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

Band: 2 (1936)

Rubrik: IIIb. Disposition et exécution des 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: 09.07.2025

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

III b

Disposition et exécution des 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

L'influence de la composition métallurgique sur la sécurité des ouvrages soudés. (Contraintes et tendance à la fissuration.)

Zur Frage des metallurgischen Einflusses auf die Sicherheit geschweißter Bauwerke. (Spannungen und Rißneigung.)

The Influence of Metallurgical Factors on the Safety of Welded Structures. (Stresses and Cracking Tendency.)

Prof. Dr.-Ing. E. H. Schulz,
Direktor des Forschungsinstitutes der Vereinigte Stahlwerke A.-G., Dortmund.

Nous pouvons affirmer que la valeur des ouvrages soudés est en toute première ligne une fonction de la construction et de l'exécution des soudures. De plus on prescrit au métallurgiste des règlements très détaillés sur les propriétés de résistance des aciers de construction et tout spécialement des aciers à haute résistance, règlements qui lui fixent a priori certaines limites dans le choix de la composition de l'acier. Même si l'influence du fabricant sur la sécurité semble ainsi limitée, des relations existent cependant dans les ouvrages soudés entre la composition chimique de l'acier d'une part et la formation de contraintes additionnelles et la prédisposition à la fissuration d'autre part. Il faut ajouter qu'il est difficile de trouver par des essais de laboratoire des relations vraiment utiles car toutes ces relations semblent trop compliquées. Nous en sommes provisoirement réduits à des observations pratiques et nous n'arriverons à un bon résultat, c'est-à-dire à des méthodes de travail appropriées, même en ce qui concerne les alliages à employer, qu'à l'aide d'une collaboration étroite et permanente du métallurgiste, de l'ingénieur soudeur et du constructeur, et tout en tirant sans cesse parti des résultats des découvertes les plus modernes faites dans les domaines qui se rattachent au problème qui nous intéresse.

Dans le domaine dont nous parlons, il faut d'abord tenir compte d'un principe très important, qui joue un rôle dans presque tous les domaines d'application de l'acier et qui souvent est trop peu pris en considération. Ce principe peut s'énoncer comme suit: « Plus la résistance d'un acier est grande, c'est-à-dire meilleure est sa fabrication et sa capacité, plus il doit être traité avec soins lors de son utilisation. » Un exemple: L'acier St. 37, si simple dans sa composition et sa fabrication supporte les déformations, la chaleur, etc. dans de plus vastes limites que l'acier St. 48, disparu entre temps ; ce dernier d'ailleurs ne dépasse pas de beaucoup l'acier St. 37, c'est-à-dire n'a pas une beaucoup meilleure résistance. Le progrès réalisé avec l'acier St. 52 était beaucoup plus grand au point de vue

métallurgique; alors que l'acier St. 48 est encore un pur acier au carbone, l'acier St. 52 contient des alliages. C'est pourquoi il faut compter avec une plus grande sensibilité de l'acier St. 52, même lors du soudage. Il en résulte que dans l'exécution des ouvrages soudés en acier St. 52 il faut appliquer, avec plus de rigueur que pour l'acier St. 37, les règles de construction et d'exécution des soudures.

Si l'on étudie l'acier St. 52 au point de vue *métallurgique,* il faut observer que les différentes usines ont adopté différentes compositions et différents types d'alliages. Dans une investigation comparative, les divergences dans le comportement de deux sortes d'acier St. 52 ne peuvent pas toujours être attribuées sans autre à la seule différence de composition et d'alliage. A côté du type d'alliage, les détails de fonte et de préparation jouent certainement un rôle, détails qui varient suivant les usines par suite des différences dans les installations et dans les méthodes de travail. Ces détails ont des effets qu'il n'est pas toujours possible de discerner dans l'acier terminé.

