm de diamètre et 1,5 mm de profondeur, dans les trous des pointeaux produits par le poinçon; sur ces trous, nous venons placer une empreinte de billes d'un diamètre de 3 mm, la bille

imprime sur le bord du trou un siège sphérique, et les touches de contact du tensiomètre étant munies elles-mêmes de billes, on voit que le déplacement des repères n'introduira pas d'erreur sensible, du fait que la sphéricité du portage sera sensiblement conservée pendant toute la période élastique.

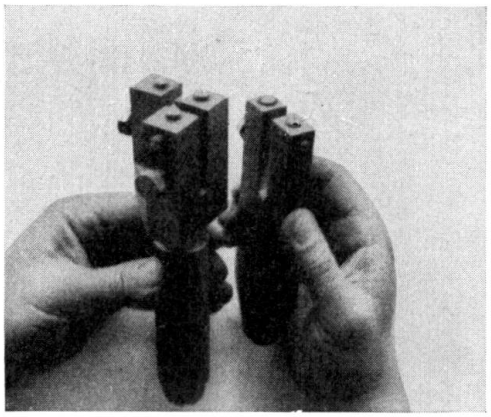


Fig. 1.
Poinçons à écart réglable permettant de pointer des repères suivant une ou deux directions.

Le tensiomètre est lui-même constitué par une branche fixe, solidaire d'un boitier, et portant un comparateur spécial; une branche mobile pivotée autour d'un point fixe forme un bras de levier démultiplié et appuie sur la touche du comparateur. L'appareil donne des lectures précises, chaque division du comparateur correspond à un millième de millimètre et avec un peu d'habitude, on peut faire avec certitude des lectures au millième près.

L'intervalle entre les repères a été choisi de 25 mm, soit un taux de travail ou d'effort interne de 0 k. 800 par mm² pour une déviation correspondant à une *division*.

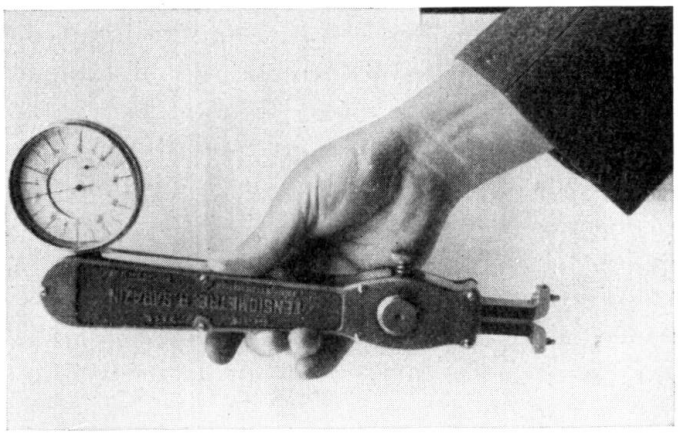


Fig. 2.
Tensiomètre R. Sarazin tenu en main par l'opérateur.

On voit que l'appareil et la méthode de mesure sont donc sensibles à une variation de l'effort de 1 kg/mm² ou, au maximum 2 kgs/mm² près, dans l'acier.

La photographie ci-contre représente le tensiomètre tenu à la main pour la mesure des repères des tôles, l'appareil pèse à peine 1 Kg, se tient bien en main dans toutes les positions et permet de prendre des mesures dans les endroits les plus difficilement accessibles. Il a été prévu avec son comparateur déporté, de telle façon que l'on puisse, sans difficulté, se rapprocher d'une paroi verticale et faire en sorte que le premier repère soit à 15 mm de la base de cette paroi,

ainsi que celà serait le cas, par exemple, dans l'angle rentrant des poutres en U ou en I.

Nous examinerons ci-après différents cas ou le tensiomètre a permis de faire des mesures des efforts internes introduits par le retrait de la soudure, pour vérifier quels sont les phénomènes nouveaux introduits, par l'exécution d'un joint, dans le voisinage des tôles soudées.

3º) — *Mesures effectuées sur un large plat après déposition d'un cordon de métal par soudure.* —

Le dessin ci-contre présente la modalité la plus simple de l'exécution d'une soudure à l'arc, c'est-à-dire le dépôt d'un cordon sur une tôle ou un large plat. On voit que la méthode de repérage avec l'emploi du tensiomètre a permis de faire des constatations très intéressantes.

La planche I, montre que sur un large plat en tôle de 10 mm, l'exécution d'un cordon de soudure détermine un retrait dans le sens longitudinal qui atteint une valeur moyenne de 50 millièmes de millimètre, sur 25 mm d'écartement de repère, soit, pour des tôles d'acier doux de 40 kgs, un dépassement très net de la limite élastique.

Ce retrait longitudinal détermine une contraction dirigée dans le même sens et suivant une ligne parallèle au joint et à 25 mm de celui-ci, de 20 à 25 millièmes de mm, soit un effort local d'environ 8 kgs/mm². Transversalement, la contraction mesurée est en moyenne d'environ 280 millièmes de millimètre, soit un dépassement notable de la limite élastique, et il est évident que, dans le cas d'une tôle d'assez grande longueur, cette contraction importante met sous extension les parties au voisinage du cordon.

Nous avons décidé de représenter ces diverses valeurs sous forme d'une courbe (courbe A) planche I, qui montre les déformations transversales, et nous avons également représenté une courbe des déformations longitudinales (courbe C).

Nous avons remarqué que, dans une tôle de 10 mm, les efforts internes mesurés au dos sont du même sens, mais d'une valeur moindre que ceux mesurés sur la face avant; on peut donc dire, avec certitude, que le phénomène se transmet dans toute la masse du métal en s'amortissant au fur et à mesure de l'épaisseur du fer soudé.

Nous avons désiré observer le même phénomène sur une tôle de 20 mm pour voir s'il en était bien ainsi, et nous avons constaté qu'il existait une zône intérieure neutre car les efforts s'inversaient sur la paroi opposée à la lôle du côté ou était effectué le cordon.

La courbe B représente les variations transversales en millièmes de millimètre, c'est-à-dire la différence entre la valeur lue entre repères, avant soudure, et la valeur observée après exécution de deux cordons normaux se recouvrant, effectués avec une électrode de 4 mm de diamètre et une intensité de 140/150 ampères.

L'échantillon soudé est resté sensiblement plan, et d'ailleurs, l'examen des variations montre bien qu'à côté d'une extension, nous avons une compression, ce qui suppose un état approximatif d'équilibre.

On voit que, sur la face avant du côté du cordon, il se produit une compression très violente de part et d'autre du dépôt de métal et qui fait dépasser, à une

couche de métal assez épaisse, la limite élastique, tandis que, localement, de l'autre côté du joint, il se produit une extension très importante; les courbes représentent les valeurs locales des efforts internes.

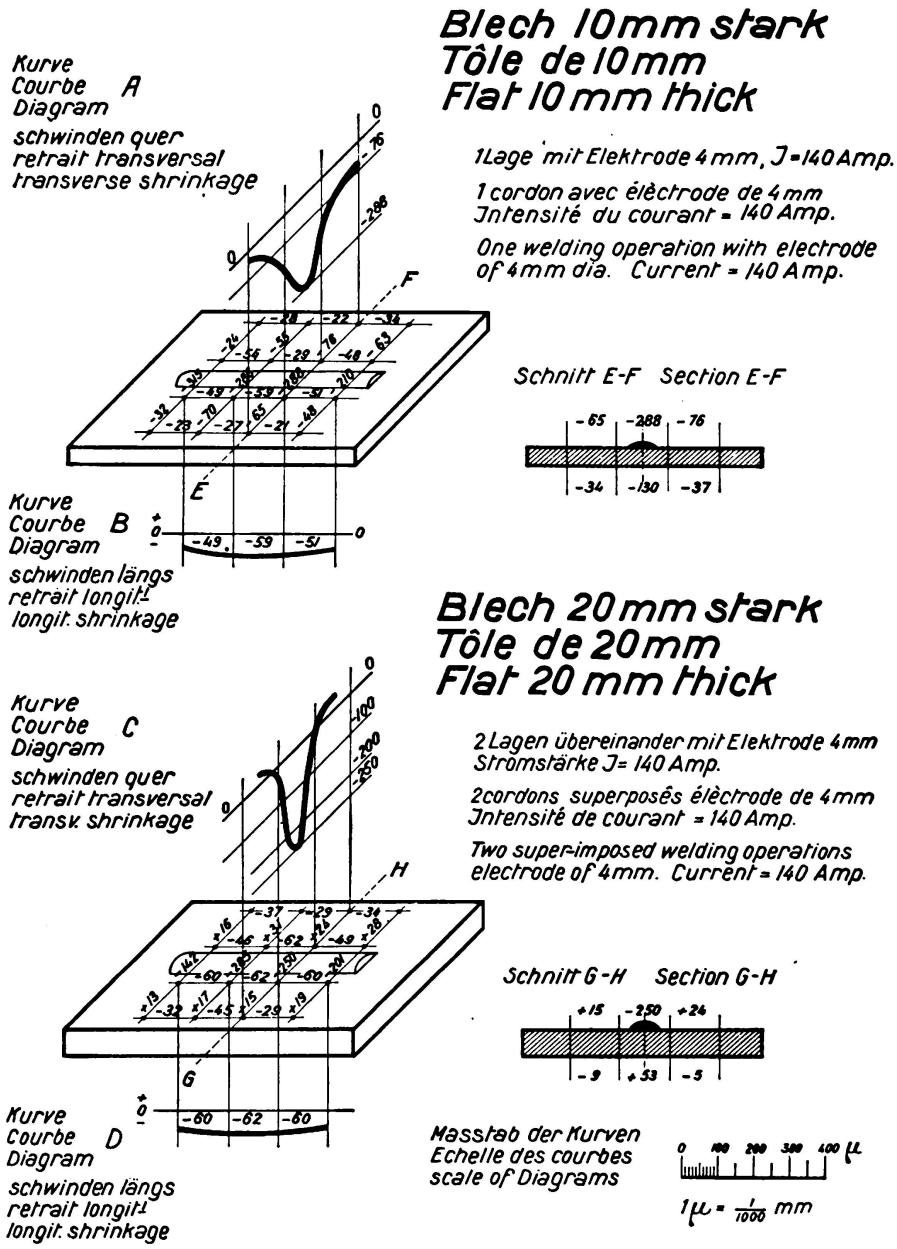


Planche I.

Il est certain que les phénomènes que nous mettons en évidence, en déposant un cordon de métal, sont dûs, pour une part, à l'échauffement local des tôles à une température de l'ordre de 1.000 à 1.200º et ensuite à un refroidissement, qui se traduisent par une contraction; les deux contractions déterminent le taux de compression totale.

Les essais suivants montrent pour quelle part chacun des deux phénomènes intervient pour l'établissement des efforts internes.

4º) — *Mesures du retrait sur des échantillons soumis à la chaleur de l'arc. Sans qu'il soit effectué de dépôt de métal.* —

Sur un échantillon de tôle de 10 mm, exactement semblable à celui précédement utilisé, nous avons fait un apport de chaleur localisé au moyen d'un arc au crayon de graphite, présentant la plus parfaite régularité puisque effectué à la machine automatique, et pour une même longueur que le cordon précédemment déposé.

En opérant de cette façon, nous pensons avoir placé l'échantillon dans les mêmes conditions que dans le cas d'un cordon de métal en faisant seulement apparaitre l'échauffement de la tôle et en supprimant la contraction propre au métal apporté par l'électrode.

Afin de tenir compte de la quantité de chaleur utilisée pour fondre l'électrode elle-même, nous avons ramené l'intensité du courant dans l'arc de 140 à 100 ampères, utilisé un crayon de graphite de 6 mm, et fait une passe à la même vitesse que pour l'utilisation normale d'une électrode de 4 mm.

Les résultats sont condensés sur la planche II qui montre que le retrait longitudinal est de l'ordre de 15 à 25 millièmes de millimètre, au lieu de 50 millièmes précédemment trouvés et le retrait transversal moyen est de 200 millièmes contre une valeur de 280 millièmes pour l'échantillon effectué avec un cordon de métal effectivement déposé par l'arc.

Ces chiffres indiquent donc que le retrait des tôles pour un échantillon de 10 mm d'épaisseur représente une grande partie du retrait total quand il s'agit d'un cordon de métal déposé directement sur les tôles.

Pour un échantillon de 20 mm, nous avons effectué deux passes dans les mêmes conditions qu'il est indiqué précédemment et nous avons pu constater que le retrait transversal moyen était de 215 millièmes au lieu de 250 pour l'échantillon de même épaisseur de la planche I et sur lequel on a déposé deux cordons de métal; le retrait longitudinal n'a été que de 15 à 20 millièmes au lieu de 50 à 60 millièmes pour l'échantillon correspondant.

Au dos de la tôle on trouve une extension au centre et un peu plus loin une légère compression.

En résumé on peut dire que dans un cordon déposé à plat, l'apport de métal contribue pour environ 30 % des déformations, l'échauffement de la tôle soudée et refroidie représente la cause principale, cette affirmation devra être vérifiée et n'est valable que pour ce cas particulier.

5°) — *Vérification du retrait dans le cas d'une soudure circulaire, dite soudure «en bouchon» ou «en faux rivet».*

Pour effectuer cette éprouvette, nous avons choisi deux échantillons d'acier de tôles de 10 mm et, au centre d'une des éprouvettes, nous avons perçé un trou conique de 22 mm à la base, et 30 mm à la partie supérieure, ce trou étant fraisé spécialement pour permettre une bonne attaque de l'arc sur la tôle inférieure; la soudure a été effectuée d'abord avec une électrode de 3 mm, et ensuite avec une électrode de 4 mm, jusqu'à ce que le trou soit comblé.

Ce type de soudure du modèle «en bouchon» ou dite «en faux-rivet» est d'une exécution assez délicate et peut donner beaucoup de mécomptes; cependant, il

était intéressant de vérifier comment elle se comportait du point de vue du retrait, et voir si l'axe des efforts internes était bien dirigé suivant des rayons convergeant tous vers le centre du trou.

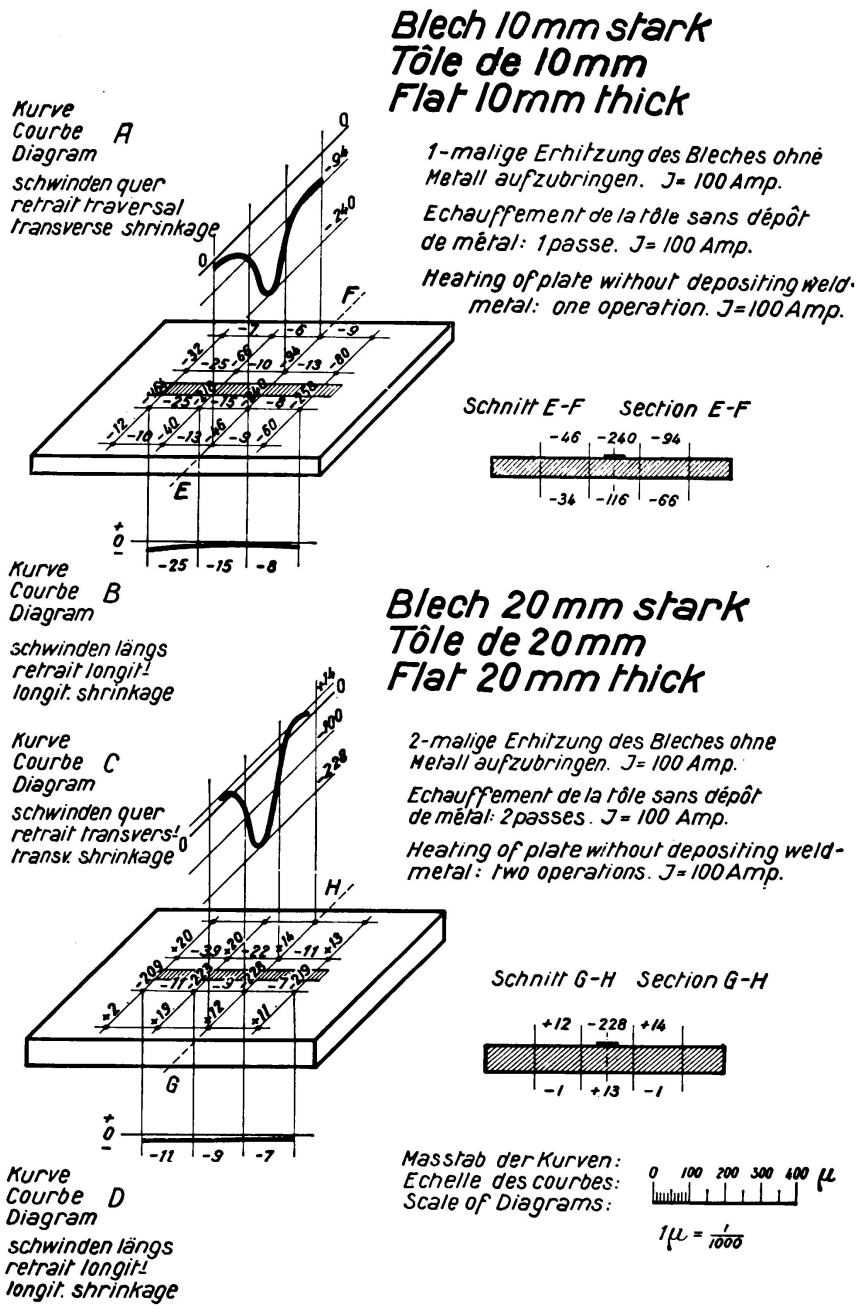


Planche II.

A cette fin, on a repéré la partie supérieure de la tôle, ainsi qu'il est indiqué ci-contre et également l'envers de l'assemblage; les courbes données sur la planche III permettent de vérifier les résultats.

Les lectures effectuées au tensiomètre *R. Sarazin* ont permis de donner avec précision les résultats suivants:

— sur la face *avant* les déformations ont lieu en extension et rayonnent vers le centre du trou, les valeurs trouvées comprises entre 80 et 100/1000° sont concordantes.

— Au dos de l'échantillon les repères indiquent au centre une compression de 7/1000 et la plupart des repères voisins montrent une extension de 25 à 30/1000; certains repères au contraire accusent une compression notable (voir courbes A et B) planche III.

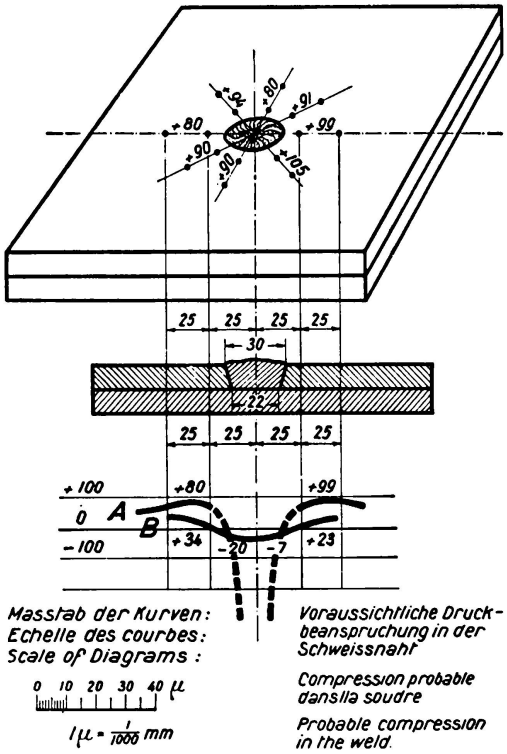


Planche III.

Soudure en bouchon ou faux rivet.
Courbe A: Mesures prises entre repères sur l'endroit.
Courbe B: Mesures prises entre repères au dos de la tôle.

6°) — *Soudure de deux plats bord à bord* (planche IV).

La soudure de deux plats bord à bord fait apparaitre des phénomènes très curieux, en ce sens que les efforts internes sont distribués de façons différentes, suivant la relation qui existe entre l'épaisseur de l'échantillon, et la largeur de celui-ci.

La contraction longitudinale, en effet, se compose avec la contraction transversale du joint et en suivant l'ordre des passes, on se trouve en présence de résultats très caractéristiques.

Dans le cas de plats de 8 mm et de 250 mm de large, nous avons observé, suivant que les fers sont libres ou bridés, une variation très nette des efforts internes et de la distribution de ceux-ci.

La courbe de la planche IV montre la distribution des efforts pour des tôles libres et l'on voit qu'à 25 mm du joint, suivant un axe perpendiculaire au joint, on peut compter sur une extension maximum d'environ 20 à 24 kgs. La première passe détermine une extension de valeur croissante au voisinage du joint et la valeur maximum est atteinte près du cordon de métal.

Pour la deuxième passe, l'extension croit et la courbe tend à s'infléchir au voisinage du joint, nous avons remarqué que ceci était dû, sans doute, à la contraction longitudinale qui avait tendance à libérer en partie les efforts d'extension, par suite d'une composition avec ceux-ci.

La troisième passe modifie l'infléchissement de la courbe, et celle-ci s'établit uniquement en valeur croissante.

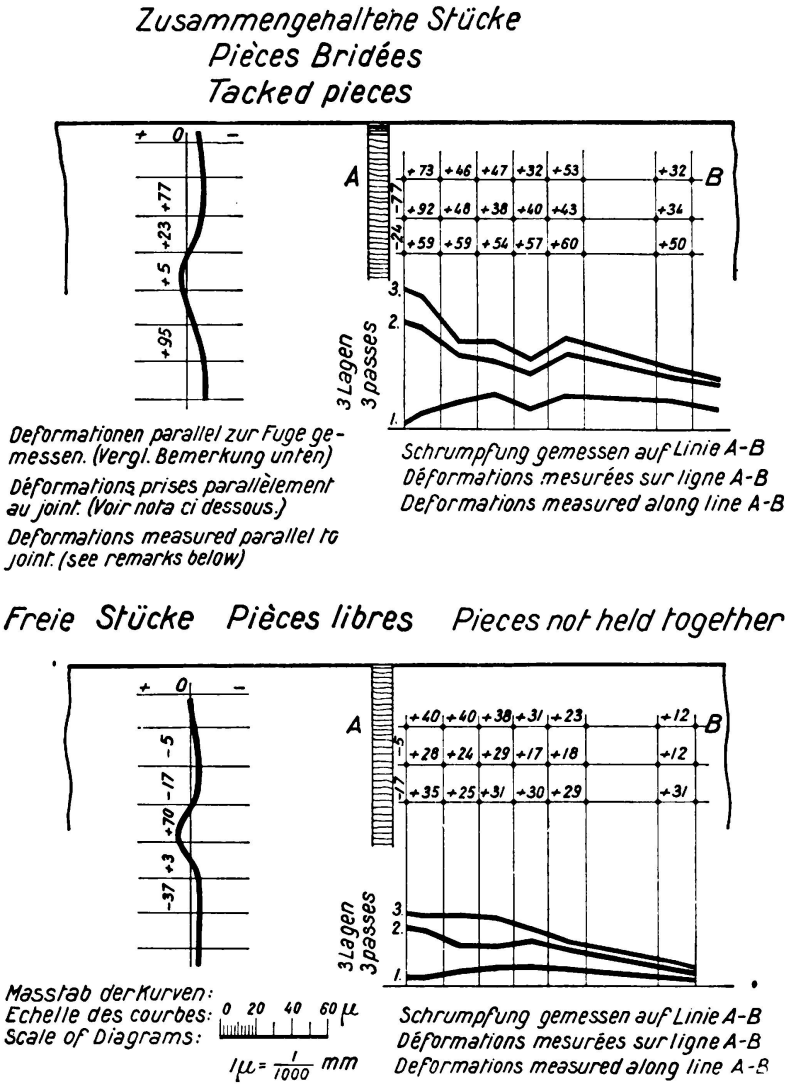


Planche IV.

Soudure bord à bord de 2 larges plats de 8 mm · 250 mm.
Note: le passage de compression en extension peut s'expliquer par la faible largeur des échantillons soudés.

En résumé, on peut dire que, dans un large plat de 8 mm, à une petite distance du joint, environ 200 mm d'un joint en soudure libre, l'extension générale est d'environ 8 kgs/mm^2; à 100 mm, l'extension moyenne est d'environ 10 kgs/mm^2 et à 25 mm du joint, l'extension maximum est atteinte, environ 20 kgs/mm^2.

Sur les mêmes échantillons bridés, c'est-à-dire soudés aux extrémités sur un grand marbre, et de telle façon qu'ils ne soient susceptibles d'aucun déplacement, les valeurs sont beaucoup plus élevées; à 200 mm, l'extension générale est d'environ 10 à 12 kgs/mm^2; à 100 mm, l'extension moyenne correspond à un effort de 20 kgs environ, et à 25 mm du joint, l'effort interne maximum est de 30 à 35 kgs; la limite élastique est dépassée pour les aciers doux normaux.

La déformation longitudinale relevée sur une ligne parallèle au joint et à faible distance de celui-ci montre souvent quelques incohérences que nous nous efforcerons de faire mieux apparaitre dans l'avenir, nous avons constaté en effet que la déformation se traduisait en certains points par une compression et en des points voisins par une extension; il sera intéressant de déterminer la raison de ces variations car nous avons trouvé une contraction sinon uniforme, mais approximativement régulière pour des échantillons plus épais.

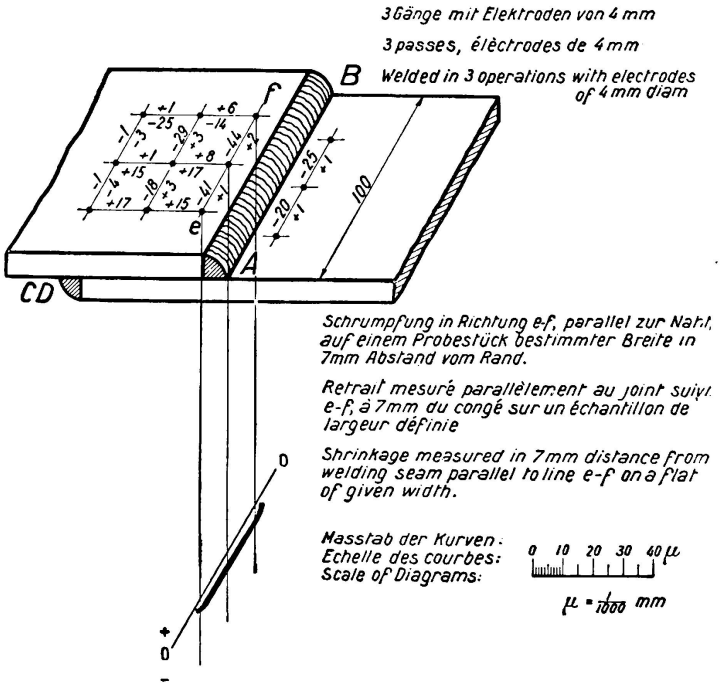


Planche V.

Soudure en recouvrement.
2 larges plats de 10 mm d'épaisseur.
Note: Le 1er chiffre entre repère représente la variation lue après soudure AB.
Le 2er chiffre est à extraire ou à ajouter au premier pour déterminer l'état final.

7°) — *Soudure de deux plats à recouvrement* (planche V).

Ce type de joint appelé «à recouvrement» ou «à clin» reproduit le joint rivé, il a été employé au début du développement de la soudure pour l'assemblage des structures destinées à la construction navale en particulier et il trouve son emploi dans quelques cas de soudure de charpentes.

Ce joint n'est pas toujours avantageux car il fait travailler la soudure au cisaillement transversal et d'autre part il impose un dépôt de métal important qui le rend peu économique.

Cependant il est intéressant de voir comment les éléments soudés se comportent et nous avons effectué la soudure de deux larges plats de 10 mm d'épaisseur, qui avaient été repérée préalablement, ainsi que nous l'avons fait précédemment: la planche V représente l'échantillon soudé et entre chaque couple de repères nous avons porté deux valeurs: la première est celle qui a été lue après avoir effectué la soudure A-B en trois passes avec électrodes de 4 mm, intensité du courant 140 ampères.

Les valeurs relevées après cette première soudure ont montré que le recouvrement de la ligne de joint était assez important pour déterminer une compression d'environ 40/1000° de millimètre sur le bord de l'échantillon de gauche et une compression d'environ 20/1000° de millimètre au travers de l'échantillon de droite.

On remarquera que ces deux compressions ont ajouté à l'extension que l'on trouve suivant une ligne perpendiculaire au joint, cette extension étant dûe pour une part à la contraction transversale du joint et pour une autre part à la contraction longitudinale du métal déposé. En effet, cette dernière contraction en raccourcissant transversalement le fer détermine un allongement dans le voisinage immédiat.

Après que l'on a eu effectué la soudure A-B on a retourné la pièce pour faire la soudure C-D dans les mêmes conditions que pour la première et nous avons fait de nouvelles mesures sur les repères qui ont fait l'objet de nos lectures précédentes.

Nous avons noté une nouvelle variation qui a modifié légèrement les premières lectures. On notera que cette nouvelle variation doit être ajoutée arithmétiquement avec la valeur déjà existante pour donner l'état final du joint après soudure.

Les mesures que nous avons faites sur une ligne parallèle au joint ont montré que la compression était assez régulière, ainsi qu'il est représenté par la courbe (planche V).

8°) — *Soudure de deux plats en congé* (planche VI).

La planche VI montre ce cas particulier qui est celui le plus généralement rencontré en construction de charpentes, il était intéressant de vérifier comment sont distribués les efforts sur les différents éléments.

A cet effet on a repéré la semelle inférieure sur la face avant et sur la face arrière et le même repérage a été aussi effectué sur le fer plat formant l'aile et sur ses deux faces, les repères ont été espacés régulièrement de 25 mm grâce aux poinçons spéciaux.

Le tensiomètre étant déporté par rapport à sa base, il a été possible d'approcher les repères à 15 mm de l'angle, soit à 5 mm du bord de la soudure. Les mesures ont été de ce fait d'autant plus caractéristiques. D'une manière générale, il n'apparait pas que ce type de joint, donne de grosses déformations dans l'aile et sur la partie supérieure de la semelle, par contre le dos de la semelle, c'est-à-dire la partie opposée à la soudure montre une très forte extension qui se remarque d'ailleurs par une tendance à la flexion de la semelle.

Les angles qui contiennent la soudure ont tendance à se fermer, mais pour des pièces rigides cet inconvénient ne se produit pas.

En examinant les valeurs lues sur le plat de la semelle et sur l'aile, on voit que la contraction n'est pas aussi forte sur cette dernière, il faudra faire de nombreux essais en variant l'épaisseur des fers pour en déterminer la cause.

9°) — *Utilisation du tensiomètre en vue de la détermination des efforts internes dans une structure soudée.* —

D'après les indications que nous avons exposées on pourrait croire que la vérification des efforts internes d'une structure oblige à un repérage très important et très coûteux. Il n'en est pas ainsi car pour l'utilisation industrielle on ne se trouve pas placé dans l'obligation de faire de nombreux repères et d'après

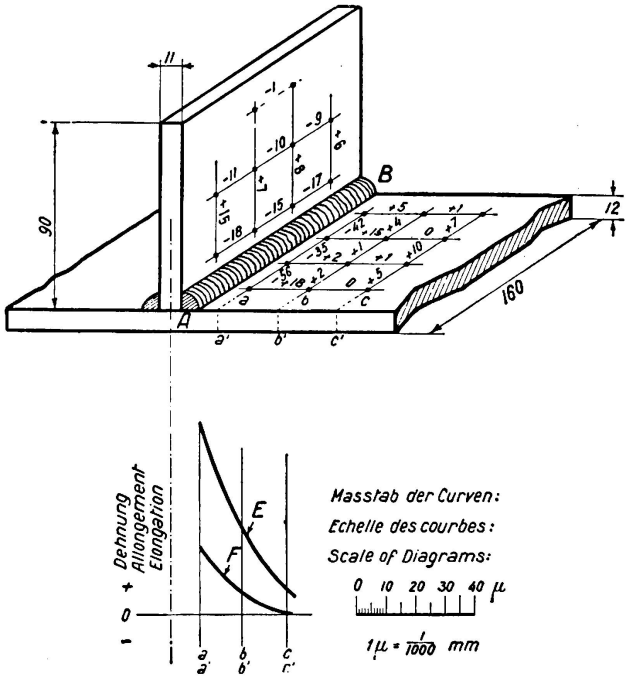


Planche VI.

Soudure en congé.
3 passes, électrodes de 4 mm — I = 140 amp. Les soudures A B et C D ont été conduites alternativement.
Note: La semelle a été repèrée par dessus et au dos et les courbes E et F montrent l'importance perpendiculairement à A B, relevées au dos de la semelle. F déformations mesurées perpendiculairement à A B relevées sur la semelle.

l'expérience que nous avons de l'emploi de l'appareil, il suffit de 3 ou 4 empreintes du poinçon à 3 directions, réparties le long de la ligne de joint pour donner 12 repères, donc 12 mesures qui suffisent largement pour déterminer l'ordre de grandeur du phénomène.

En pratique, pour la détermination des efforts internes, il ne sera pas nécessaire de faire des empreintes à l'endroit et à l'envers des fers soudés, car nous avons vu que si ces fers sont d'une épaisseur inférieure à 10 mm, les déformations seront inférieures à la moitié de celles lues sur le coté ou l'on fait la soudure, et que si les tôles ont plus de 20 mm d'épaisseur, ces déformations pourrront être inverses, mais leur valeur sera très faible.

L'emploi du tensiomètre en cours de soudure d'une structure permettra d'éviter les ennuis qui découlent du raccourcissement d'une ligne de joint, surtout quand celle-ci est longue, car elle peut conduire à une dimingution de 1 mm par mètre, soit pour une poutre d'un pont de 10 mètres à un raccourcissement de 10 mm à certains endroits, ce qui peut être préjudiciable au montage ou à la bonne répartition des charges.

La surveillance des efforts internes en cours de construction évitera de mettre la structure dans des conditions différentes en certains endroits par rapport à d'autres qui travaillent de la même façon et par exemple dans une structure symétrique nous pensons que grâce à cette méthode on devrait pouvoir laisser la structure soudée dans un état tel que les retraits seraient judicieusement partagés.

Il est bien évident que pour le calcul des tensions internes apportées par la soudure on devra tenir compte seulement des déformations élastiques, il est facile de calculer ces tensions d'après la formule de Young.

En résumé, on peut dire que la structure soudée présentera presque toujours en certains points un dépassement de la limite élastique du métal; à notre avis ce point est sans importance car la structure retrouvera rapidement un nouvel état d'équilibre par suite de l'application des efforts dûs aux charges normales de travail.

Certains auteurs prétendent, sans doute avec raison, qu'un léger dépassement de la limite élastique présente l'avantage d'une orientation des grains dans le sens des efforts et l'on pourra facilement constater que le léger écrouissage qui en résulte est sans effet pratique sur les qualités mécaniques de l'acier.

10°) — *Correction et diminution des efforts internes.* —

La méthode de repérage que nous proposons et l'appareil que nous avons mis au point nous ont permis de connaitre, d'une façon précise, les modalités de répartition des efforts internes dans les noeuds d'assemblage et dans les différents points d'une structure soudée.

Il existe plusieurs façons de diminuer les efforts internes et nous essaierons dans l'avenir de mettre au point des procédés de soudure qui les aménéront aux plus faibles valeurs possibles.

Actuellement nous pouvons faire les recommandations suivantes, qui sont d'ordre général.

— En soudant une structure on devrait s'attacher d'abord à en constituer les éléments, en soudant en premier ceux qui doivent être soudés bord à bord, de telle façon que les déformations restent minima, ainsi que nous l'avons vu à la planche IV, quand les pièces sont libres.

— On fera ensuite les soudures en congé qui, par exemple, permettront le raccordement d'une semelle sur une âme, et d'une manière générale, les soudures en congé seront faites d'une importance juste suffisante pour les efforts auxquels elles seront soumises, de façon à éviter un retrait longitudinal considérable. A ce sujet, nous avons remarqué que bien souvent les soudures en congé sont beaucoup trop importantes et représentent une sécurité beaucoup trop grande, ce qui justifie la remarque précédente.

D'une manière générale, quand des soudures de grandes longueurs devront être faites, il y aura toujours intérêt à faire travailler plusieurs soudeurs le long de la même ligne de joint et si les pièces sont épaisses et que l'accès soit possible, des deux côtés, il sera utile de prévoir un double chanfrein et de faire travailler des soudeurs de chaque côte du joint. Cette pratique sera avantageuse du point de vue de la diminution des déformations.

Certains Ingénieurs pourront s'alarmer du fait de l'importance des efforts internes développés par la soudure, mais nous pourrons leur répondre que les structures rivées ne sont pas exemptes d'efforts internes et que bien souvent l'emploi de broches ou un rivetage mal fait peuvent déterminer des tensions que nous supposons analogues à celles montrées par nos essais; nous nous efforcerons d'ailleurs de les mettre en évidence.

Il y a lieu d'attirer l'attention des Ingénieurs-soudeurs sur un point particulier qui concerne la soudabilité de l'acier employé pour la structure. En principe, tous les aciers normaux du commerce sont facilement soudables, cependant pour des structures de sécurité telles que des ponts par exemple, il sera bon de préciser que l'acier devra être soudable en tenant compte des recherches qui ont été faites dans cette branche particulière et d'autre part pour différencier deux qualités d'aciers susceptibles d'être employés pour un ouvrage, il y aura lieu de retenir de préférence celui qui, après avoir dépassé la limite élastique, sera susceptible au cours d'un nouvel essai de traction, du plus grand ellongement avant rupture. Cette qualité devant être mise naturellement en parallèle avec les caractéristiques mécaniques telles qu'elles ressortent des prescriptions établies pour ce genre de travaux de soudure.

Il existe différents moyens de diminuer les déformations, qui sont particuliers: au choix de l'électrode, au choix de l'intensité pour une électrode donnée et enfin pour une même catégorie d'électrodes, au choix du diamètre employé.

En soudant avec des électrodes de petit diamètre, le métal de la soudure est déposé par petits apports successifs et il s'en suit une série de retraits qui déterminent des efforts assez importants dans le voisinage des tôles.

En soudant avec des électrodes de gros diamètre et des intensités de courants importantes on chauffe une large zône et le métal est déposé localement par plus grosse quantité; la pièce restant rouge plus longtemps le métal s'allonge et on peut constater un retrait local moins important, mais ceci est dû au fait qu'une large zône a été recuite par la très grande chaleur, de l'arc ce qui peut présenter des inconvénients. Le choix du diamètre optimum de l'électrode méritera donc quelques essais préliminaires dans le sens de ceux que nous avons présentés.

Enfin, il existe une autre façon de diminuer les efforts internes, c'est le martelage après chaque couche de métal déposé, ce martelage étant conduit méthodiquement et de telle façon que les valeurs du retrait, lues entre les repères seront ramenées à chaque passe aux valeurs existant précédemment ou à des valeurs voisines. Nous avons montré dans notre rapport au Congrès de Rome (1934), qu'un tel martelage pouvait permettre d'annuler à peu près complètement les efforts internes, à condition que l'on tienne compte que le martelage devait être conduit avec prudence afin d'éviter un écrouissage inutile du métal déposé.

Nous avons montré d'autre part qu'un léger martelage du bord des fers réunis par soudure complétait efficacement le travail de libération des efforts et nous

avons donné des indications précises sur la puissance à dépenser pour des éprouvettes déterminées.

L'examen de nos essais appelle aussitôt une remarque importante sur la qualité du métal déposé par soudure, l'électrode devra être choisie telle qu'elle permettra d'obtenir un dépôt sain et homogène possédant un bon allongement et une excellente résilience, le métal déposé devra être forgeable à chaud et martelable à froid sans criques.

11º) — *Utilisation du tensiomètre en vue de la détermination du taux de travail dans une charpente.* —

Nous avons fait diverses expériences pour trouver d'autres applications ou le tensiomètre pouvait être employé à la manière d'un extensomètre du type habituel. Il se peut que notre appareil soit un peu moins précis que certains

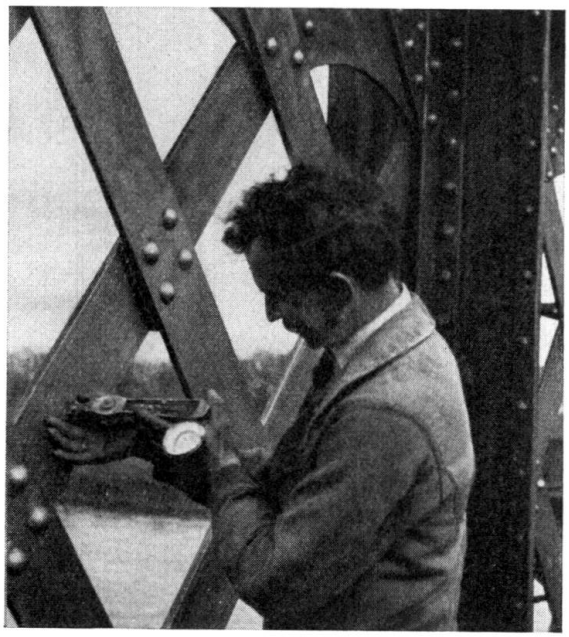


Fig. 3.
Présentation du Tensiomètre sur des repères placés sur une diagonale d'un pont rivé pour déterminer la variation des efforts au passage d'un train.

extensomètres, mais par contre il présente le gros avantage de pouvoir se monter en n'importe quel point d'une charpente et dans n'importe quelle position en l'utilisant avec la méthode de repérage proposée et avec un système d'empreintes.

Nous avons pu lire par exemple au passage d'un train la variation des efforts dans une diagonale et nous avons trouvé qu'à un certain moment le taux de travail dans une barre se trouvait diminué de 5 kgs/mm² pour dépasser ensuite 7 kgs/mm² le taux de travail dû à la charge statique. L'appareil n'a pas été affecté par les vibrations importantes déterminées par le passage du train et nous avons pu l'employer soit tenu à la main, soit placé sous un petit montage du type représenté par la photographie ci-contre.

On pourra donc employer le tensiomètre pour déterminer le taux de travail dans des structures ou même dans des éléments de machines et nous pouvons citer l'exemple du relevé des efforts dans un col de cygne de presse en acier ou chaque coup de presse faisait apparaitre une lancée de l'aiguille du comparateur indiquant un taux de fatigue maximum de 10 à 12 Kgs.

Il serait ainsi possible dans la construction des bâtis de machines par soudure de connaitre le taux de fatigue de certaines parties soumises à des efforts importants et qui sont le plus souvent très difficiles à calculer, donc à peu près incontrôlables et pour lesquels le bureau d'études prévoit toujours des sections beaucoup plus importantes.