L'expérience acquise, spécialement dans mon Institut, sur les relations entre la résistance des constructions soudées et la métallurgie de l'acier se rapporte à deux types d'acier St. 52, d'une part à l'acier allié principalement de silicium et d'autre part à l'acier allié de chrome et de cuivre. Dans ce dernier — l'acier Union — le silicium et le manganèse jouent évidemment un rôle. Nos connaissances sur l'acier au chrome-cuivre sont beaucoup plus étendues que celles sur l'acier au silicium qui a été bientôt abandonné par suite de son infériorité. Il en résulte que les renseignements que je fournis ici reposent principalement sur l'étude de l'acier St. 52 avec alliage de cuivre et de chrome.

Il me semble important d'ajouter que cette expérience ne provient pas d'une seule source intéressée dans un sens ou dans l'autre, elle est plutôt la somme des expériences acquises à l'usine métallurgique, à l'atelier de soudage et à l'atelier de construction de ponts avec la collaboration du « Forschungs-Institut der Kohle- und Eisenforschung (Vereinigte Stahlwerke) ».

La composition chimique de l'acier St. 52 a une double importance dans le problème des contraintes additionnelles et par le fait même dans celui de la prédisposition à la fissuration des ouvrages soudés:

Nous savons que le soudage engendre des contraintes dans les constructions; dans certaines cas ces contraintes peuvent représenter des sollicitations additionelles difficiles à contrôler et peuvent même entraîner la rupture. On peut se demander jusqu'à quel point la composition de l'acier exerce une influence sur la grandeur des contraintes de soudage car on ne peut pas affirmer que, pour une sorte d'acier, on ait de fortes contraintes et pour une autre sorte d'acier aucune contrainte; il s'agit bien plutôt de différences dans l'ordre de grandeur des contraintes.

La limite d'étirement à chaud de l'acier devrait jouer un rôle spécial dans la formation de ces contraintes; cette limite dépend elle-même du type et de l'importance des alliage. Dans un autre domaine, celui de la construction des chaudières à haute pression, on arrive, par un choix approprié des alliages, à relever d'une façon extraordinaire la résistance à chaud des aciers. On pouvait s'attendre à une augmentation des contraintes de soudage dans les aciers à haute limite d'étirement à chaud. Cependant, tous les essais que nous avons exécutés

sur un acier au chrome-cuivre, ainsi que les très nombreuses mesures de tension que nous avons effectuées, ont montré que les tensions étaient à peine plus élevées dans cet acier, pourtant plus résistant à chaud,[1] que dans l'acier St. 37. Au cours d'un essai, les contraintes étaient plus faibles dans un acier St. 52 que dans un acier St. 37, fait dont nous ne voudrions pas tirer une conclusion générale.

Dans tous les cas, nous n'avons jamais trouvé dans l'acier St. 52 des contraintes qui puissent être considérées comme plus dangereuses que celles qui se produisent dans l'acier St. 37.

Le deuxième point est un peu plus compliqué.

Lors du soudage, les zones voisines des soudures sont fortement chauffées; lorsque les tôles sont épaisses, la grande chaleur que l'on a dans ces zones est rapidement évacuée par les zones voisines froides, c'est-à-dire que les zones fortement chauffées subissent un effet correspondant à une trempe ou en tous cas s'en rapprochant. On peut donc avoir dans une construction soudée des « endroits durcis ». Ces endroits sont cassants; ils possèdent une haute résistance à la traction mais ont tendance à se fissurer sous l'effet de la flexion. Dans les « endroits durcis » les variations de volume peuvent engendrer des fissures sans application d'aucune surcharge extérieure.