L'emploi du tensiomètre permettrait dans ce cas d'approprier très exactement le bâti de machine aux efforts pour lesquels il est calculé et de vérifier ensuite au premier essai de la machine que les taux de fatigue ne dépassent pas ceux qui ont été prévus.

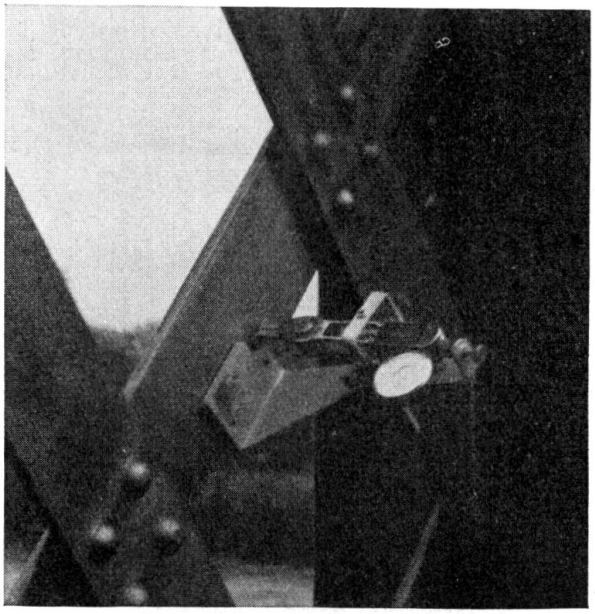


Fig. 4.
Le Tensiomètre est maintenu sur la diagonale par un montage en équerre, ce dernier donne plus de stabilité à l'appareil.

12°) — *Surveillance des structures métalliques au cours de leur utilisation.* —

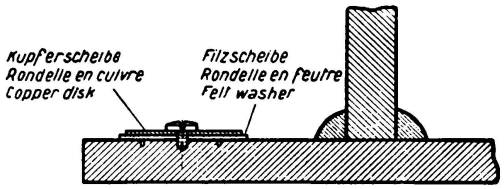
Nous avons pensé que le système de repérage que nous préconisons pour la construction des ponts, charpentes et toutes structures, ne devait pas être négligé après que la structure est terminée. En effet, si on prend la précaution de recouvrir les empreintes aussitôt qu'elles ont été faites, par un dispositif très simple qui consiste par exemple en une rondelle de feutre huilé et une rondelle métallique vissée, de telle façon que les empreintes soient bien cachées, on peut périodiquement, après mise à jour des empreintes et nettoyage de celles-ci, faire de nouvelles mesures (planche VII).

Le tensiomètre sera présenté successivement aux divers points d'une structure pour laquelle on aura relevé les valeurs entre repères au cours du procès-verbal de réception par exemple.

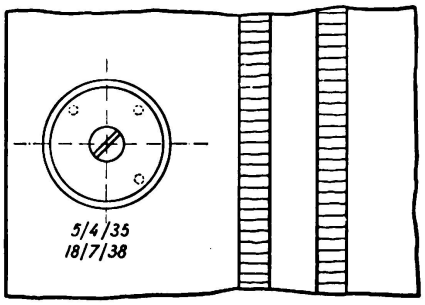
En revenant périodiquement tous les deux ans faire de nouvelles mesures, l'agent chargé du contrôle pourra signaler que le taux de fatigue en tel point de la structure s'est modifié dangereusement et on pourra reconnaitre que certaines parties se trouvent dans une situation qui peut, sinon compromettre la sécurité, mais tout au moins recevoir l'attention des Ingénieurs spécialistes.

Nous espérons que cette petite étude contribuera au meilleur développement de la soudure à l'arc, car nous estimons que connaissant mieux les facteurs

qui contrôlent ce procédé de soudure, les Ingénieurs qui peuvent en faire usage en apprécieront tout l'intérêt et en recommanderont plus chaleureusement l'emploi.



Bemerkung: Die Messstellen können beliebig angeordnet werden.
Nota: Les pièces peuvent être repérées dans une position quelconque.
Note: The test-marks can be arranged in any direction.



Angaben des Aufsichtsdienstes.
Indications placées par le service de surveillance.
Periodical inspection mark.

Planche VII.

Repèrage des ouvrages métalliques en vue de leur surveillance.
Note: Périodiquement on viendra placer le tensiomètre dans les repères primitifs et vérifier que le taux de travail est bien celui normalement prévu.

Résumé.

D'après les expériences de l'auteur, il apparait que la recherche des efforts internes dûs à la soudure, effectuée en mesurant les variations d'écartement de repères placés a de grandes distances les uns des autres, donne une idée incomplète des valeurs que l'on devrait réellement trouver; toutes ses expériences ont été faites entre des points de repères espacés de 25 mm les uns des autres et ces courtes distances ont été très favorables.

Sur des tôles d'acier, en cours de soudure, on a pu définir l'emplacement des zones critiques correspondant à une concentration des efforts; elles sont situées sur une bande s'étendant entre une ligne parallèle proche du bord du chanfrein et une autre parallèle au joint tracée à 50 ou 75 mm de la première, cette distance dépendant beaucoup de l'épaisseur des tôles.

Des mesures, prises très près de la soudure, montrent très souvent une déformation permanente du métal de la tôle, et les régions un peu plus éloignées de la ligne de joint montrent une composition des efforts internes qui résulte de l'action simultanée de la contraction longitudinale et de la contraction transversale dûe au refroidissement du métal déposé.

L'auteur pense qu'il est en mesure de mettre en évidence, pour la première fois, comment on peut faire la discrimination entre les allongements positifs ou négatifs dûs au refroidissement du métal de la tôle et les allongements dûs au refroidissement du cordon de métal déposé; dans certaines conditions opératoires, il a pu montrer que les allongements dûs au refroidissement du métal de la tôle représentent environ 70 % de la valeur totale.

Il a pu également montrer que la transmission des efforts d'une face de la tôle, vers la face opposée, dépend de l'épaisseur du métal; par exemple, sur la face opposée à la soudure, une extension peut prendre la place d'une contraction, quand on passe d'une tôle de 12 mm à une tôle de 25 mm.

La présente communication montre également la distribution des efforts internes dans divers types de joints soudés tels que: soudure en bouchon, soudure à recouvrement, soudure bord à bord (tôles bridées ou libres), soudure en «T». En examinant les résultats exposés, l'Ingénieur-soudeur observe facilement les allongements élastiques ou permanents et en déduit les efforts internes correspondants.

Le même procédé est recommandé par l'auteur pour la détermination des efforts dûs aux charges utiles appliquées à toutes sortes de structures en acier.

Il conseille également de garder un contrôle périodique constant sur les repères en conservant une surveillance régulière des membres des structures pendant qu'ils subissent la charge.

Les résultats exposés sont dûs, d'après l'auteur, à une nouvelle réalisation simple d'un *Extensomètre* (ainsi qu'à une nouvelle méthode pour l'exécution des repères), d'une forme spéciale, qu'il a été assez heureux de pouvoir développer après plusieurs années de recherches.

L'auteur espère que cette contribution à la détermination des efforts internes développés par la soudure conduira les Ingénieurs intéressés par ces nouveaux procédés à une meilleure compréhension des conditions de travail, et aidera à promouvoir l'art de la soudure.

IIIb 2

Projet et exécution des ouvrages soudés.

Ausbildung und Herstellung geschweißter Bauten.

Design and Execution of Weldet Structures.

A. Bühler,
Sektionschef für Brückenbau S.B.B., Bern.

I. — Définition et mesurage des contraintes dues à la chaleur et au retrait.

1° — *Définition des contraintes dues à la chaleur et au retrait.*

Lors de l'exécution des ouvrages soudés, il faut faire spécialement attention aux contraintes dues à la chaleur ainsi qu'aux contraintes de retrait produites ensuite par le refroidissement. Il faut apporter, lors de la confection d'une soudure, une quantité relativement grande de chaleur en un point afin de relier le métal de base et le métal d'apport.[1]

L'échauffement produit un allongement du métal de base qui entoure la soudure tandis que les parties plus éloignées, qui restent plutôt froides, empêchent cet allongement. Dans les environs de la soudure il se produit une compression et un refoulement de la matière, favorisés par l'échauffement. alors que le reste de la section subit des efforts de flexion et de traction et peut même à la rigueur être étiré.

Lors du refroidissement de la soudure et de ses environs, les parties de la barre, éloignées et froides, offrent une résistance opposée à la suppression des efforts de flexion et de traction de telle sorte que pour finir la région de la soudure est principalement sollicitée à la traction et les régions voisines le sont à la compression. La position excentrique d'une soudure par rapport à l'axe de la barre, ou, ce qui arrive, un échauffement irrégulier, peuvent engendrer des variations appréciables ainsi que des perturbations et des modifications dans le diagramme des tensions. On ne peut plus parler alors d'une répartition linéaire des contraintes, spécialement dans la soudure et ses environs.[2]

Dans la soudure elle-même, ainsi que dans la zone de transition il se produit des déformations permanentes. Des parties du métal de base sont d'abord comprimées puis étirées. Les déformations, souvent importantes, qui se produisent lors du soudage, démontrent l'existence de fortes tensions internes.[3]

---

[1] *Wörtmann:* Schweiz. Bauzeitung, 5. XI. 1932. La quantité de chaleur à apporter est de 1150 Kcal par kg de soudure. Cette quantité dépend évidemment du nombre de passes de soudure ainsi que de la masse des pièces à souder.

[2] *Bierrett:* Versuche zur Ermittlung von Schrumpfspannungen. Z.V.D.I. 9. VI. 1934.

[3] *Reinhold & Heller:* Die Schrumpferscheinungen an der elektrisch geschweißten Schlachthofbrücke in Dresden. Bautechnik, 21. X. 32.

Il en est en général de même lorsque des parties de poutre sont assemblées par soudure. En plus des tensions internes dont nous avons parlé, il existe encore d'autres contraintes qui sont provoquées par la résistance aux allongements de la poutre et des barres. Ce point est spécialement important lors du renforcement des ponts.

Il est clair que, dans un tel état de choses, ces tensions dues à l'échauffement et au retrait ne peuvent être déterminées qu'approximativement et pour la raison que ces déformations se trouvent en partie dans le domaine de la plasticité. Il ne faut pas s'étonner dès lors que l'on exige d'un métal à souder une grande possibilité d'allongement, si l'on veut éviter les fissures (fig. 1).

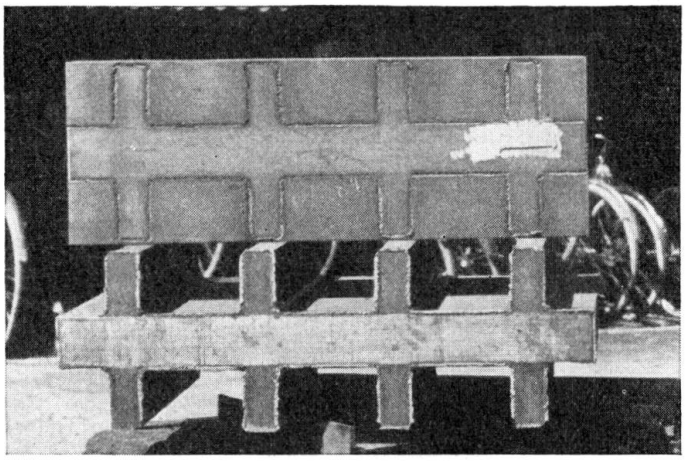


Fig. 1.

Essai non réussi de soudage d'une plaque en acier de rail sur de l'acier St. 37. Après le refroidissement les soudures se sont détachées de l'acier à forte contenance de carbone.

De même après le soudage on peut soumettre les pièces à un réchauffement ou à un recuit puis les laisser refroidir lentement afin de diminuer ou supprimer les contraintes. Cependant ces deux procédés ne sont que rarement utilisés et même souvent inutilisables dans les petits ateliers.[4] Ce sont pourtant les entreprises de petite et moyenne importance qui se servent principalement de la soudure électrique car les installations nécessaires sont bon marché et vite prêtes.

Dans certains cas, le soudage de pièces épaisses à l'état chaud (100 à 300°) peut présenter de gros avantages.[5] Si cet échauffement n'était pas insupportable pour les ouvriers, le soudage à l'état chaud permettrait de réduire de façon appréciable, les tensions de retrait.

---

[4] Les tuyaux de la conduite forcée de l'Etzel qui avaient une épaisseur allant jusqu'à 45 mm furent soumis à un recuit à la température de 625° maintenue constante durant 6 h. Ceci devait supprimer les tensions internes produites par le soudage et la mauvaise structure des cordons de soudure (structure de *Widmannstätt*). Les soudures circulaires, effectuées sur le chantier furent aussi soumises à un recuit.

[5] Mitteilungen der *Escher-Wyss A.G.* Nr. 5, mai 1926.

2° — *Installations pour la détermination des tensions dues à la chaleur et au retrait.*

La détermination des *tensions dues à la chaleur* n'a été, à ma connaissance, que rarement exécutée car il est difficile de travailler avec des appareils précis aux environs de la soudure et parce que, par suite de la déperdition de chaleur, l'état de tensions se modifie continuellement et rapidement. Il serait cependant possible de suivre les différents phénomènes qui se produisent dans la barre à souder au moyen d'extensiomètres.

Il est de toute première importance pour l'exécution d'un ouvrage de connaitre les tensions de retrait résiduelles après le rétablissement de l'équilibre de température. On peut les déterminer approximativement par les méthodes:

a) mesurage de l'écartement de deux repères avant et après le soudage,
b) perçages et mesurages des allongements dans le métal de base avoisinant (Mathar),[6]
c) emploi des rayons X,[7]
d) division de l'éprouvette et mesurage des allongements dans les différentes pièces,
e) procédé du vernis adhérent fragile.[8]

Les procédés a, b, c et e peuvent être utilisés sans détérioration tandis que dans l'emploi du procédé d, l'éprouvette est rendue inutilisable. Le procédé c n'est pas encore très développé et la méthode e ne peut être employée que dans les zones qui ne sont pas fortement chauffées.

Nous avons employé le procédé a car il est simple et peut être utilisé par des personnes qui ne sont que peu expérimentées en la matière.

Aucun de ces procédés ne peut être considéré comme complet. Ils présentent tous l'inconvénient de ne donner aucun résultat suffisant sur les tensions de retrait résiduelles à l'intérieur d'une barre. Même dans le cas de la division de l'éprouvette, on ne peut déterminer avec sûreté la grandeur des tensions internes. Les procédés de mesurage se bornent en général à la détermination des allongements à la surface de l'éprouvette mais ils ne peuvent donner de bons résultats dans la pratique.

Pour mesurer les tensions de retrait, il faut choisir un extensiomètre qu'il ne soit pas nécessaire de laisser fixé aux pièces durant la déformation, mais que l'on puisse appliquer à la surface de la pièce avant et après la déformation.

Il est en général impossible de laisser, durant la déformation, l'extensiomètre appliqué à la pièce auscultée car les données de l'instrument seraient faussées durant le soudage par la chaleur, les coups et les inattentions du soudeur, et l'extensiomètre lui-même pourrait être endommagé.

La condition exigée, à savoir que l'instrument ne doit pas être laissé sur la pièce durant la déformation est remplie par les extensiomètres Système *Meyer* (fig. 2).

---

[6] *Müllenhoff:* Eigenspannungen in Schweißnähten, Elektroschweißung, cahier 6, 1935.

[7] Röntgenographische Feinuntersuchungen an Brückentragwerken, Schweiz. Bauzeitung, 12. I. 1935.

[8] Procédé de *Portevin*, Génie Civil, 8 II 1934, Maybach, Fabrique de moteurs, Friederichshafen.

L'emploi de ces extensiomètres à application présente encore un autre grand avantage: un seul instrument suffit pour tous les mesurages.

Nous allons décrire l'emploi de ce procédé (cf. fig. 3). La base est donnée par les pointes (1) qui sont introduites dans les deux trous prévus dans la pièce à ausculter. L'extensiomètre qui se compose de deux barres (3) et (4) qui glissent

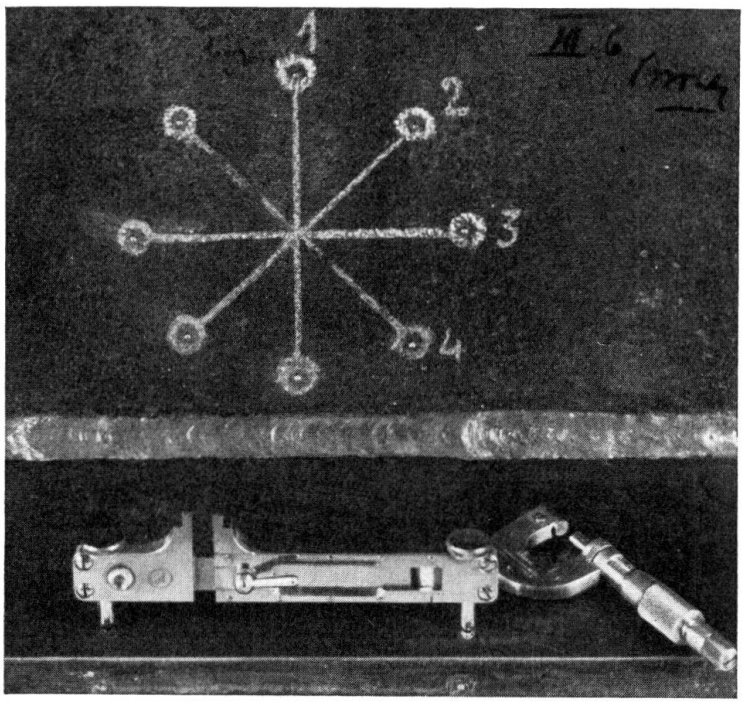


Fig. 2.

Extensiomètre à application système Meyer.

l'une dans l'autre, sera appliqué avant et après la déformation. Après l'introduction des pointes dans les trous on fixera les deux barres au moyen de la vis (5) et l'on mesurera la distance des mâchoires (6) au moyen d'un micromètre. Après quelques exercices on peut obtenir une précision de 1 à 2/1000 mm.

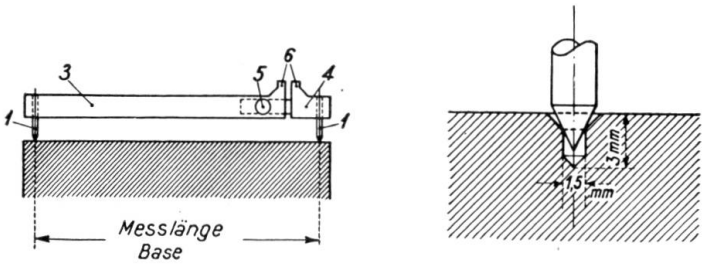


Fig. 3.

Concerne le mode de mesurage avec l'extensiomètre à application.

A dessein l'on a pas voulu utiliser un micromètre à cadran afin de ne pas introduire une nouvelle erreur à contrôler. Pour l'examen de cet extensiomètre on emploie une barre étalonnée. La conservation des petits trous peut être assurée d'une façon simple et durable par un bon graissage et le collage d'une bande.

II. — Mesures exécutées.

1° — *Soudage de semelles sur des profilés de laminage.*

On mesura en 1929 les allongements, en différents points, de deux gros profilés DIR 100 dont les membrures inférieures devaient être renforcées par une semelle de 260×20 mm. Ces profilés étaient destinés à la construction de la dalle en béton armé du passage sous-voies de 20 m de portée situé à la rue Voltaire à Genève.

On constata que les membrures supérieures, qui n'étaient pas directement influencées par le soudage étaient soumises, aux 5 points auscultés, à une

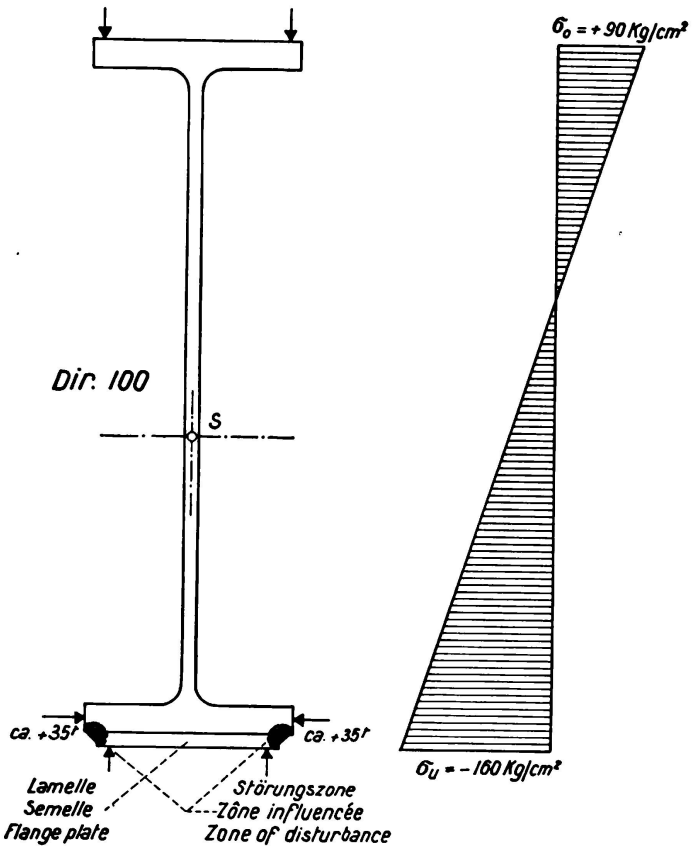


Fig. 4.

Zone déteriorée des poutres du passage sous-voies de la Rue Voltaire à Genève.

tension moyenne de +90 kg/cm². Il en résulte qu'une force de env. 70 t doit agir le long des deux cordons de soudure, ce qui signifie que par suite de l'exécution des soudures d'angle, c'est-à-dire par suite de l'échauffement et du retrait, la soudure ainsi que le métal environnant se raccourcit de telle sorte que l'on a entre les zones influencées et les zones non influencées une force coercitive de 35 t pour chaque soudure (fig. 4).

Il est clair que les zones influencées sont aussi soumises à de gros efforts de traction et que lors d'un essai de fatigue elles seront vite fendillées ce qui entrainera rapidement la rupture de toute la poutre.

Les mesures d'allongements dans les environs des soudures d'angle donnent des compressions moyennes de 160 kg/cm², ce qui correspond approximativement

à deux forces de 35 t. Il n'est pas certain que les mesures exécutées aux environs des soudures d'angle ne se trouvent pas elles-mêmes dans la zone influencée, ce qui signifierait que les tensions de compression obtenues sont trop petites.[9]

Les mesures effectuées au moyen de thermoélements sur les poutres et les semelles lors de l'exécution du premier cordon donnent le diagramme représenté à la fig. 5 qui fait ressortir le gros effet local de la chaleur.

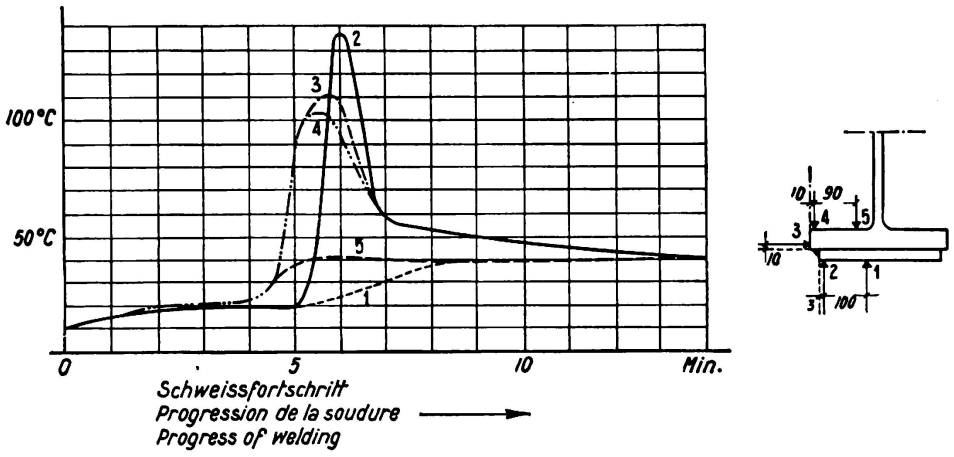


Fig. 5.

Mesures effectuées avec des thermoéléments sur les poutres du passage sous-voies de la Rue Voltaire à Genève.

2° — *Construction d'un pont-rails à âme pleine.*

Lors de la construction, en 1934, du premier pont-rails à âme pleine soudée, de la ligne Beinwil-Reinach, on effectua différentes mesures à l'atelier afin de déterminer les tensions de retrait. On mesura en différents endroits les allongements engendrés par l'exécution des soudures d'angle (fig. 6).

Les mesures effectuées permettent de dire que la force coercitive doit être de 30 à 60 t, ce qui représente dans les extrêmités des semelles (— 350 × 45 et — 350 × 30) des sollicitations moyennes de 200 à 450 kg/cm². On ne put observer aucune répartition régulière des allongements dans l'âme. On peut l'expliquer en considérant le fait que la chaleur se répend principalement dans les semelles et que très peu dans l'âme. Il faut encore ajouter que l'âme relativement mince peut facilement subir de grosses déformations. De toute façon l'âme qui n'est influencée par aucune autre soudure peut très bien subir des tensions de compression locales très fortes (jusqu'à 1700 kg/cm²). Les mesures du raccourcissement total de la poutre ont données 0,022 cm/m, ce qui correspond à une tension de

$$\frac{0{,}022}{100} \cdot 2\,150\,000 = 430 \text{ kg/cm}^2$$

et qui coïncide avec les plus grandes forces coercitives données plus haut. Lors de la construction d'un pont pour la manoeuvre des aiguilles on put déterminer

[9] *Bierett:* Versuche zur Ermittlung der Schrumpfspannungen in geschweißten Stumpfnahtverbindungen. Conférence présentée à la Commission pour la technique de la soudure, V. d. I. 1934.

un retrait de 1 $^0/_{00}$, ce qui correspond à une tension moyenne dans la poutre de 2150 kg/cm^2.

Dans les zones influencées, les efforts de traction qui font équilibre aux efforts de compression peuvent évidemment atteindre de très hautes valeurs. Si l'on évalue la surface de cette zone à 20—25 cm^2, il en résulte que la soudure et le métal avoisinant sont sollicités jusqu'à la limite d'écoulement et même au dessus.

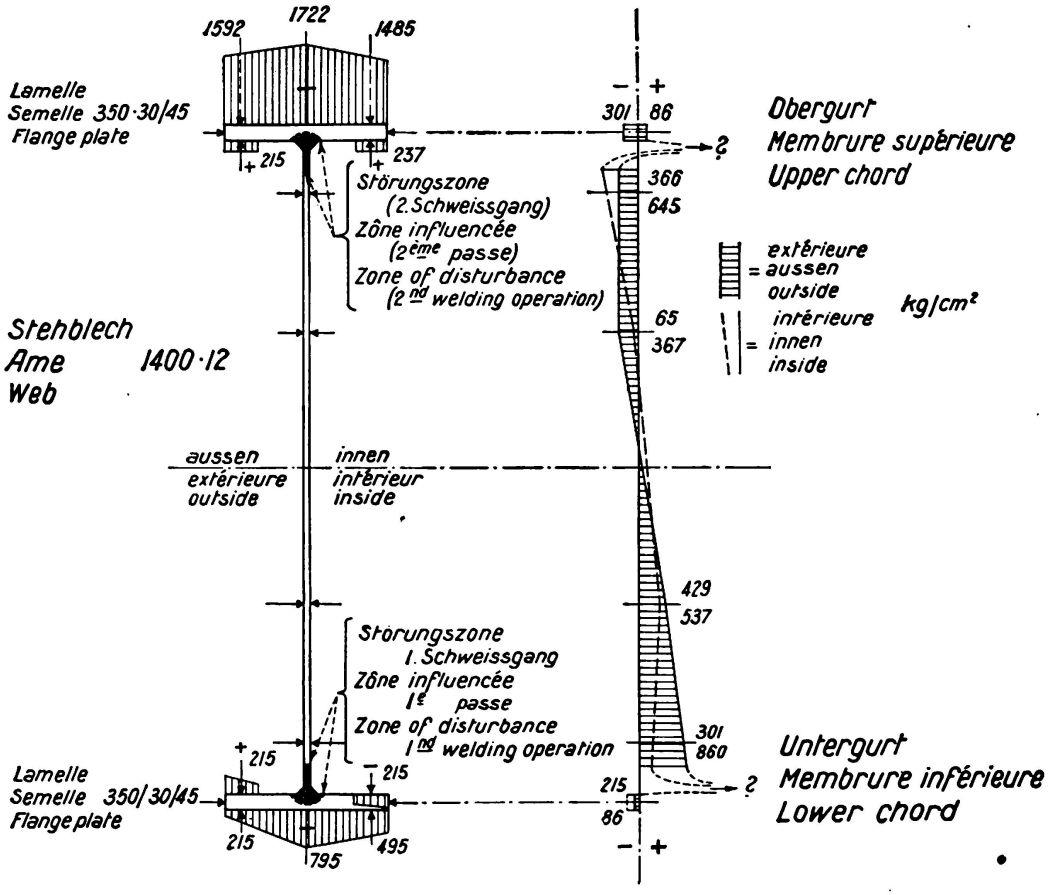


Fig. 6.

Mesures des contraintes de retrait sur un pont à âme pleine de la ligne Beinwil-Reinach. (Résultats obtenus dans une section).

Le danger de fissuration de la zone influencée lors des essais de fatigue est plus faible lorsque la soudure est entourée de plusieurs côtés par du métal non influencé que dans le cas d'une soudure d'angle de bord. On peut ainsi expliquer le bon comportement aux essais de fatigue des poutres soudées du type que nous venons de décrire.

3° — *Renforcement d'un pont en treillis en fer puddlé.*

Lors du renforcement, en 1934, d'une série de ponts en fer puddlé, semblablement constitués, de la ligne du *Brünig* (Lucerne-Interlaken) nous avons voulu déterminer d'une façon approximative l'influence de soudures exécutées sur place. Pour cette raison, nous avons effectué, 5 mois après l'exécution des soudures, de nouvelles mesures aux mêmes endroits afin de savoir si, en cours

de service, on obtenait la compensation dont on a souvent fait état, des forces dues au retrait.

C'est d'abord à la membrure inférieure, à la membrure supérieure et au croisement des diagonales de trois panneaux ainsi qu'à deux montants que l'on a déterminé les tensions de retrait engendrées par le soudage de renforcements. A chaque extrêmité de ces barres on disposa 3 à 4 points de mesurage sur l'ancienne construction. L'on exécuta aucune mesure sur les renforcements car ces pièces sont soumises lors de l'adaptation, à de fortes tensions qu'il n'est pas facile de mettre à part. On peut cependant affirmer que de telles mesures auraient été très intéressantes.

Les mesures (fig. 7) ont démontré que même les barres auxquelles on avait rien soudé étaient mises sous tension par suite du raccourcissement des barres,

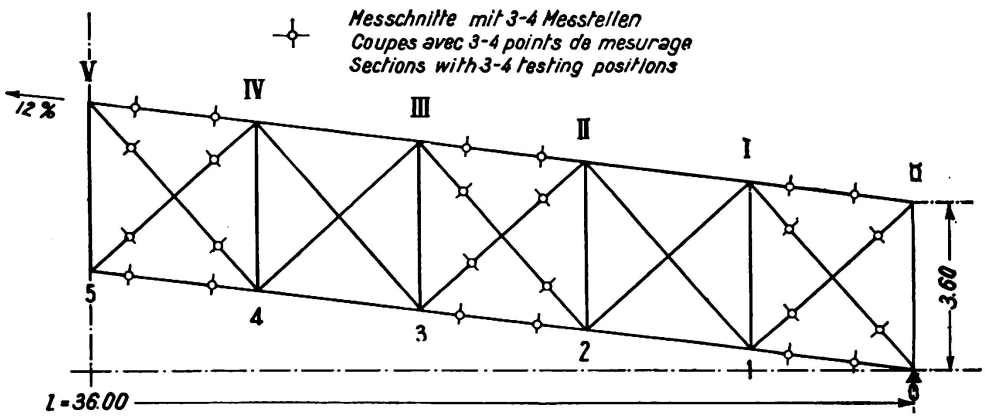


Fig. 7.

Système et points de mesurage des ponts en fer puddlé de la ligne du Brunig.

engendré par le soudage, et par la disposition hyperstatique du treillis. Les tensions moyennes au centre de gravité, obtenues en faisant la moyenne des valeurs mesurées aux deux extrêmités, sont pour des tensions maxima de 840 kg/cm² dans les arêtes, les suivantes:

barres non renforcées

		première mesure	seconde mesure*)
barre de la membrure sup.	0—I	— 47	— 113
» » » » inf.	0—1	— 40	— 75
diagonale tendue	0—1	+ 84	+ 133
» »	II—3	+ 221	+ 265
montant	1—I	— 304	— 250
»	2—II	— 461	— 380

La répartition des tensions dans les barres non renforcées (comme d'ailleurs dans les barres renforcées) est très compliquée. D'après le tableau, les membrures et les montants sont sollicités à la compression et les diagonales tendues à la traction.

Il n'est pas facile de calculer exactement les forces dues au soudage en partant des allongements. Les mesures montrent dans ces barres de fortes tensions de

retrait et de flexion. Les tensions moyennes au centre de gravité (moyenne des deux extrêmités) ont les valeurs suivantes:

barres renforcées

			première mesure	seconde mesure *)
barre de la membrure sup.		II—III	— 127	— 82
» » » » »		VI—V	— 300	— 162
» » » » inf.		2—3	— 165	— 220
» » » » »		4—5	— 152	— 150
valeurs évaluées	diag. comprimée	0—I	— 400	— 400
	» »	2—III	— 500	— 500
	» »	4—V	— 500	— 500
	diag. alternativement tendue et comprimée	IV—5	— 600	— 600

Après 5 mois de service les allongements furent mesurés (2ème mesure *) et il fut déterminé que des changements s'étaient produits. On peut remarquer que ces changements étaient soit des diminutions, soit des accroissements de tension. Il est impossible d'établir une règle en se basant sur les résultats obtenus. Il nous parait prématuré d'affirmer qu'avec le temps il se produit une égalisation des efforts dans la zone influencée.

4° — *Construction d'un pont-rails à âme pleine courbe.*

En 1936 on construisit près de Baden/Oberstadt un pont-rails soudé de 27 m de portée. Ce pont est courbe et fortement biais. Les traverses reposent directement sur les poutres maitresses à âme pleine. Ce pont fut calculé comme un système special en tenant compte de l'obliquité. Pour cette raison les contreventements supérieurs et inférieurs sont très forts. Les réactions d'appuis sont négatives aux extrêmités en pointe et il fallut par conséquent ancrer les appareils d'appui.

Dans un panneau d'une des poutres maitresses on ménagea des pointeaux et après le soudage du cordon d'angle entre la semelle et l'âme, on mesura les déformations de l'âme et quelques allongements de l'âme et des semelles (fig. 8 et 9). Les résultats furent les suivants:

Les deux membrures sont sollicitées à la compression. Cette compression est plus faible dans la membrure inférieure qui fut soudée la première, en moyenne 325 kg/cm², car cette membrure fut déchargée par le soudage de la membrure supérieure. La tension dans la membrure supérieure est en moyenne de 675 kg/cm².

Dans l'âme on a constaté des tensions très élevées allant jusqu'à 950 kg/cm².

Lors du soudage des semelles sur les âmes on constata un fait très grave. On souda d'abord les tôles de gousset des contreventements sur les membrures et ensuite seulement on souda les membrures aux âmes. Du fait que les contreventements sont rivés, les tôles de gousset ont un grand nombre de trous. Lors d'un contrôle plus minutieux on constata dans quelques goussets des fissures passant par les trous. Les mesures d'allongements firent ressortir l'influence de la forte excentricité des forces agissant sur ces tôles qui étaient soumises à des efforts de traction importants.

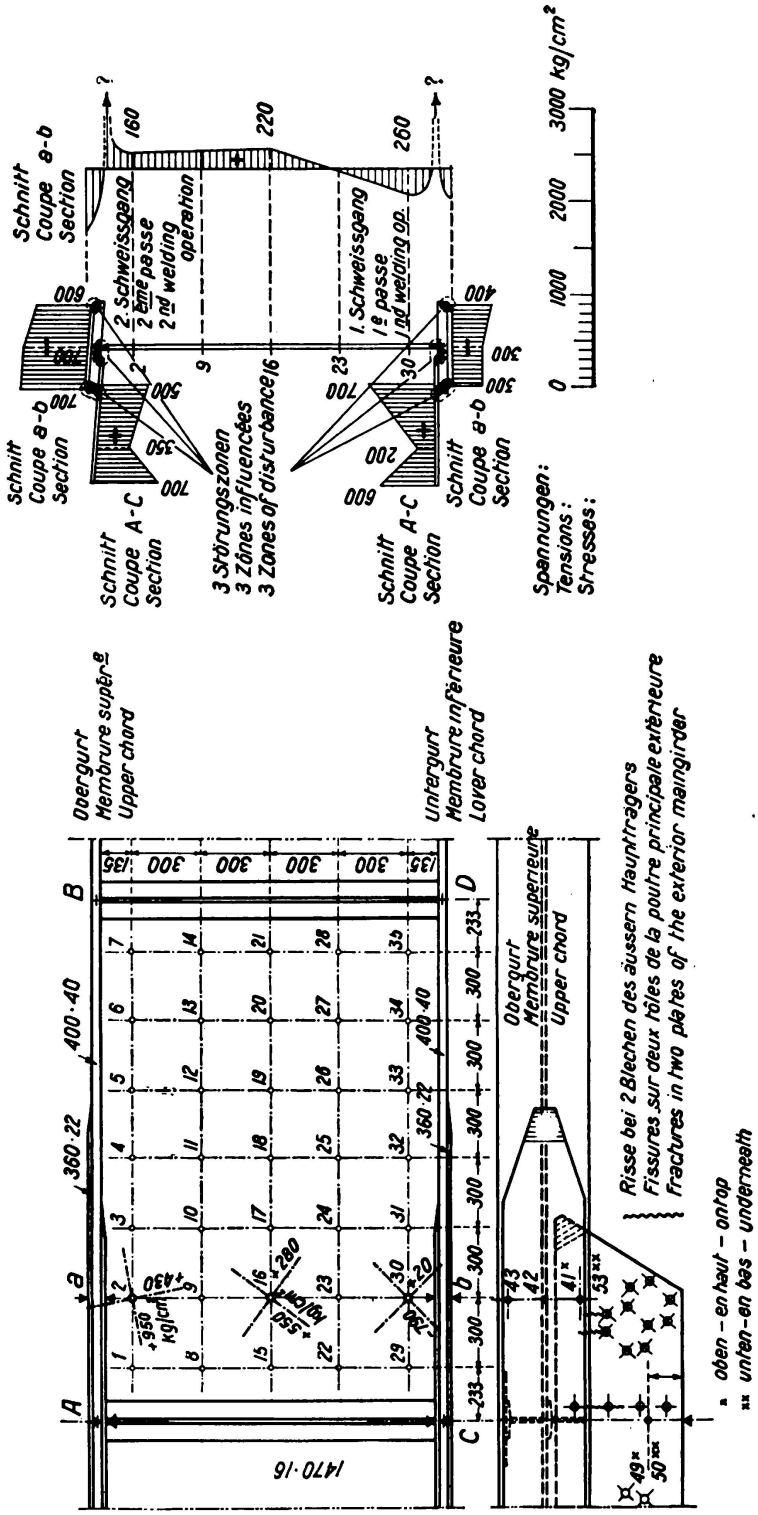


Fig. 8.

Points de mesurage et représentation des contraintes de la poutre-maîtresse interne.

Les déformations de l'âme étaient très importantes, ce qui n'est pas étonnant si l'on tient compte des tensions dont nous avons parlé. La plus grande déviation était de 2,9 mm et du côté de la membrure inférieure qui fut soudée la première. Dans cet état, l'autre arête de l'âme n'était qu'imparfaitement fixée par des soudures d'attache.

Les tensions de retrait dans les membrures sont aussi grandes dans ce cas car il faut tenir compte non pas seulement d'une soudure mais de trois à chaque membrure. Il en résulte que l'on a trois zones influencées qui sont soumises aux forces de traction provenant du retrait et qui provoquent dans la poutre une forte compression.

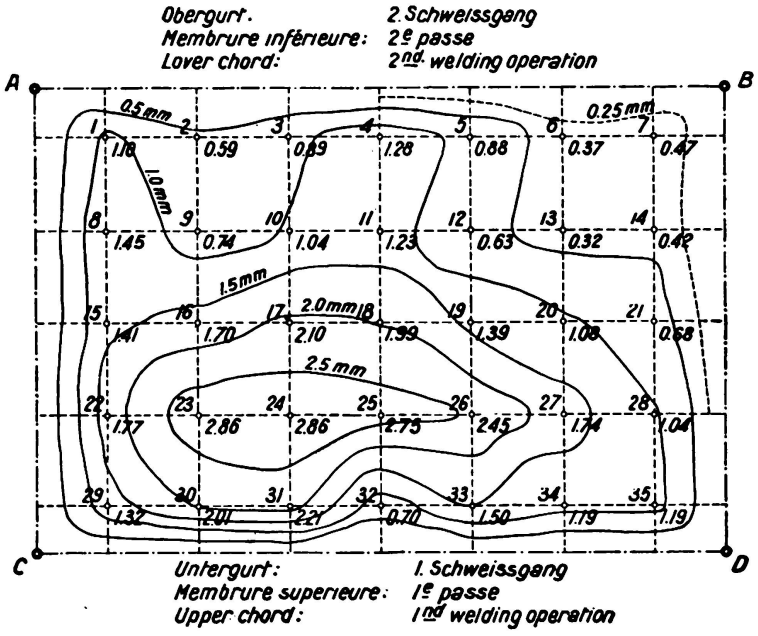


Fig. 9.

Contraintes de retrait lors de l'exécution d'un pont-rails courbe à âme pleine. Déformation de l'âme. Courbes d'isoflexion.

5° — *Considérations sur les mesures exécutées.*

En se basant sur les résultats, que l'on ne peut considérer comme favorables, des mesures dont nous venons de parler, on peut affirmer qu'il reste encore beaucoup à faire pour mettre au clair la question des tensions dues à la chaleur et au retrait. Les contraintes engendrées par le soudage sont très grandes et peuvent dans certains cas mettre en danger la sécurité d'un ouvrage sollicité à des efforts dynamiques.

Il serait de toute première importance pour la construction des ouvrages soudés, de posséder des résultats objectifs et exacts de mesures systématiques des tensions dues à la chaleur et au retrait, exécutées sur différents profilés et poutres afin de pouvoir se faire une idée, lors de l'établissement du projet, des tensions supplémentaires qui sont engendrées par le soudage.