Cette propriété de durcir que possède l'acier St. 52 devrait en toute première ligne dépendre du *pourcentage de carbone*. D'après les prescriptions actuelles des Chemins de fer allemands, le pourcentage de carbone dans l'acier St. 52 ne doit pas dépasser (et précisément eu égard à la soudabilité) 0,20 % pour les épaisseurs allant jusqu'à 18 mm et au maximum 0,25 % pour les épaisseurs plus grandes. D'autres raisons peuvent pousser le métallurgiste à augmenter le pourcentage de carbone; la limite d'étirement (min. 36, resp. 35 kg/mm^2) sera difficilement maintenue pour les fortes épaisseurs si le pourcentage de carbone indiqué ci-dessus doit être absolument conservé. D'après l'expérience que nous avons acquise, la limite de 0,20 % de carbone ne doit pas être dépassée à cause de la sécurité des constructions soudées. En 1933 déjà, *Buchholtz* et moi avons indiqué que la propriété de durcir que possède le métal de base et avant tout le pourcentage de carbone avaient une grande influence sur la résistance à la fatigue de l'acier St. 52 soudé.[2] Des assemblages soudés en acier St. 52 avec 0,24 % de carbone étaient de 20 à 30 % inférieurs à des assemblages semblables en acier St. 52 de même résistance mais avec 0,16 % de carbone. Nous avons dit alors que le pourcentage de carbone ne devait autant que possible pas dépasser 0,18 %. Nous devons toutefois ajouter qu'une telle limitation du carbone — et des autres alliages, comme nous l'indiquerons plus tard — n'est possible qu'en réduisant la limite d'étirement imposée.

La détermination du rôle que jouent les autres alliages sur la soudabilité de l'acier St. 52 est plus compliquée, surtout en ce qui concerne le *silicium*. En soi, le silicium ne confère pas une forte prédisposition au durcissement — l'aversion de la plupart des usines métallurgiques pour l'acier au silicium pur ou légèrement modifié est à attribuer à d'autres raisons. Malgré cela, le pourcentage de silicium

---

[1] *H. Bühler* et *W. Lohmann:* Elektroschweißung 5 (1934), p. 226.

[2] Stahl und Eisen 53 (1933), p. 545/52.

est depuis quelques temps limité chez nous à 0,4 %; je tiens à faire expressément remarquer qu'avant cette limitation on avait exécuté un grand nombre de coulées avec de plus grands pourcentages de silicium (env. 0,6 %). Les ateliers de construction ont rencontré des difficultés avec cet acier à fort pourcentage de silicium et c'est pourquoi la limite de 0,4 % est aujourd'hui strictement observée.

Le pourcentage de *manganèse* ne doit pas dépasser 1,1 % — selon d'autres usines on peut admettre 1,5 % mais vraisemblablement en réduisant dans un rapport correspondant les autres alliages. Rappelons à ce sujet que, d'après *Sandelowski*[3] et d'après *Schulz* et *Püngel*,[4] les électrodes contenant beaucoup de manganèse engendrent un grand retrait dans la soudure et des contraintes lors du soudage.

L'acier Union contient jusqu'à 0,8 % de *cuivre*, ce qui n'a présenté jusqu'à present aucune difficulté et aucun inconvénient en ce qui concerne la sécurité des assemblages soudés. *S. Epstein, I. H. Nead* et *I. W. Halley*[5] ont publié dernièrement un article très intéressant sur la composition de l'acier. Des essais consacrés au développement d'un acier très résistant et bien soudable ont donné les résultats suivant:

	C	Si	Mn	Cu	Ni	P
max.	0,10	0,15	0,50	1,00	0,5	0,12

La limite du carbone est ici fortement réduite, de même que celles du manganèse et du silicium alors qu'une teneur de 1 % de cuivre est considérée comme favorable. La forte teneur en phosphore nous paraît aussi très intéressante.

Le *chrome*, lorsqu'il dépasse une certaine proportion, a une influence défavorable lors du soudage et favorise en outre le durcissement. On possède chez nous de très nombreuses observations sur l'influence de la teneur en chrome, c'est pourquoi on a établi la règle que le chrome ne devait pas dépasser 0,4 %. Cette teneur en chrome n'a jamais provoqué la moindre difficulté. D'autres usines admettent de plus hautes limites, citons par exemple l'acier anglais Chromador qui, à ma connaissance, a une teneur en chrome de 0,9 %. Il serait intéressant de connaître les résultats acquis lors du soudage de cet acier.

Une teneur en *molybdène*, telle qu'elle se présente dans l'acier St. 52, ne peut avoir aucune influence néfaste sur la qualité d'une soudure.