Il serait très indiqué de rechercher les déformations d'un fer plat chauffé ou refroidi irrégulièrement ainsi que l'influence de soudures de différentes grandeurs déposées centriquement et excentriquement sur un tel fer.

Il faudrait encore faire des essais sur des fers plats de différentes sections reliés par des cordons longitudinaux et pour terminer sur des profils combinés tels que des poutres et des barres avec et sans raidisseurs. Il faudrait attacher la plus grande attention à la détermination de la zone influencée.

Selon moi on pourrait ainsi acquérir des résultats très intéressants et contrôler les deux opinions opposées, à savoir, s'il est plus exact de souder avec des électrodes minces ou épaisses et quel processus de soudage présente le plus d'avantages.

Aussi longtemps que les éprouvettes ne seront pas détériorées, elles seront à essayer statiquement et dynamiquement.

III. — *Conformation des ouvrages soudés.*[10]

1° — *Résistance statique et résistance à la fatigue des pièces soudées.*

Celui qui a vécu la période d'introduction ainsi que celle assez troublée du développement de la construction des ouvrages soudés, se rappellera certainement que l'on estimait une électrode aux résultats de l'essai ordinaire de traction. A l'heure actuelle la plupart des électrodes employées dans l'exécution des soudures bout à bout atteignent lors des essais statiques la résistance du matériau et la dépassent même suivant la forme de l'éprouvette. La condition de résistance est devenue une question de forme de l'éprouvette.

Ce fut une véritable désillusion lorsque l'on eut connaissance de la résistance aux efforts dynamiques des assemblages soudés. On reconnut bientôt que non seulement le métal d'apport déterminait la capacité de résistance des cordons de soudure mais aussi la disposition (soudure bout à bout et soudure d'angle, grandeur et intensité de la zone influencée), l'exécution (électrodes minces ou épaisses, entailles) et la forme (cordons normaux, en congé ou bombés). Ces trois points de vue ne sont pas encore suffisamment pris en considération par les intéressés. La cause en est aux publications sur les essais effectués, qui ne donnent pas les conditions dont nous venons de parler de telle sorte que l'on ne peut en évaluer l'importance.

On peut se demander pour terminer s'il ne serait pas possible de trouver des baguettes dont la composition permettrait d'exécuter une zone de transition plus favorable et empêcherait la formation d'entailles.

Malgré la connaissance d'une quantité inimaginable de résultats d'essais, il est très difficile, si ce n'est impossible, de se donner une courbe de *Wöhler*, pour les différentes limites de tension et manières de sollicitations, de laquelle on puisse tirer avec exactitude les diagrammes des tensions admissibles dans la représentation de *Goodmann*[11] généralement employée. Ces diagrammes de tension varieront encore avec le nombre d'alternances choisi. Dans ce cas encore la forme de la section a une influence.

Alors que deux à trois millions d'alternances correspondent à un temps de service relativement long pour les poutres maitresses des grands ponts, cette

---

[10] Die elektrische Schweißung im schweizerischen Stahlbau. Congrès international des constructions métalliques, Liège 1930. Ossature métallique 1935, n° 11.

[11] *Dustin:* Considérations sur l'endurance des assemblages soudés. Revue universelle des mines, décembre 1935.

valeur n'est que restreinte pour les pièces du tablier. Il en résulte que l'on pourrait étudier ces rapports beaucoup mieux que jusqu'à présent. Ce serait un domaine intéressant pour les Institutions d'essai des matériaux que d'exécuter en collaboration des essais systématiques qui permettent de déterminer d'une façon complète les résistances fondamentales des matériaux. Il ne serait pas nécessaire d'essayer à côté des soudures bout à bout les joints en croix et les soudures d'angle appliquées à couvre-joints car ces différentes soudures sont mauvaises dans les assemblages tendus et ne sont pas employées dans la pratique. Il serait beaucoup plus souhaitable de faire des essais sur des reproductions de parties d'ouvrages, c'est-à-dire de forme correspondant à la réalité. Le dimensionnement des éprouvettes devrait être tel que l'on puisse déterminer très exactement les résistances qui sont employées dans la pratique (traction, compression, cisaillement, flexion, torsion, influence des formes de la section). Il faut encore déterminer exactement la *qualité d'exécution de la soudure.*[12]

Il faut encore remarquer qu'il serait nécessaire de faire des essais non seulement sur des soudures de joints ou d'assemblages mais aussi sur l'effet, suivant la grandeur et la forme, de soudures appliquées à une tôle continue dans les assemblages simples comme par exemple dans le cas de raidisseurs sur une poutre à âme pleine, de goussets de contreventements sur les membrures, etc. Le contrôle des coefficients de forme importants devrait être fait.

Pour démontrer que par exemple les joints en croix d'assemblages tendus ne sont pas mauvais parce que la soudure a été plus ou moins bien faite, nous avons fait exécuter des essais sur une éprouvette soudée et aussi sur une éprouvette de même forme coupée dans une seule tôle. Alors que dans les essais statiques les résultats sont plus défavorables pour l'éprouvette soudée, cette différence disparait dans les essais au pulsateur, ce qui démontre que ce type d'assemblage résiste en principe mal à la traction.[13] On peut en démontrer de même pour les éprouvettes assemblées avec couvre-joints soudés frontalement ou latéralement, ce qui est souvent donné comme essai déterminant dans les normes.

2° — *Formes de soudures.*

Pour mettre au clair les quelques questions énoncées plus haut, nous avons recherché, depuis quelques années, l'influence de la forme des soudures sur la résistance des assemblages et des barres. Pour étendre cet exposé nous parlerons aussi des essais effectués sur *l'influence de la position et de la forme des soudures d'angle déposées sur de l'acier 37 dans les assemblages de raidisseurs, de nervures, etc.*

Le programme des essais fut établi en juin 1934. On a prévu de rechercher l'influence, sur des fers plats sans joint, de 15 mm d'épaisseur, de soudures d'angle servant à fixer des raidisseurs et des renforcements. Ces essais furent

---

[12] *Thum:* Zur Frage der Formziffer: Z.V.D.I., 26. X. 1935.

[13] Les résultats sont ramenés aux surfaces de contact des soudures

essai statique	22 à 26	kg/mm²
P/2 : P	14	»
0 : P	10	»

cf. Rapport du 25 IV 1934.

effectués pour les trois types de renforcements et les trois types de soudures représentés à la fig. 10.

L'exécution exacte de la forme des soudures a présenté quelques difficultés. Afin de pouvoir comparer entre eux les résultats des essais, les soudures durent être usinées en quelques endroits. Après quelques essais préliminaires on entre-

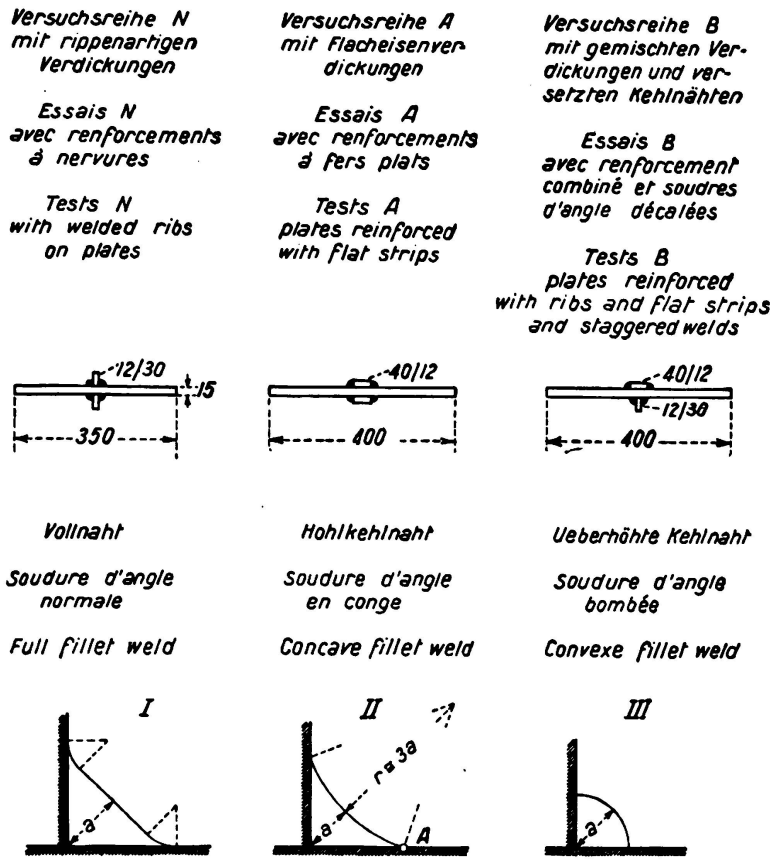


Fig. 10.

Types de renforcement et formes de soudures sur des barres sans joint.

prit des essais de fatigue à la traction pour déterminer la résistance aux efforts répétés non alternés variant de o à P et entre P et P/2. (Rapport du 14 avril 1936.)

Dans la résistance à la fatigue aux efforts répétés non alternés, 50 à 80 % de la surface de rupture peuvent être attribués à la fatigue et 50 % au maximum lorsque l'effort varie entre P et P/2.

Si l'on reporte les valeurs limites dans le diagramme des σ_o/σ_u, il s'en suit que la résistance aux efforts répétés non alternés pour une barre sans joint et pour un nombre d'oscillations de 1 million est de:

forme de soudure I	(normale)	15	kg/mm²
forme de soudure II	(en congé)	17 à 18,5	kg/mm²
forme de soudure III	(bombée)	13	kg/mm².

Si l'on usine la soudure de forme II, la résistance aux efforts répétés non alternés croit un peu, de telle sorte que la deuxième valeur indiquée est valable dans ce cas. De ces essais on peut tirer les conclusions suivantes:

La rupture à la fatigue part d'une extrêmité de la soudure. La position des soudures d'angle, l'une en face de l'autre ou décalées, s'est révélée d'importance secondaire. La forme du renforcement ne joue aucun rôle. Les causes de la diminution de la résistance de la barre sans joint sont les suivantes: déviation des lignes de force, localisation des tensions à la surface des extrêmités de la soudure, formation d'irrégularités au même endroit, modification de structure et tensions de retrait.

La résistance à la fatigue de l'acier 37 est fortement influencée par la forme de la soudure. Un raccord doux de la soudure à la barre a probablement des conséquences favorables. L'usinage des soudures améliore encore la résistance à la fatigue. Lorsque l'on a affaire à des sollicitations dynamiques il faut absolument éviter les soudures bombées.

Autant que possible il faut adapter la forme de la soudure à son but; il ne faut pas oublier dans les calculs, que la résistance à la fatigue de pièces sans joint sollicitées à la traction n'est que de 15 km/mm^2 dans les régions des soudures et n'atteint que le 70 à 80 % de la valeur d'une barre trouée d'un assemblage rivé. Lorsque le congé est bien exécuté, une telle soudure peut atteindre la résistance aux efforts répétés non alternés d'une bonne soudure bout à bout (16 à 18 kg/mm^2). Nous avons ainsi montré l'influence d'une soudure déposée sur une pièce sans joint ainsi que l'importance du coefficient de forme.

Lors d'une autre série d'essais, une soudure en congé résista mieux qu'une soudure bombée beaucoup plus forte, ce qui montre toute l'importance de la forme des soudures. Des soudures d'angle concaves de volume de 25 à 40 % plus petit donnent des résultats peu inférieurs à ceux des soudures normales.

3° — *Formes de construction.*

On peut aujourd'hui considérer comme certain que les ouvrages soudés subissent une réduction de la résistance à la fatigue par suite des tensions de retrait, des irrégularités et des modifications de structure engendrées par l'exécution des cordons de soudure. La conséquence en est un accroissement de matériau. Il en résulte que les applications de la soudure peuvent être réparties en classes caractérisées par la résistance à la fatigue.

Ces classes peuvent correspondre aux trois domaines d'application suivants: charpentes, ponts-route et ponts-rails.

Les charpentes sont en général peu exposées aux solicitations dynamiques bien que les grues, les machines, etc. engendrent des oscillations et des trépidations. Les ponts-route sont déjà plus exposés à la fatigue car l'influence des camions se fait de plus en plus sentir. Viennent ensuite les ponts-rails sur lesquels la vitesse et la grandeur des alternances de tension ont une grosse influence.

Quoique dans les prescriptions fédérales de 1935 il soit tenu compte de ces différences, par l'introduction de charges et de leurs coefficients de choc dans les bases servant au calcul des tensions admissibles, on ne peut pas montrer à première vue que la durée pendant laquelle les alternances acquièrent leur valeur critique n'est pas atteinte et que dans la troisième classe, les ponts-rails, les soudures doivent être exécutées de la façon la plus soigneuse et qu'il faut choisir les meilleures formes de soudure et de construction. Il ne faut pas exiger le bon marché et des dispositions «usuelles» et la marge qui est ménagée pour

la sécurité ne doit pas être négligée. Le fait qu'une construction tient ne donne aucune confirmation de la marge de sécurité. Cette dernière peut être totalement insuffisante sans que les intéressés puissent observer un indice quelconque de la faiblesse de l'ouvrage.

La place nous manque pour traiter plus largement la question des formes de construction. L'auteur a parlé plus en détails de cette question dans l'article cité ci-dessous.[14]

Il faudrait appliquer les principes suivants:

a) Il ne faut négliger aucun moyen de réduction des cordons de soudure et de leur section.

b) On peut éviter une accumulation de tensions dues à la chaleur et au retrait en prévoyant l'exécution simultanée de plusieurs soudures. Les soudures doivent être entourées de métal non influencé.

c) Autant que possible il faut employer les soudures bout à bout dans les joints et les placer aux endroits peu sollicités. Les matériaux destinés au soudage sont à réceptionner très soigneusement, surtout au point de vue des fissures assez fréquentes à la surface et aux bords des profilés, fissures qui peuvent avoir des conséquences très fâchenses.

d) Lorsque l'on doit exécuter un assemblage perpendiculairement aux lignes de force d'une barre (assemblage des longrines aux entretoises, des entretoises aux poutres maitresses, des contreventements aux membrures, etc.) il faudrait éviter toute transition brusque. Il faut arrondir les angles et usiner soigneusement les soudures.

e) Il faut éviter les parties de cordons intérieurement non soudées. Au lieu des cordons d'angle il est à recommander l'emploi de cordons en K qui permettent d'exécuter une soudure pénétrante.

f) Il faut éviter les assemblages excentriques, comme dans les constructions rivées.

g) Il faut s'abstenir d'employer simultanément les assemblages rivés et soudés, car il faut auparavant établir des règles en tenant spécialement compte des apparitions de fatigue.

h) Le retrait atteint 1 à 2 mm dans les joints bout à bout et peut atteindre $1\,^0/_{00}$ dans les constructions de poutres avec raidisseurs.

L'application soigneuse de ces principes permettra d'éviter des tensions coercitives.

IV. — *Exécution des ouvrages soudés.*

1° — *Généralités.*

On croit souvent que la construction des ouvrages soudés est plus simple que celle des ouvrages rivés et que l'adaptation du personnel et des installations d'atelier est simple. Cette conception est fausse lorsqu'il s'agit de soudures à haute résistance exigées pour les ouvrages soumis à de fortes sollicitations

[14] Die Schweiß- und Schneidverfahren im Stahlbau auf dem Gebiete des Eisenbahnwesens, Abschnitt Hoch- und Brückenbau. Rapport présenté au Congrès de l'acétylène, Londres 1936.

dynamiques. Le calcul, le projet, le dessin, etc. ne demandent pas moins de travail lorsque l'on procède avec exactitude. Il faut encore remarquer que les ouvrages soudés doivent être exactement calculés comme systèmes de l'espace car ils ne possèdent pas la propriété des ouvrages rivés de décharger les parties en danger par glissement des rivets d'assemblage. De toute façon il faut observer les règles établies, dans les soudures qui ne sont pas sollicitées dynamiquement, en tenant compte d'une part de la formation des intéressés et d'autre part du fait que les soudures doivent être exécutées avec le plus grand soin à cause des conséquences défavorables qui peuvent résulter d'une mauvaise exécution.

2° — *Contrôle des installations, réception des électrodes.*

Lorsque l'on se décide pour une construction soudée, on ne doit pas s'éviter la peine de contrôler l'installation de l'atelier qui s'offre à exécuter le travail. On se fera accompagner d'un ingénieur qui connait le domaine de l'electricité et qui contrôlera les connexions et la capacité des conduites des installations de soudage (conduites, câbles, transformateurs, prises de terre, etc.). Une installation pratique et sûre pour le réglage par le soudeur de l'intensité de courant est de grande importance pour que la baguette à souder fonde suffisamment et régulièrement. Il ne faudrait confier des travaux de soudage importants qu'à des ateliers pouvant subir un contrôle sévère et qui peuvent garantir que leurs installations seront maintenues en bon état.

Il est en outre très important que l'atelier de soudage possède les grues et les dispositifs rotatifs nécessaires afin de pouvoir exécuter les soudures dans la position la plus favorable, ce qui est nécessaire pour l'obtension de formes appropriées.

Sur le chantier il faut limiter l'emploi des soudures au plafond, à la reprise à l'envers de la racine des soudures en V.

Un autre point pour le contrôle du travail de soudure est *la réception des électrodes ou baguettes à souder.* On peut démontrer que les baguettes à souder représentent un critère qui garantit la régularité. Des erreurs sont toujours possibles, c'est pourquoi il faudrait adopter comme règle de réceptionner les baguettes à souder, c'est-à-dire de contrôler leurs dimensions et leur enrobement et de les examiner au point de vue de la technique des matériaux et de la soudure. Seulement lorsque les résultats sont favorables, ces électrodes devraient être admises.

Un essai complet devrait s'étendre à environ 10 000 électrodes ou à la longueur correspondante de baguettes à souder. Dans les ateliers où l'on utilise différents types de baguettes à souder, il faut faire très attention à ce que l'on utilise exclusivement la marque prévue. Seule une direction d'atelier aimant l'ordre pourra remplir ces conditions.

3° — *Contrôle des soudeurs.*

On a beaucoup écrit sur le *contrôle des soudeurs.* Nous sommes d'avis que le contrôle habituel par prélévement de quelques éprouvettes de soudure n'a pas une grande signification. Pour des raisons pratiques et des raisons de forme on ne peut pas supprimer ces contrôles. Premièrement on ne peut pas employer n'importe quel soudeur et secondement le prélévement d'éprouvettes compliquées

a toujours une influence favorable. Des cours et des discussions continues avec les soudeurs avant et pendant le travail par une personne de la branche et expérimentée qui suivrait le travail auraient une influence favorable sur la qualité des travaux de soudage. Souvent il suffirait d'une simple explication. Il faudrait faire plus que jusqu'à présent pour la formation théorique et pratique des soudeurs. Il serait souhaitable que l'on crée une institution pour la formation de bons soudeurs dignes de confiance.

4° — *Contrôle des travaux de soudage.*

En ce qui concerne le contrôle des travaux de soudage il existe une méthode tout-à-fait adéquate qui est celle des rayons X. Les autres méthodes, électromagnétiques et acoustiques, ne sont pas sûres. Le perçage et le découpage d'éprouvettes ne donnent que des résultats partiels et ne permettent pas de tirer des conclusions sur la qualité moyenne des soudures. La combinaison des rayons X et du découpage d'éprouvettes donnent les meilleurs résultats. L'application de ce procédé est cher et demande beaucoup de temps et les trous que l'on a fait peuvent engendrer dans certains cas des tensions résiduelles très défavorables. L'emploi des rayons X donne d'excellents résultats pour les soudures bout à bout lorsqu'une personne expérimentée exécute ce travail. Il est difficile de prendre les radiographies lorsqu'il s'agit de soudures d'angle ou d'autres soudures, car l'épaisseur de l'acier est dans ces cas très variable. L'application des rayons X se perd car on ne possède jusqu'à aujourd'hui aucune donnée sur les rapports entre l'image et la résistance des soudures.[15] Le procédé des rayons X ne présente pour le moment que le seul avantage d'influencer les soudeurs en ce sens qu'il permet de découvrir les fautes grossières sans attaquer la soudure, ce qui incite à un travail soigné. Malheureusement ce procédé est cher et il est actuellement impossible de contrôler ainsi toutes les soudures.[16]

Les soudures restent donc, dans le vrai sens du mot, un travail de confiance. Il ne faut par conséquent exercer aucune pression sur les soudures pour une accélération du travail lorsqu'il s'agit de travaux importants. Il faut proscrire le salaire aux pièces. Dans les ouvrages soumis à de fortes sollicitations dynamiques on doit attacher une grosse importance aux soudure pénétrantes qui exigent que l'on ouvre et que l'on nettoye d'un côté la racine déjà soudée. Il est nécessaire de faire contrôler ces différentes étapes de travail. La mise à jour des fissures, des fautes et des négligences est rendue très facile par le jet de sable. Il serait recommandable de prescrire ce procédé de nettoyage.

---

[15] Un essai spécial sur une soudure en K donne une résistance aux efforts répétés non alternés de:

14 à 16	kg/mm²	pour un travail soigné
12 à 14	»	pour un bon travail
9 à 11	»	pour un mauvais travail.

La comparaison des photos aux rayons X permet de reconnaitre cette graduation mais non d'une façon tout-à-fait concluante.

[16] Eng. N.-Record, 15. XI. 34. Lors de la construction de l'usine hydro-électrique du Boulderdam on a photographié aux rayons X toutes les soudures des 45 000 t de conduites forcées (env. 120 km de soudures). L'appréciation se fit sur la base du A. S. M. E. boiler code radiographs.

The Engineer, 19. IV. 35, *Pullin:* Radiology in the Welding Art.

Résumé.

1° — Dans le présent rapport, après une courte introduction sur la définition des tensions dues à la chaleur et au retrait, l'auteur décrit une installation pour le mesurage de ces tensions. Il est parlé ensuite des résultats des mesures exécutées sur 4 ouvrages ainsi que de la signification et de l'effet des zones influencées par le soudage qui peuvent avancer la rupture statique ou la rupture à la fatigue.

2° — Les mesures démontrent que les tensions dues à la chaleur et au retrait ont une grosse importance. On peut lutter là-contre en diminuant les sections des soudures et en évitant les accumulations de soudures.

3° — Les zones influencées par le soudage et leurs effets sur les parties de la construction ne sont pas assez expliquées. Il est urgent d'entreprendre des recherches systématiques sur les zones influencées elles-mêmes ainsi que sur les influences du genre de courant, de la composition des électrodes, du diamètre des electrodes (intensité du courant) et des formes des sections des pièces.

4° — Il y a peu de chances que les tensions de retrait disparaissent avec le temps sous l'effet du trafic, ainsi que cela a été dit souvent, ce qui serait le cas s'il se produisait des surtensions qui pourraient avoir comme conséquence des déformations indésirables et dangereuses ou même des fissures.

5° — L'art de la construction des ouvrages soudés consiste en la conservation de la résistance à la fatigue de l'acier, c'est-à-dire dans le choix des formes de construction et de soudure appropriées qui évitent les effets d'entailles et les transitions brusques. Les zones influencées ne doivent pas se trouver dans les endroits les plus sollicités et doivent être entourées d'une masse suffisante de métal non influencé. Si l'on veut conserver une forme de soudure déterminée, il faut dans certains cas usiner les cordons. Nous aurons dans ce cas des soudures lisses qui permettront l'application d'une peinture plus résistante, un entretien plus facile et plus de facilité pour la mise à jour des fissures.

6° — On ne peut pas travailler *trop* soigneusement dans l'exécution des ouvrages soudés. L'idée que l'on peut remplacer le rivetage par un soudage *bon marché* est fausse. La soudure, en tant que procédé beaucoup plus compliqué que le rivetage, exige un contrôle continu aussi bien de la direction de l'atelier que de celle de la construction. Le contrôle prend beaucoup de temps et doit être exécuté dans certains cas par des gens du métier spécialisés. Pour obtenir un travail exact, il faut dessiner les cordons de soudure.

7° — En exigeant le contrôle des soudeurs et de leur travail on n'a pas encore pris toutes les précautions nécessaires. On doit aussi faire en sorte qu'il soit possible d'exécuter un bon travail en contrôlant les électrodes, les installations de soudage et leurs accessoirs, l'équipement des soudeurs et leur qualification. Les soudeurs doivent être orientés sur la portée de leur travail et ils doivent être dirigés et continuellement surveillés par une personne qualifiée.

8° — Ce n'est que lorsque toutes ces conditions seront remplies que l'on pourra être assuré de la bonne qualité des ouvrages soudés. Il serait souhaitable que ce explications donnent lieu à un nouvel examen de toutes les questions qui se posent avec l'introduction de la soudure.

Leere Seite
Blank page
Page vide

IIIb 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'austenite qui existe après la solidification se transforme en formes de structure intermédiaire: martensite, troostite, sorbite pour devenir à l'état définitif de la perlite au 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 austenite — 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'éxpérience 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 ^{0} 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 (6e 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 croit, 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 (7e 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.

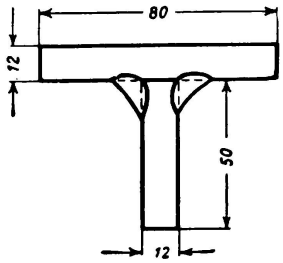


Fig. 1.
Essai sur la prédisposition à la fissuration des électrodes.

2° *Processus d'extension et de retrait.*

Les influences de l'échauffement, en tant que déformations sous forme de raccourissements, 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 uniformement 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 a L'Ecole polytechn. de Hannovre 1935.

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

Le retrait so 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).

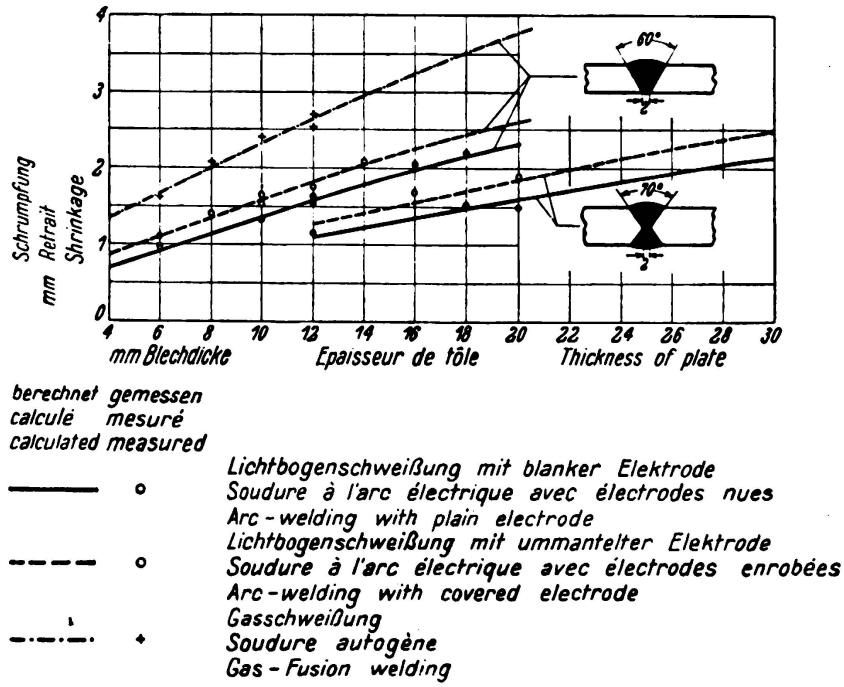


Fig. 2.

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 croit 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 comformation 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 très 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

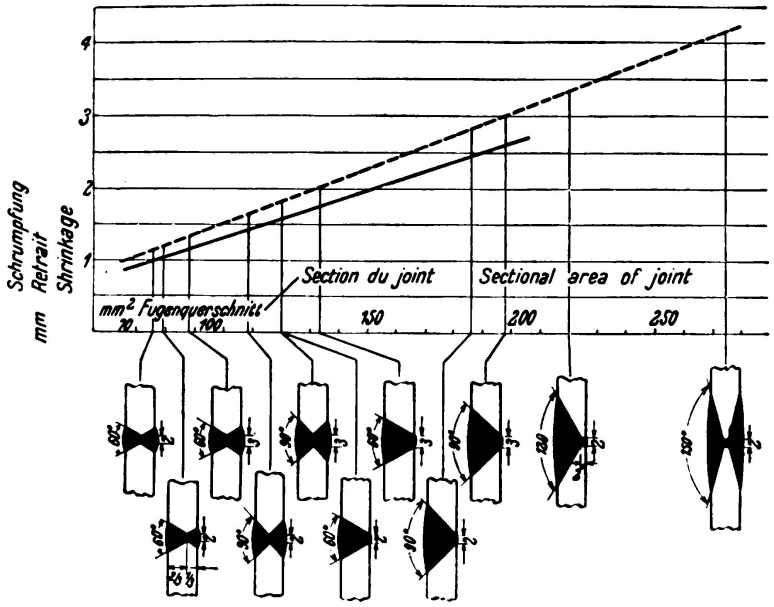


Fig. 3.

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.

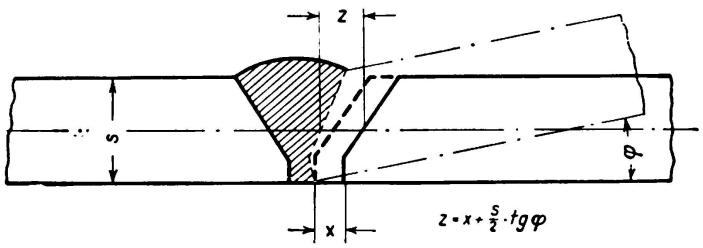


Fig. 4.

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'angle[4] 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.

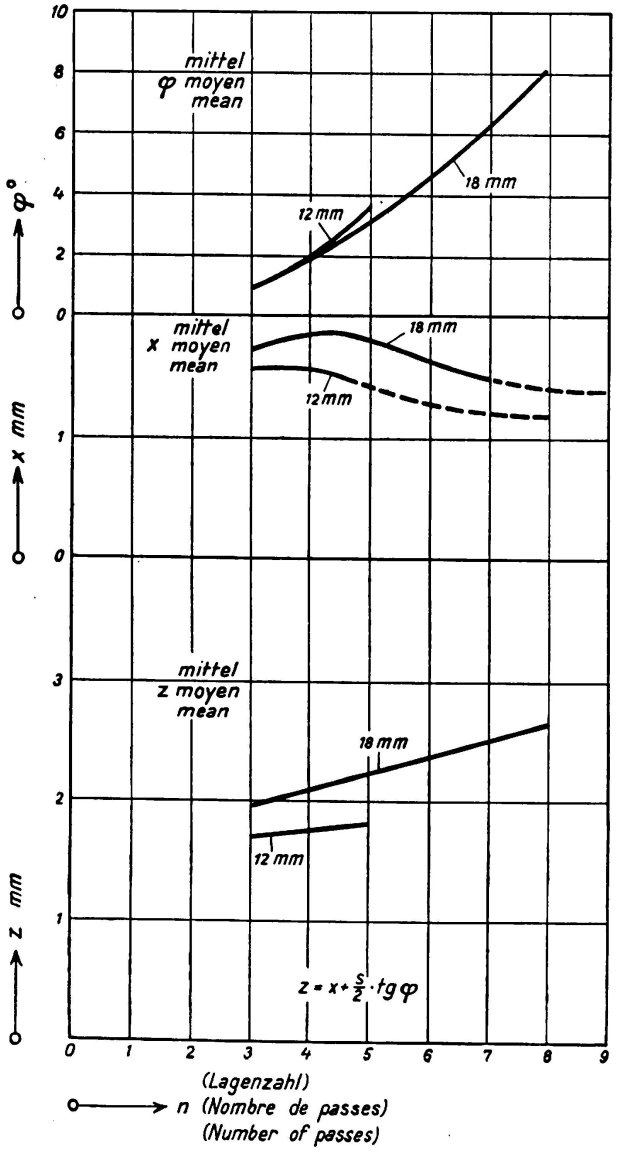


Fig. 5.

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° C pour croître alors relativement vite

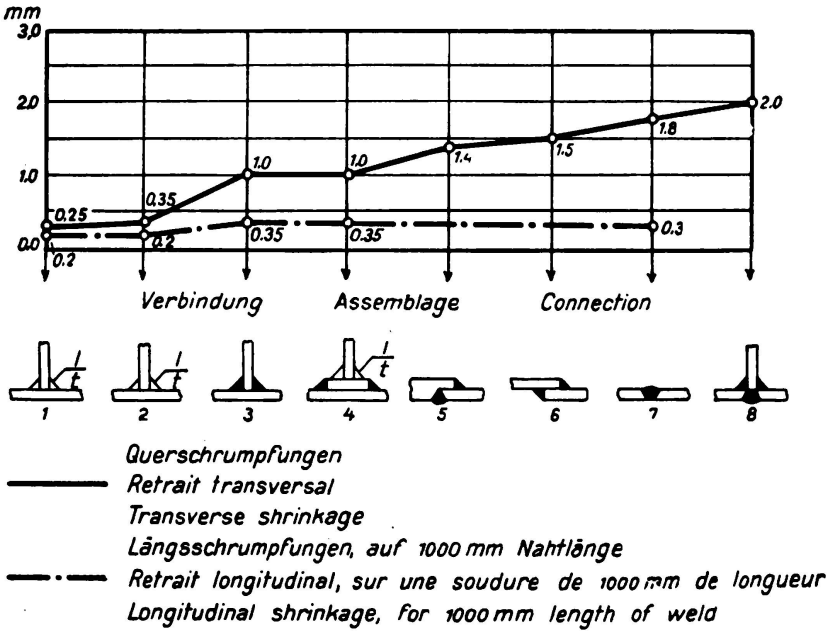


Fig. 6.

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

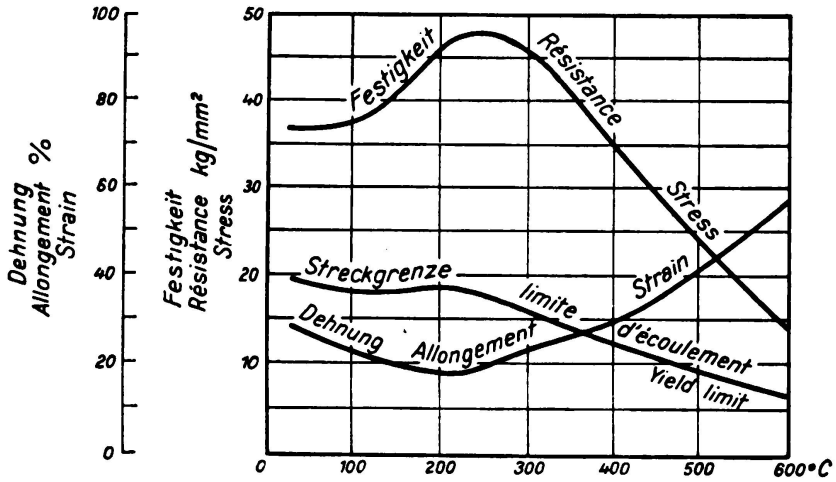


Fig. 7.

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

C = %; 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.

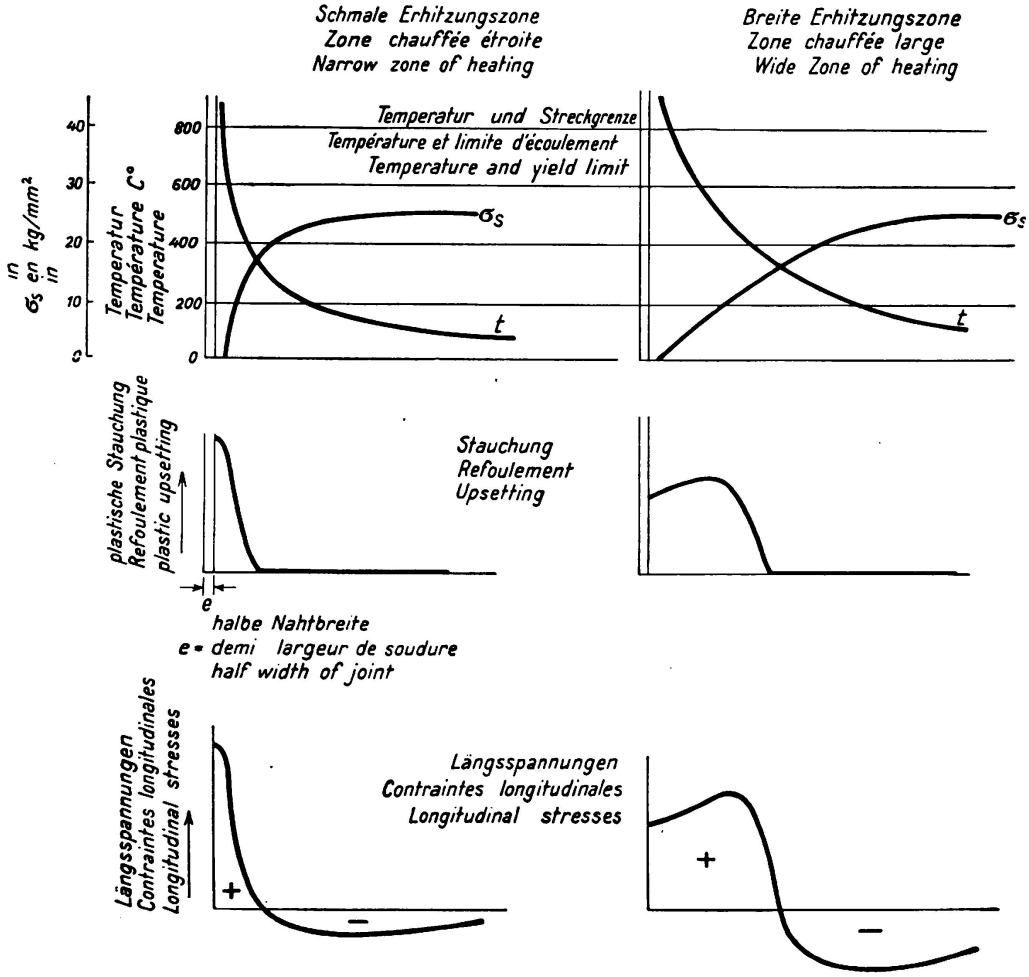


Fig. 8.

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 q'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

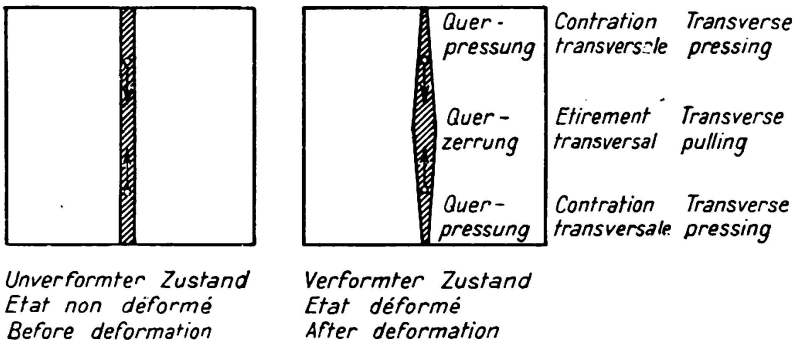


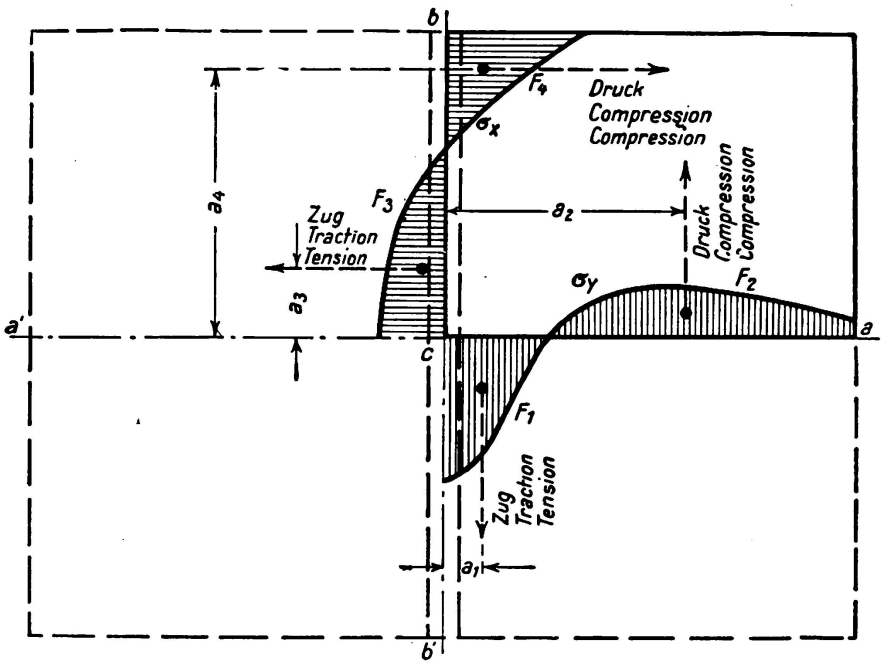
Fig. 9.

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.



$F_1 = F_2; F_3 = F_4$

$F_1\, a_1 - F_2 \cdot a_2 = F_3 \cdot a_3 - F_4\, a_4$

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. Grüning:* Schrumpfspannungen in autogen geschweißten Teilen. Autog. Metallbearbeitung 27 (1934), p. 259/266.

G. Grüning: 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

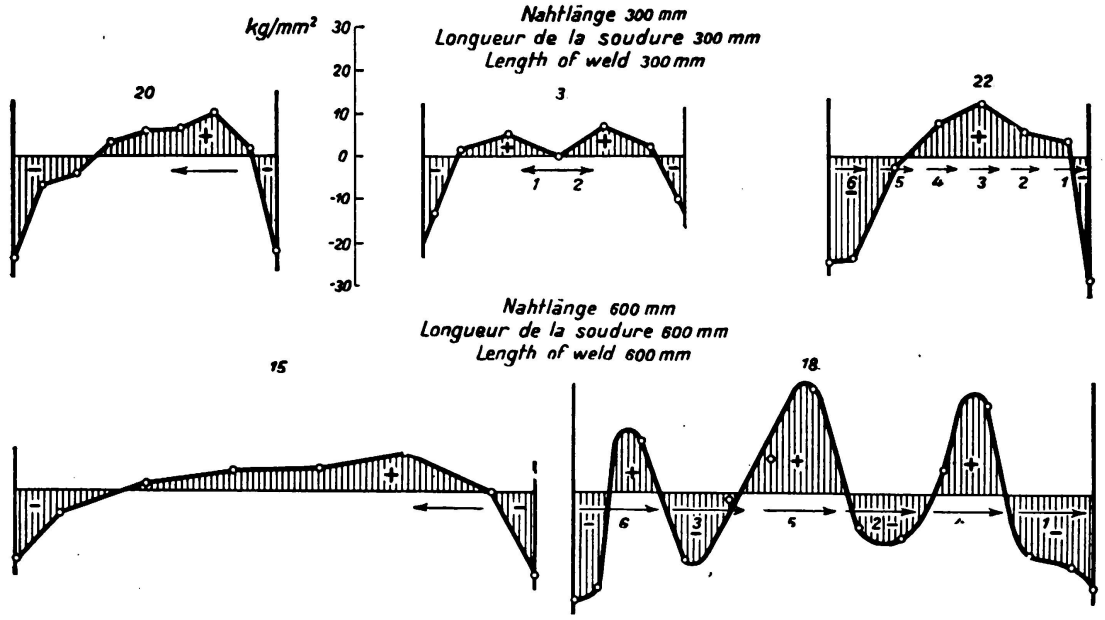


Fig. 11.