La composition chimique proposée par *Epstein* et ses collaborateurs indique une teneur en *phosphore* de 0,12 %, ce qui est beaucoup selon nos normes. Nous savons actuellement — sur la base des travaux de notre groupement d'usines — que le phosphore ne présente pas tous les inconvénients qu'on lui a souvent attribués; au contraire, il peut avoir des effets très favorables dans certains cas.[6] Je ne crois pas qu'il serait utile de donner à notre acier St. 52 la même teneur en phosphore qu'aux aciers américains, ce qui n'est pas une critique à l'égard des aciers américains car l'influence du phosphore est d'autant moins dangereuse que la teneur en carbone est plus faible et, comme nous l'avons

---

[3] Elektroschweißung 2 (1931), p. 48/53.

[4] Stahl und Eisen 53 (1933), p. 1233/36.

[5] American Institute of Mining and Metallurgical Engineers 1936, Technical Publication Nr. 697; Metals Technology 1936, vol. 3 avril.

[6] *K. Daeves, A. Ristow* et *E. H. Schulz:* Stahl und Eisen 56 (1936), p. 889/99 et 921/27.

dit, la teneur en carbone est très faible dans les aciers américains. Il serait cependant du plus haut intérêt que de connaître le comportement de cet acier américain lors du soudage.

Dans l'acier allemand St. 52, la teneur en phosphore est si faible (il s'agit d'un acier basique Siemens-Martin) qu'elle ne peut présenter aucune difficulté quant au comportement de cet acier lors du soudage ou dans une construction. Il en est de même pour la teneur en soufre.

Supplément.

Au cours de l'impression du présent rapport les Chemins de fer allemands ont publié des prescriptions fixant des maxima pour les différents alliages de l'acier St. 52; le principal but de ces prescriptions était d'abord de garantir une bonne soudabilité de l'acier et ensuite d'uniformiser la composition des différentes sortes d'aciers St. 52. Les maxima fixés par ces prescriptions sont les suivants:

carbone	max. 0,20 %
manganèse	max. 1,20 %
silicium	max. 0,50 %
cuivre	max. 0,55 %

En plus de ces alliages, l'acier St. 52 doit encore contenir du chrome (max. 0,40 %) ou du molybdène (max. 0,20 %) à quoi on peut ajouter encore 0,30 % de manganèse; la teneur en manganèse peut aller jusqu'à 1,20 % lorsque le chrome et le molybdène font défaut.

Par la même occasion les prescriptions concernant la limite d'étirement minimum ont été modifiées dans le sens d'une réduction progressive pour les grandes épaisseurs.

IIIb 2

Contraintes internes et distorsions provoquées par la soudure.

Schweißspannungen und Verwerfungen.

Stress and Distortion Due to Welding.

W. Heigh,
Welding Superintendent, Babcock & Wilcox, LTD., Glasgow.

On peut être amené à penser, d'après les rapports présentés sur ce thème, que dans son stade actuel d'évolution, la soudure est une science fort inexacte. On peut craindre qu'elle ne comporte beaucoup trop de points obscurs et de dangers — trop de facteurs inconnus.

Or ceux d'entre nous dont la tâche consiste essentiellement à assurer une exécution économique, rapide et bonne du travail détestent précisément l'inconnu et cherchent à tout prix à l'éviter.

Il semble donc opportun de leur donner quelques apaisements.

Dans l'un des rapports, par exemple, on trouve exprimée la crainte que le métal d'apport ne se trouve dans un état dangereux de trempe et qu'il ne soit ainsi exposé à des contraintes dangereuses.

Le métal d'apport fourni par certaines électrodes enrobées de bonne qualité et d'un prix très avantageux présentant une excellente ductilité, il n'existe en fait aucun danger de cet ordre. A l'état de métal d'apport, on obtient couramment un allongement de 22 à 25 % sur une longueur de 4 diamètres.