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° — *Les fixations transversales.*

a) *Fixations transversales extérieures et intérieures.*

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

1° par des *fixations extérieures.* Par fixation extérieure nous entendonsl 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° 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

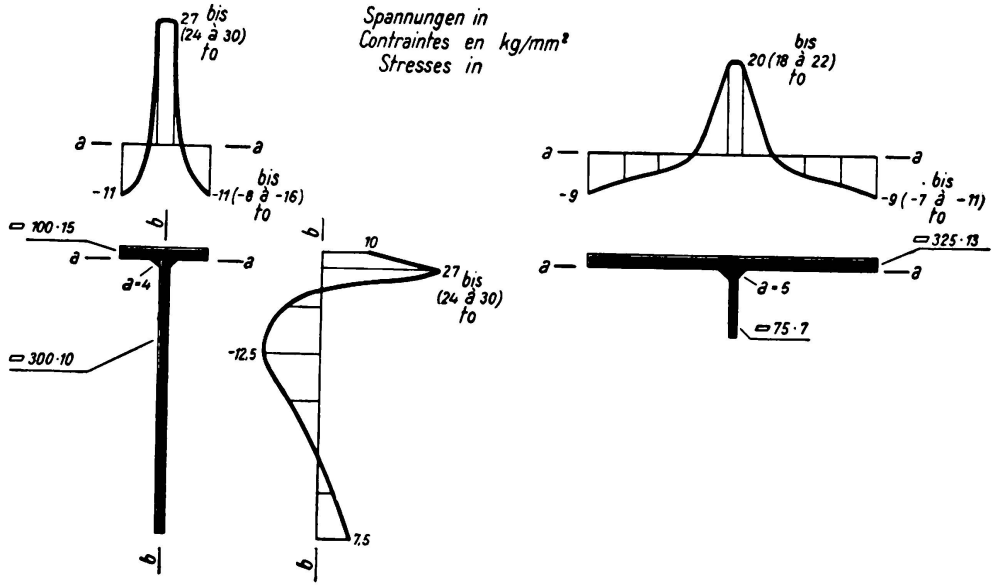


Fig. 12.

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° Les fixations agissent comme un encastement extérieur dans *l'exécution des soudures d'angle.*

4° *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° 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 dependent 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 reduites 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 extrèmes 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

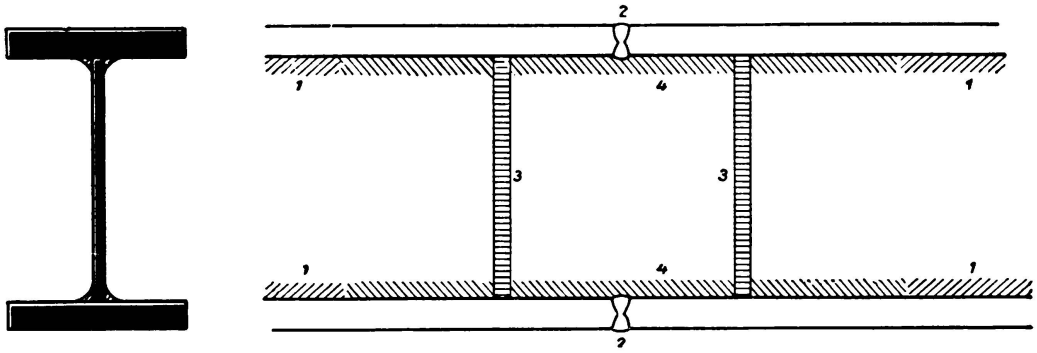


Fig. 13.

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 parant 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

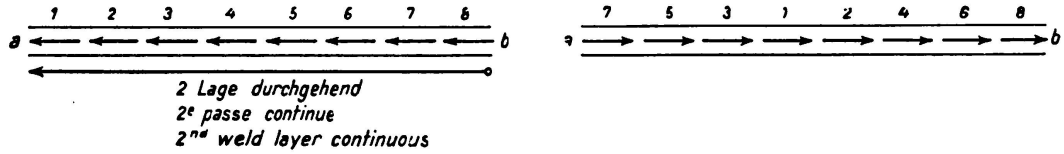


Fig. 14.

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

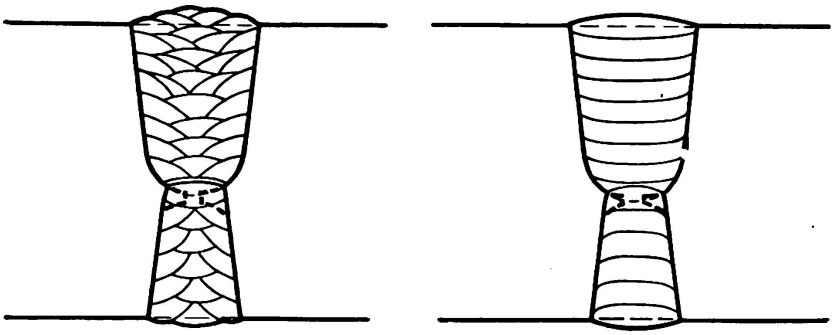


Fig. 15.

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 engendent 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

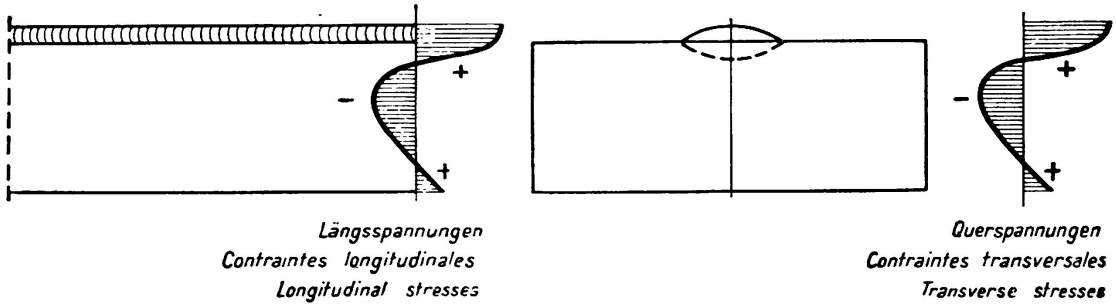


Fig. 16.

Allure des contraintes longitudinales et transversales lors de l'exécution d'une soudure appliquée.

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 pas 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° *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° 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

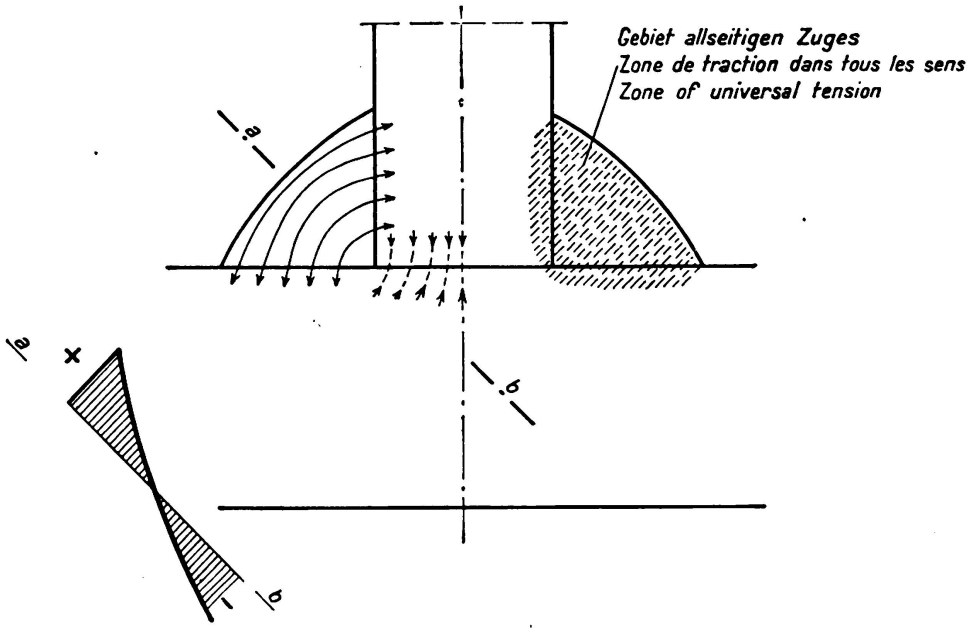


Fig. 17.

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 a 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 rectilique 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

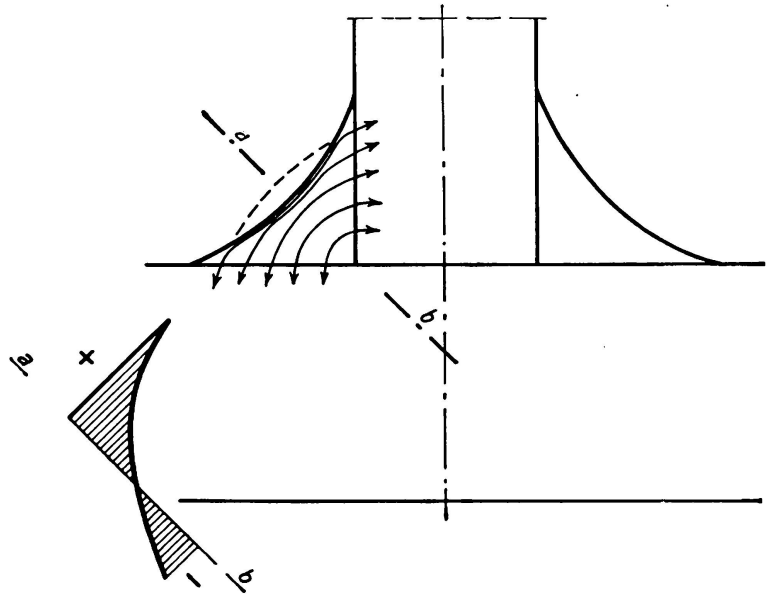


Fig. 18.
Effet de retrait dans les soudures à concavité accentuée.

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).

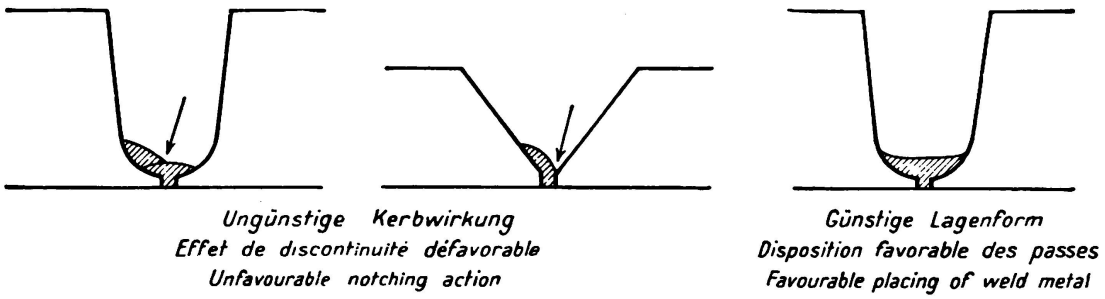


Fig. 19.
Danger de fissuration pour une disposition défavorable des passes.

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

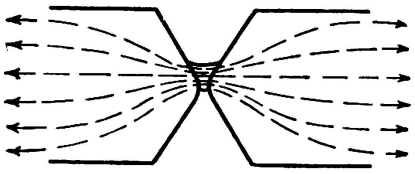


Fig. 20.
Mise en danger des passes situées à la racine par suite de l'effet défavorable des forces.

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 plaques[11] 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

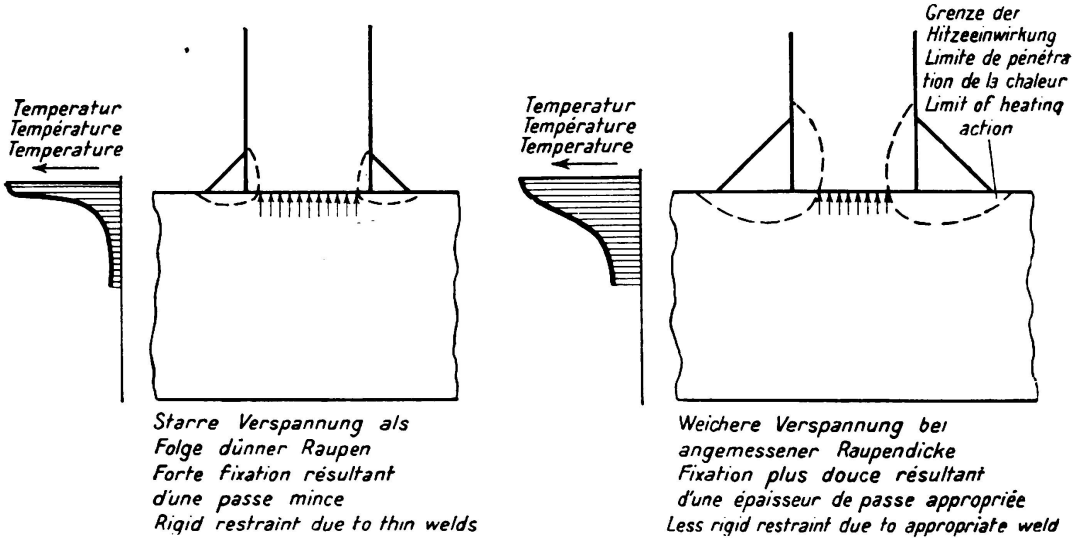


Fig. 21.
Effet de fixation dans les soudures d'angle.

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 difficultées 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 empèchent 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° *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° *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° *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 parait 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° Le *chauffage subséquent* peut être employé pour égaliser des contraintes fortement irrégulière 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 a 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. Gräning:* 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 redressage. *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 surcontraintes 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 triangulaine. 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

IIIb 4

Projet et exécution des ouvrages soudés.

Ausbildung und Herstellung geschweißter Bauten.

Design and Execution of Welded Structures.

Dr. Ing. St. Bryła,
Professor an der Technischen Hochschule, Warschau.

Dans chaque assemblage soudé il se produit dans la soudure et le métal de base des tensions secondaires et des tensions de retrait. Les sollicitations à l'intérieur de la soudure sont engendrées par la différence de température entre la soudure et la zone avoisinante. Elles sont indépendantes de la fixation des éléments à souder et se produisent toujours dans la soudure même lorsque les parties à souder ne sont pas fixées entre elles. La cause en est dans l'échauffement et dans le retrait de la zone échauffée. Le métal pas ou peu chauffé qui entoure la soudure empêche un retrait quelconque de cette dernière au cours du refroidissement. Dans le métal des pièces à assembler il se produit des tensions engendrées par l'encastrement de ces pièces au moyen d'étaux à main destinés à empêcher le déplacement au cours du chauffage. Plus la zone échauffée est grande, plus petites sont les tensions dans la soudure et plus grandes les tensions dans la construction. Lors de l'emploi de la soudure autogène les tensions dans la construction sont plus fortes et lors de l'utilisation de la soudure à l'arc électrique les tensions dans la soudure. Ces tensions peuvent être très grandes et atteignent souvent la limite d'écoulement. Cependant la limite d'écoulement peut se relever dans une proportion appréciable par suite de la résistance à la déformation engendrée par le processus irrégulier de retrait.

L'épaisseur des pièces à souder a une grosse influence sur la grandeur des tensions internes. Les contraintes ne croissent pas en rapport direct avec l'épaisseur des éléments mais cependant dans une forte proportion. Les contraintes de retrait croissent aussi avec la longueur de la soudure. Plus le cordon de soudure est long, plus petite est la régularité de la répartition des tensions et par conséquent la résistance de la soudure. Les essais exécutés par l'auteur et le Dr. ing. *Poniz* à Lwów ont démontré que les tensions aux extrémités de la soudure sont beaucoup plus grandes (souvent deux fois plus grandes) que les tensions au milieu du cordon.[1] Pour une certaine longueur du cordon de soudure on obtient une limite audessus de laquelle la résistance de la soudure reste pratiquement constante. Les tensions de retrait n'agissent que dans de certaines mesures et ce n'est que lorsque la poutre commence à travailler que la tension totale est atteinte dans l'assemblage. L'influence importante et

[1] Les tensions se répartissent de même dans les assemblages soudés.

même dans certains cas dominante des contraintes de retrait montre que des apparitions semblables se présentent dans les cordons interrompus où les soudures de bord subissent de beaucoup plus grandes contraintes que les soudures médianes. Toutefois la répartition des tensions est beaucoup plus régulière dans les cordons de soudure interrompus.

Cependant ces fortes contraintes dans les soudures ne sont pas dangereuses; avant tout, parce que les forces extérieures n'agissent en général que dans une direction et les contraintes de retrait dans trois et en outre par suite des propriétés plastiques de l'acier. Comme démonstration nous pouvons invoquer les résultats de tous les essais qui furent exécutés jusqu'à la rupture ainsi que la qualité des soudures bien exécutées. Même lorsqu'il se produit un craquement de soudure — ce qui arrive que très rarement — il ne faut pas en chercher la cause dans les contraintes de retrait mais dans la fragilité des soudures qui sont exécutées d'un matériau non approprié ou d'une manière défectueuse.

Ainsi que le démontrent nos essais, une soudure se comporte au mieux lorsqu'elle possède des propriétés aussi semblables que possibles à celles du métal de base et en première ligne une limite d'écoulement identique. On ne peut par conséquent pas toujours recommander l'emploi d'électrodes constituées d'un matériau possédant une résistance beaucoup plus grande que celle du métal à souder. Il s'agit beaucoup plus d'exécuter des soudures ayant les mêmes propriétés élastiques. On peut par conséquent recommander l'emploi d'électrodes enrobées qui donnent de bien meilleurs résultats que celles sans enrobage.

Il existe plusieurs méthodes d'amélioration des soudures dans le but de réduire les contraintes internes. Tous les essais que nous avons faits dans ce sens sont plutôt négatifs car le travail exécuté n'est pas rentable. La réduction des contraintes de retrait est relativement restreinte et par conséquent n'a pas de sens lorsque l'on emploie ces méthodes. Si l'on tient compte de la non-nuisibilité souvent démontrée des contraintes de retrait on ne peut pas justifier une réduction postérieure de ces dernières. Ces méthodes ont plutôt une autre signification, par exemple l'écrouissage engendre une structure à petits grains et par conséquent augmente la capacité de résistance du matériau. Une soudure de deux côtés agit aussi dans une certaine mesure comme un écrouissage et permet d'éliminer les fautes de soudage. Il en est de même des différentes passes lors de l'emploi de la soudure à l'arc électrique, les passes déjà exécutées sont écrouies par les suivantes.

Les contraintes de construction (de montage) sont les sollicitations internes qui se produisent dans le métal de base pendant le soudage par suite de la fixation des pièces à souder au moyen d'étaux à main.

Alors que par l'emploi de ces derniers, nous réduisons à un minimum les déformations de la construction ou même nous les éliminons complètement, ces étaux engendrent dans les pièces à souder des contraintes internes qui sont proportionnelles aux déformations et aux déplacements à entraver. La grandeur de ces déplacements est dépendante de la grandeur des pièces à chauffer et à souder. C'est pourquoi les contraintes de construction croissent d'une façon correspondante à ces facteurs.

Les contraintes de construction n'ont aucun caractère spatial et forment des

systèmes plans et même linéaires. Elles n'engendrent aucun accroissement de la limite d'écoulement du matériau et leurs valeurs sont beaucoup plus faibles que les contraintes de retrait dans la soudure.

Quoique les contraintes de retrait ne présentent en elles-mêmes aucun danger dans un métal approprié et une exécution satisfaisante des soudures nous nous efforçons cependant dans toutes les constructions métalliques d'éliminer autant que possible les tensions secondaires. Cette même tâche existe aussi pour les constructions soudées et leurs contraintes de retrait. Il est recommandable de souder les éléments de telle sorte qu'ils n'aient si possible d'avance aucune contrainte. On doit considérer la propriété de diverses influences qui, dans une certaine mesure, s'éliminent mutuellement. Ceci se produit par exemple dans des soudures épaisses (voir ci-dessus) où cependant la détermination des diverses grandeurs des influences n'est pas tout-à-fait claire. Les soudures minces doivent en outre être plus longues, ce qui au point de vue des contraintes de retrait peut être considéré comme un facteur négatif. Il ne faut dès lors pas s'étonner de la variété des opinions relatives à l'application de soudures épaisses ou minces. Sur la base de nombreux essais nous croyons plutôt que des soudures minces sont meilleures et plus résistantes; elles sont en outre meilleur marché. L'influence négative de leur inévitable longueur plus grande peut être éliminée en les exécutant en tronçons de courte longueur et en remplissant dans la suite les fentes qui probablement subsistent. Une deuxième indication qui est toujours valable consiste en la nécessité d'employer des électrodes constituées d'un métal autant que possible semblable au métal de base et principalement au point de vue de l'élasticité. L'accroissement de la résistance, quoique très important, n'a cependant qu'une signification relativement plus faible. On peut recommander l'emploi d'électrodes enrobées. Troisièmement la forme de la soudure doit être si possible douce et sans angle.

D'autres influences réduisant les contraintes de retrait doivent être considérées comme d'importance secondaire.

Les déformations engendrées par les contraintes de construction sont plus importantes dans leurs effets que les contraintes de construction elles-mêmes. Je ne suis pas d'avis qu'il faut à tout prix réduire toutes les déformations. Les étaux à main sont cependant toujours nécessaires, car le caractère des éléments à souder constitués de plusieurs pièces les exige. Les poutres à âme pleine, les membrures des poutres réticulées et leurs éléments soudés ne possèdent aucune cornière qui de même que dans les constructions rivées, puisse servir de pièce de liaison et déterminer en même temps la position des tôles les unes par rapport aux autres. Ceci est souvent un des facteurs qui permettent une économie de matériau dans les constructions soudées mais d'autre part l'assemblage des pièces est rendu par le fait même plus difficile et il est nécessaire d'employer des étaux à main. Il s'ajoute encore une tendance aux déformations résultant des contraintes de montage de telle sorte que pour la mise en place des sections, des étaux sont encore nécessaires pour la réduction de ces déformations.

C'est par là qu'est déterminée la forme et la construction des étaux. Ces derniers doivent s'adapter exactement à la forme des éléments rassemblés et de telle façon que l'on puisse introduire les pièces. Pour cette raison les étaux sont généralement prévus avec pièces qui se resserrent — en général un fer rond

avec pas de vis et boulon —. Comme exemple de tels étaux on peut citer ceux qui furent employés en 1928 déjà pour l'assemblage des entretoises et des membrures lors de la construction du pont sur la Studwia à Lowicz (Fig. 1) et qui se sont montrés si avantageux qu'on a employé de mêmes étaux dans la construction du pont de la route Wiessbad—Frankfurt a. M. (1935 N.). Comme deuxième exemple nous pouvons donner ceux qui furent utilisés lors de la construction de la Caisse d'épargne des postiers à Varsovie (Fig. 2). La Fig. 3

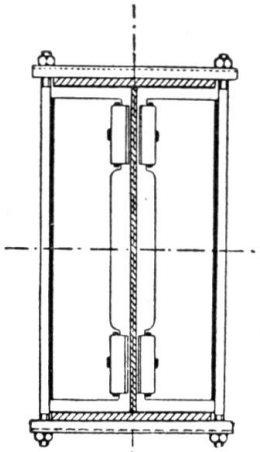


Fig. 1.

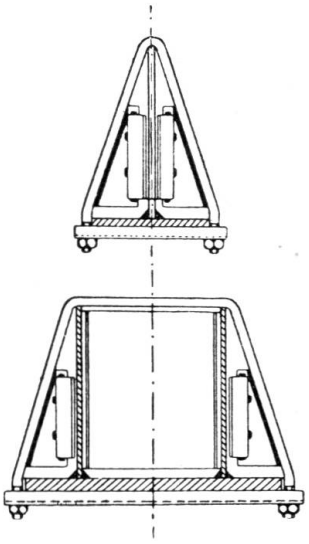


Fig. 2/3.

représente encore un autre exemple. Pour terminer les Fig. 4 et 5 représentent des étaux plus complets mais aussi plus compliqués qui furent employés lors de

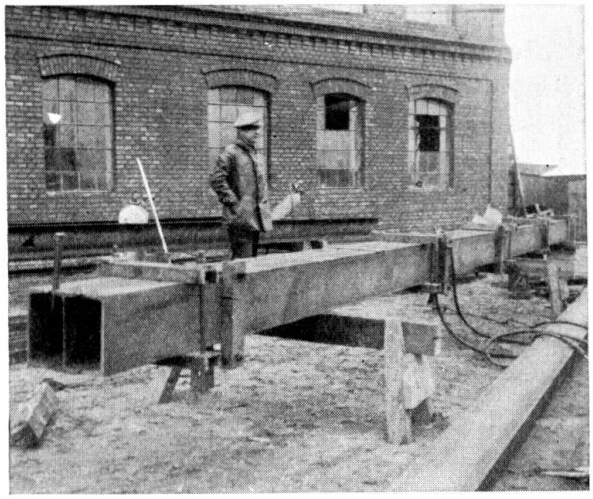


Fig. 4.

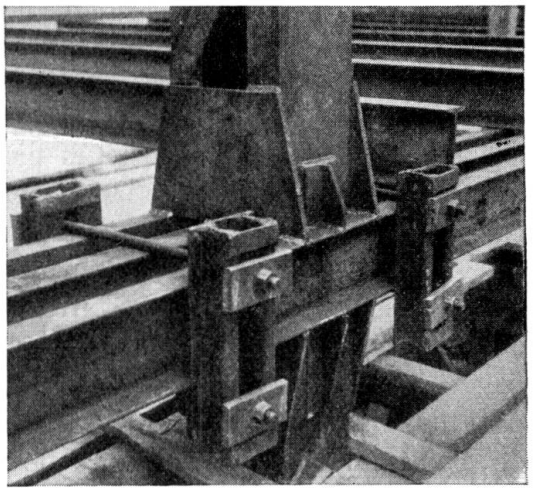


Fig. 5.

la construction de la Bibliothèque Jagellon à Cracovie où il s'agissait spécialement de formes tout-à-fait lisses et où il fallait éliminer totalement toute déformation.

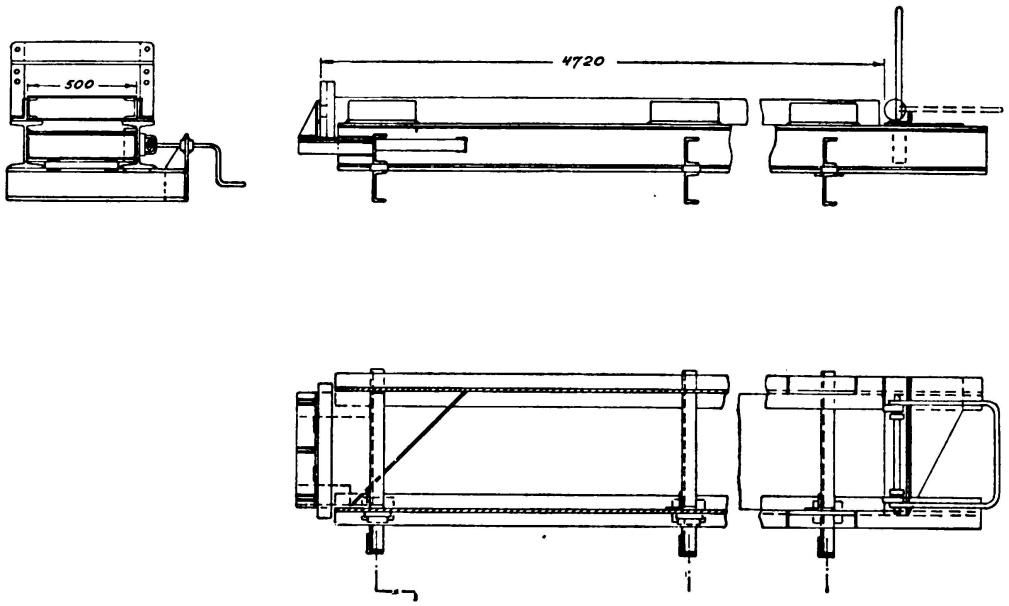


Fig. 6.
Formes pour l'éxecution des colonnes de la Bibliothèque Jagellon à Cracovie

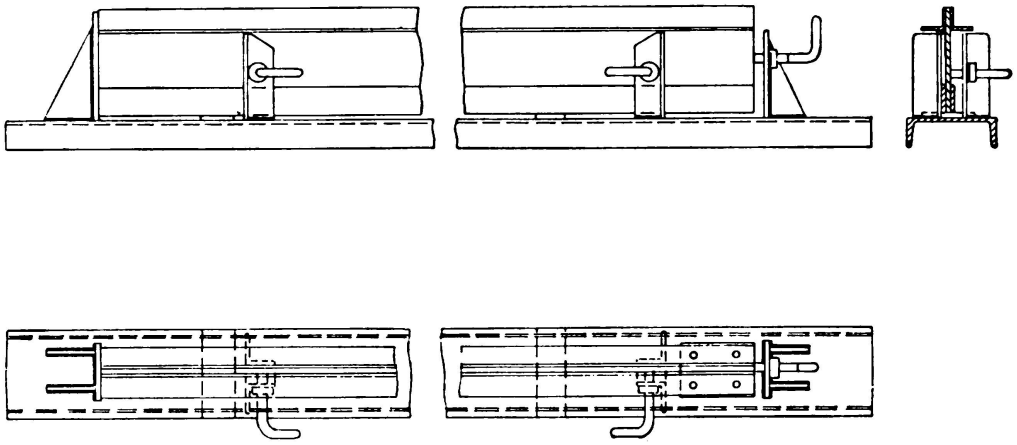


Fig. 7.
Etaux pour les sommiers et les poutres de la Bibliothèque Jagellon a Cracovie

Résumé.

Après avoir parlé des tensions secondaires et des tensions de retrait l'auteur expose les moyens de les réduire. Les étaux jouent un grand rôle à ce point de vue, c'est la raison pour laquelle l'auteur décrit différents types d'étaux utilisés en Pologne.

Leere Seite
Blank page
Page vide

IIIb 5

Retraits dans les poutres réticulées soudées.

Schrumpfungen in geschweißten Fachwerken.

Shrinkage of Welded Trussed Structures.

Dr. sc. techn. S. Mortada,
Brückenbau-Ingenieur der Ägyptischen Staatsbahnen, Kairo.

Le retrait est une modification dans une pièce de construction, modification engendrée par la résistance opposée par les parties métalliques à la contraction des zones chauffées, lors du refroidissement. Il en résulte des allongements, des ondulations et des torsions. Les apparitions de retrait et les contraintes internes qui en résultent exigent une attention spéciale dans les poutres réticulées soudées, car la résistance de tels systèmes porteurs, spécialement dans le cas de surcharges dynamiques, peut être fortement mise en danger par les contraintes résultant du soudage. Nous avons effectué dernièrement des mesures de retrait sur une poutre d'acier normal; la poutre fut d'abord auscultée complètement aux points de vue statique et dynamique, au Laboratoire fédéral d'essai des matériaux annexé à l'Ecole polytechnique fédérale à Zurich.

Le but de ces mesures était la détermination du genre et de la grandeur des retraits tels qu'ils se présentent dans les ouvrages soudés terminés.

La poutre d'essai avait une longueur de 6 m et une hauteur de 1,5 m; elle était dimensionnée pour une surcharge de 50 t agissant au milieu de la poutre.

La membrure inférieure était constituée de deux cornières 80 · 80 · 12, la membrure supérieure de deux cornières 100 · 100 · 12 avec âme de 100 · 12. Toutes les diagonales étaient constituées de 2 ⊤ N° 14. Les liaisons d'une moitié de la poutre étaient exécutées avec des cordons en V de 12 mm avec reprise à la racine, ceux de l'autre moitié de la poutre par contre, avec des soudures frontales ou des soudures d'angle de longueurs et épaisseurs différentes.

Les assemblages d'une diagonale étaient constitués de soudures d'angle de 8 mm d'épaisseur et de 27 cm de longueur; l'autre diagonale par contre était assemblée au moyen de soudures épaisses de 11 mm et longues de 19 cm.

La membrure supérieure avait deux cordons en V de 12 mm, qui s'étendaient sur une longueur de 3,60 m. Les assemblages des diagonales et des goussets à la membrure supérieure, ainsi qu'au point milieu de la membrure inférieure, étaient assurés par deux soudures en V, longues de 60 cm et épaisses de 12 mm. Les épaisseurs de soudures que nous avons indiquées étaient nécessaires pour la transmission des efforts. On peut les considérer comme relativement grandes, par rapport aux petites dimensions de la poutre d'essai. On pouvait s'attendre par conséquent à de forts retraits, c'est pourquoi l'on a employé tous les moyens

possibles pour empêcher leur formation; il était cependant impossible de les éliminer complètement.

On utilisa des électrodes enrobées car elles sont préférables au point de vue métallurgique, quoiqu'elles augmentent un peu le coefficient de retrait. L'intensité du courant électrique fut maintenue haute, afin d'accroître la vitesse de soudage. On employa pour le soudage des électrodes de 4 mm «Arcos Stabilend», qui étaient reliées au pôle positif. Le courant continu employé atteignit durant le soudage une intensité de 200 Amp. pour une tension d'environ 27 V.

Exécution des soudures.

Le soudage de la poutre fut exécuté de telle sorte que les parties à souder pouvaient toujours s'allonger librement, sans contrainte extérieure. Ceci n'était plus possible pour les diagonales extrêmes, car la poutre devait finalement être tout-à-fait rassemblée par soudage. Pour commencer, on a assemblé les parties de la poutre constituées de plusieurs pièces, en débutant par les cordons de soudure au milieu, afin de permettre l'allongement libre des pièces vers les extrémités. Le soudage se fit symétriquement à partir du milieu. La même disposition fut conservée lors du soudage de toute la poutre.

Nous avons ainsi essayé de réduire les contraintes de réaction provenant du fait que les pièces chauffées ne pouvaient s'allonger.

Malgré ces mesures, le retrait s'est fait fortement sentir. Il faut spécialement faire ressortir l'influence des longs cordons dans la membrure supérieure, où l'on a pu déterminer de fortes torsions dans les cornières et une réduction de 100 à 96 mm de la distance entre leurs côtés intérieurs. Il faut dire que pour maintenir la distance de 100 mm entre les cornières des membrures durant le soudage, on utilisa des déchets de profilés de 100 mm de hauteur. L'effet de contraction, après le refroidissement de la membrure supérieure complètement soudée, fut si fort que l'enlèvement de ces plaques de distance présenta de grandes difficultés. Les âmes de deux de ces profilés étaient ondulées; il fallut couper au chalumeau l'âme d'un de ces profilés afin d'éviter l'emploi de moyens de contrainte.

Le mesurage du retrait et ses résultats.

La détermination du retrait est basée sur le mesurage exact de la distance de deux points situés dans une partie de la construction, avant et après le soudage. Les modifications déterminées résultent principalement du retrait; une faible partie de ces variations peut être attribuée au montage, mais ces valeurs ne peuvent être que faibles, à cause des grands soins que nous avons apportés à l'assemblage des parties de la construction.

Pour mesurer les longueurs nous avons utilisé un appareil du type *Huggenberger*, appelé déformètre. Cet instrument permet de mesurer des allongements jusqu'à 0,00261 mm. La longueur entre repères est de 10 cm, ce qui rendait difficiles les mesures de retrait transversal, de telle sorte que nous avons surtout mesuré les retraits parallèlement à la direction de la soudure et aux arêtes des goussets.

Dans chaque assemblage de profils nous avons exécutés des mesures aux deux bords et au milieu. Les mesures aux bords furent faites aussi près que

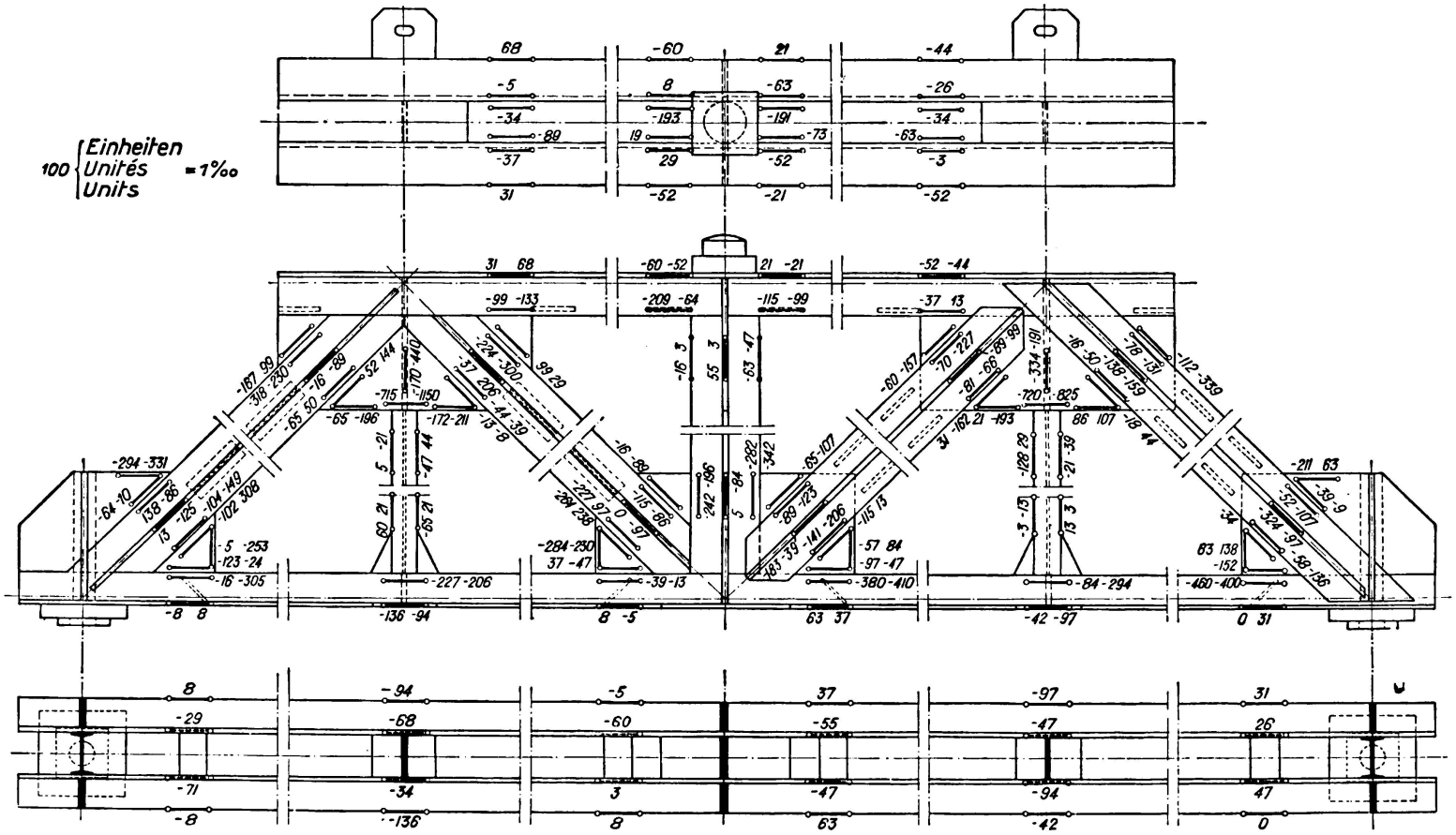


Fig. 1.

Retraits mesurés.

possible des soudures. Nous avons prévu d'autres mesures sur les goussets, le long des soudures. En tout on avait 212 distances de mesurage. Chaque distance fut mesurée quatre fois; après chaque mesure les pointes de l'instrument furent changées. La différence entre les quatre lectures ne devait pas dépasser deux intervalles du cadran, c'est à-dire 0,00522 mm. Les écarts de température au cours du mesurage furent pris en considération.

Les résultats de ces mesures sont donnés à la fig. 1, les signes + représentent des allongements et les signes — des raccourcissements. Les deux valeurs données pour chaque distance de mesurage correspondent aux côtés avant et arrière de la poutre. La grandeur des chiffres est très variable, et l'on ne peut parler d'aucune loi.

Très près des soudures se produisent de forts retraits, qui engendrent des torsions dans les profilés, de telle sorte que l'on a déterminé de forts allongements dans les arêtes extérieures des profilés.

Les contraintes existantes ne sont pas proportionnelles aux retraits, car ceux-ci se sont produits en grande partie par haute température du matériau et pratiquement sans engendrer de contrainte. Les grands retraits engendrent cependant de fortes contraintes internes qui, à certains endroits, amènent déjà le matériau à l'écoulement. Nous n'avons observé aucune fissure.

Un essai de fatigue avec surcharge variant de 0 à la charge utile, c'est-à-dire sans excès de charge eut pour conséquence la rupture de la poutre après 1,4 million d'oscillations.

De ces essais nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

1° — Les retraits se produisent très irrégulièrement et l'on ne peut déterminer aucune loi dans leur formation.

2° — Les retraits sont importants dans la poutre réticulée auscultée par suite des dimensions relativement faibles de la poutre et de la forte épaisseur des soudures. Il en résulte de grandes torsions dans les profilés et des ondulations dans les goussets.

3° — Les contraintes internes résultant du processus de soudage peuvent être assez fortes pour amener le matériau à l'écoulement.

4° — La résistance aux charges oscillantes des poutres réticulées soudées peut être sensiblement réduite par les contraintes dues au soudage. La résistance du matériau par rapport à l'origine est dépassée sous l'effet de la charge utile.

Dans l'emploi des poutres réticulées soudées, il faut toujours prendre les plus grandes précautions, lorsqu'il faut s'attendre à des sollicitations oscillantes fortes et durables.

Résumé.

Une poutre d'acier normal fut d'abord auscultée complètement aux points de vue statique et dynamique; ensuite nous avons effectué des mesures de retrait sur cette poutre. Le but de ces mesures était la détermination du genre et de la grandeur des retraits tels qu'ils se présentent dans les ouvrages soudés terminés.