Un métal ayant subi un effet de trempe dangereux ne pourrait pas être aussi ductile, tandis que dans un métal qui possède encore de telles possibilités d'allongement, l'état effectif des contraintes internes présente une importance beaucoup moins grande qu'il ne semble.

L'on nous met en garde également contre les contraintes internes dans le métal de base, c'est-à-dire le métal des pièces à assembler.

Or les profilés en acier et les tôles en acier doux sont presque toujours soumis régulièrement à un dressage à froid avant leur mise en oeuvre dans des ouvrages de toute importance; ces pièces se trouvent ainsi en état de contraintes internes. Des centaines de grandes cheminées métalliques auto-portantes (c'est-à-dire non haubannées) se balancent sous les grands vents, au-dessus d'usines ou de centres urbains importants; personne ne s'avise cependant de la présence, de ce fait, d'un danger excessif quoique toutes ces tôles aient été laminées à froid et se trouvent ainsi soumises à des contraintes beaucoup plus élevées qu'une pièce de métal soudée.

Si l'on peut redouter l'inégalité de répartition des contraintes internes, l'analogie avec les profilés ayant subi un pliage à chaud peut nous apporter ici un précieux réconfort. Ces profilés sont en effet largement employés dans des ouvrages importants, quoique la plupart de ces pliages soient exécutés par chauffage local, qui laissent précisément le métal dans un état semblable à celui du cordon de soudure et du métal de base adjacent.

Du point de vue pratique, toutes ces craintes paraissent exagérées. Si l'on choisit une bonne électrode, si l'on adopte un procédé de travail éprouvé et si l'on prend soin de prévoir un léger réchauffage pour compenser l'effet refroidissant des fortes masses de métal et l'influence du froid et des intempéries, on peut alors employer la soudure en toute confiance.

Il est évidemment avantageux de faire disparaître les contraintes internes par le traitement thermique; dans certains cas, principalement dans la construction des réservoirs épais avec fortes pressions intérieures, l'annulation des contraintes internes fait normalement partie des procédés de fabrication. En dehors même des très hautes pressions qui se présentent fréquemment dans de tels réservoirs (et qui d'ailleurs constituent par elles-mêmes un argument suffisant pour justifier un traitement spécial), les états de contrainte dans les tôles épaisses travaillées à froid et dans de nombreux cordons de soudure atteignent des valeurs qui ne se rencontrent jamais ou que très rarement dans les charpentes métalliques soudées.

D'un autre point de vue, les bureaux d'études et ateliers souhaitent, d'une manière générale, pouvoir disposer de règles rapides et sûres pour le contrôle de la distorsion dans les parties terminées d'un ouvrage. Quelques suggestions sont faites à ce sujet par les principaux participants à la discussion. Celles qui suivent apporteront peut-être quelque complément effectif à la question. La distorsion est ici considérée comme la modification visible dans les formes et non pas comme les déplacements internes qui sont sa cause initiale.

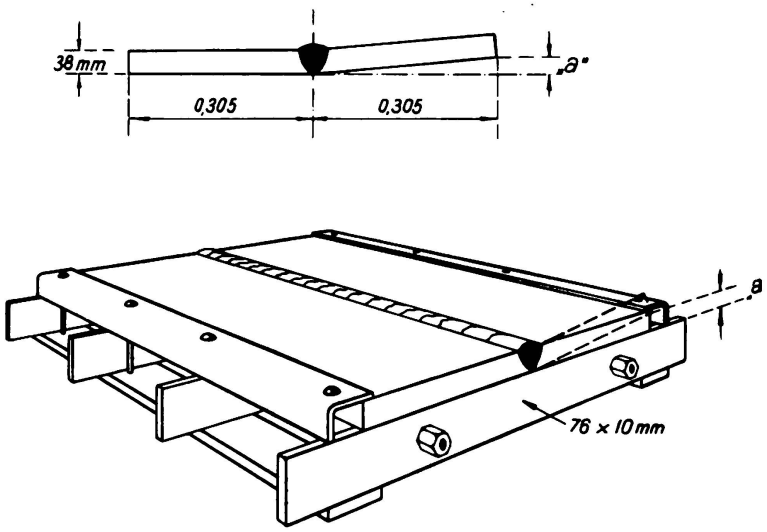


Fig. 1.

1° La fixation des éléments à assembler n'a pas besoin d'être absolument rigide pour être effective.

La figure 1 représente par exemple deux plaques d'essai montées dans un dispositif de fixation prévu pour réduire la distorsion. En soudant sans fixation,

on obtient pour «a» 1″ (25 mm) tandis qu'en soudant avec fixation cette valeur «a» se trouve réduite à $^3/_{16}$″ (5 mm).

Le moment de résistance du dispositif de fixation est le quart de celui d'une soudure de l'épaisseur de la tôle, ou égal à la résistance d'une tôle soudée sur la moitié de son épaisseur.

Aucune résistance (sauf le frottement) ne s'oppose à la contraction transversale; ce fait doit être considéré comme très important.

Les plats en acier doux sont d'une longueur telle que le déplacement angulaire dû au retrait de chaque cordon de soudure ne les charge pas au-delà de la limite d'élasticité.

Le principe de ce dispositif de fixation offre de nombreuses possibilités d'application; on l'a souvent employé et avec succès.

2° L'épaisseur des électrodes et les méthodes d'apport présentent une grande importance.

La figure 2 expose trois manières de faire une soudure bout à bout.

a) Electrodes N° 8 de 4 mm de diamètre, cordons droits; on a obtenu une distorsion angulaire de 8°.

b) Electrodes de $^1/_4$″ (6,3 mm) de diamètre, cordons droits; on a obtenu une distorsion angulaire de 4°.

c) Electrodes de $^1/_4$″ (6,3 mm) de diamètre, cordons imbriqués; on a obtenu une distorsion angulaire de 3°.

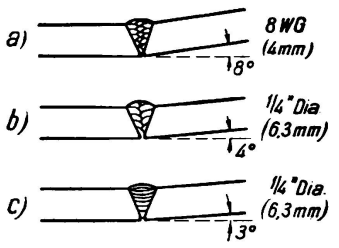


Fig. 2.

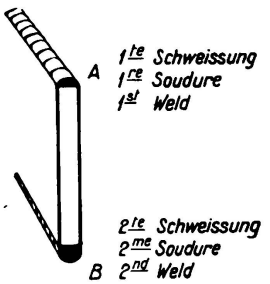
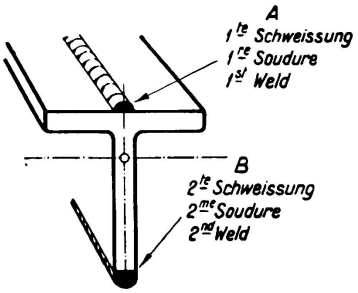


Fig. 3.



Fig, 4.

Un nouvel essai, avec dispositif de fixation, a donné une distorsion angulaire moyenne de 1° 11′ seulement.

Les essais a et b ont été repris avec soudures en congé et ont donné des résultats assez semblables.

Des électrodes de diamètre assez fort réduisent certainement ce genre de distorsion fort gênante. Il est également important d'ajouter que les soudures a, b et c ont été toutes soumises à des essais mécaniques et ont satisfait aux prescriptions du American Fusion Welding Code for Pressure Vessels, de sorte que, sous ce rapport, toutes les soudures étaient de valeur équivalente.

3° La suite du soudage aide à réduire la distorsion.

a) On obtient de bons résultats en posant simultanément deux cordons symétriques à une égale distance de l'axe neutre d'une section symétrique.

b) Si une première couche provoque une distorsion sur une section symétrique, une première couche de volume double, appliquée sur le côté ou sur l'arête

opposée compensera approximativement la première distorsion. La figure 3 illustre un essai très simple qui confirme cette indication. Dans les cordons à passes multiples, la distorsion causée par les dernières passes nécessite une compensation beaucoup plus grande.

c) De deux cordons à poser sur une section asymétrique, telle que celle représentée à la figure 4, le premier doit être le plus rapproché de l'axe neutre.

Avec la pratique, les assembleurs et les soudeurs acquièrent une expérience considérable en matière de contrôle de la distorsion. Cependant, pour les travaux importants d'un genre peu commun, il est indiqué d'étudier au préalable l'assemblage des éléments; au cours de l'exécution il faut continuellement contrôler le travail afin de pouvoir modifier la suite du soudage, s'il est nécessaire de le faire, pour corriger la distorsion et conserver à l'assemblage sa forme correcte.

IIIb 3

Efforts internes dans les joints soudés.

Innere Spannungen in geschweißten Stößen.

Internal Stresses in Welded Joints.

J. Orr,
B. Sc., Ph. D., Glasgow University.

Les différents rapporteurs ont mis très nettement en évidence l'influence néfaste de la soudure, qui engendre des distorsions et des contraintes internes. Ils ont également montré les risques de fissuration et la nécessité de pousser les investigations sur l'influence affaiblissante des perturbations dues à la chaleur et aux contraintes internes. D'après notre propre expérience, le risque de fissuration constitue une cause de véritable inquiétude.

Contraintes internes. Nous avons effectué une série d'essais sur de l'acier doux et sur des aciers à haute résistance (37—43 tons/in.^{2}) dans lesquels l'amélioration de la résistance était obtenue par de faibles additions de carbone, de manganèse et de chrome. L'intérêt de ces essais réside dans la comparaison entre des éprouvettes soudées, d'une part à l'état non recuit, d'autre part après recuit pendant quelques heures à 600^0 C. Dans ce dernier cas, les contraintes internes ont été éliminées, de telle sorte que les essais n'ont mis en évidence aucun défaut dû à ces contraintes.

Le recuit a légèrement réduit la charge de rupture et la résilience des assemblages soudés; la résistance à la fatigue, déterminée par un essai sur machine permettant d'étudier le joint dans son ensemble, n'a pas subi de modification; la ductilité, déterminée par essais de pliage sur les soudures bout à bout est plus grande dans les éprouvettes recuites; toutefois, plusieurs des électrodes employées ont donné des soudures satisfaisant à l'essai normal de pliage à l'état non recuit. La conclusion à tirer de ces essais est que les contraintes internes au voisinage des cordons de soudure ne constituent pas une cause de faiblesse, en pratique, si l'on a employé des électrodes appropriées.

Essais de détermination des contraintes résiduelles.

Nous avons effectué une série d'essais en vue de déterminer la valeur effective des contraintes internes, dans des conditions de contrainte sévères. La disposition adoptée fait l'objet de la fig. 1. Deux tôles de $^1/_2''$ d'épaisseur, destinées à être assemblées bout à bout, ont tout d'abord été soudées à leurs extrémités sur une tôle de 3″, puis assemblées entre elles. Après montage d'un tensomètre, on a scié ces tôles. La lecture sur le tensomètre a ainsi indiqué l'importance de la contrainte

ainsi relaxée et, par suite, la valeur des contraintes résiduelles. Les résultats sont indiqués dans le tableau I.

Tableau I.

Eprouvette n°	Longueur X	Particularités de la soudure	Contrainte résiduelle tons/in²
1	9″	Electrodes de 5/16″	12,0
2	58″	« « 3/16″	4,2
3	9″	« « 1/8″	13,0
4	58″	« « 1/8″	7,2
5	9″	Martellage à chaud	Fissures
6	9″	«	5,0
7	9″	Martellage à froid	4,5

La première constatation intéressante qui résulte de ce tableau est l'influence de la longueur de l'éprouvette. La contrainte résiduelle varie en sens inverse de cette longueur; ceci confirme l'indication déjà donnée par les rapporteurs: la zone voisine de la soudure doit présenter une certaine flexibilité. Dans le cas considéré, la longueur plus grande de certaines éprouvettes confère cette flexibilité.

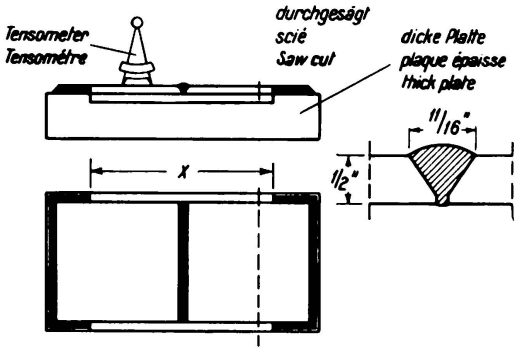


Fig. 1.

Contrainte de retrait dans une soudure bout à bout. (Les tôles sont soudées à leurs extrémités avant d'être soudées bout à bout).

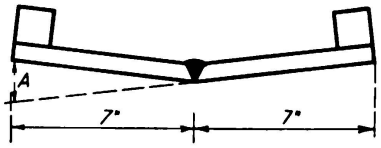


Fig. 2.

Déformation angulaire engendrée par une soudure en V.

Le deuxième point est l'influence des électrodes de fort diamètre par rapport à celles de diamètre plus faible. Ces résultats concordent avec ceux indiqués par les rapporteurs; les forts diamètres donnent des contraintes résiduelles plus faibles.

Le troisième point est l'influence du martelage, qui réduit évidemment les contraintes, mais qui augmente les risques de fissuration.

D'autres essais, effectués avec des électrodes de nombreuses marques différentes, nous ont amené aux conclusions suivantes:

1° peu d'électrodes fournissent un métal d'apport susceptible d'être martelé sans risque de fissuration —

2° la première couche ne doit pas être martelée, car on a constaté aux essais de dureté qu'elle constitue un point faible et que c'est de là que partent les fissures —

3° la dernière couche ne doit pas être martelée.

Essais de distorsion sur une soudure bout à bout en V.

L'intérêt de ces essais est de montrer l'influence d'un léger encastrement, obtenu en disposant deux poids sur les tôles, ainsi que le montre la fig. 2. La distorsion A a été mesurée après refroidissement; elle est indiquée dans le tableau II. Dimensions des tôles: $^1/_2'' \times 7'' \times 7''$.

Tableau II.

Eprouvette n°	Soudure	Courant ampères	Distorsion A ins.
1	5 passes; Electrodes de $^1/_8''$	110	0,28
2	3 « « « $^3/_{16}''$	170	0,05
3	3 « « « $^3/_{16}''$	220	0,044
4	2 « « « $^5/_{16}''$	340	0,031

L'effet d'encastrement exercé par les poids est faible, car il ne produit dans le cordon de soudure qu'une contrainte de flexion calculée de $\frac{1}{7}$ tons/in.^{2}. Cet essai confirme que les électrodes de faible diamètre produisent une plus forte distorsion; pour un encastrement plus marqué, les contraintes correspondantes sont donc encore plus élevées.

IIIb 4

Les contraintes thermiques dans la disposition constructive et l'exécution des constructions soudées.

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

Allowance for Temperature Stresses in the Design and Execution of Welded Structures.

Dr. Ing. K. Miesel,
Grünberg.

Le Prof. Dr. *Bierett* fait une distinction entre les contraintes de retrait engendrées par la fixation externe et celles engendrées par la fixation interne. Cette distinction est importante non seulement pour la détermination de l'allure des tensions dans les éléments de construction mais aussi pour la lutte contre les effets du retrait.

La fixation interne ne peut être corrigée que par les propriétés du métal d'apport et le processus de soudage ainsi que par des influences mécaniques telles que l'agrafage des pièces et le martelage de la soudure. Le recuit de la construction, méthode la plus efficace, ne peut pas être employé dans la construction des ponts et charpentes.

La fixation externe peut être combattue déjà lors de l'exécution du projet et plus tard lors de la construction.

Au cours de ces derniers temps, le joint des poutres à âme pleine a vivement intéressé le monde des praticiens. Le Prof. *Bierett* indique dans son mémoire comment on peut lutter contre le retrait, par l'application dans l'âme d'une bande de tôle incurvée.

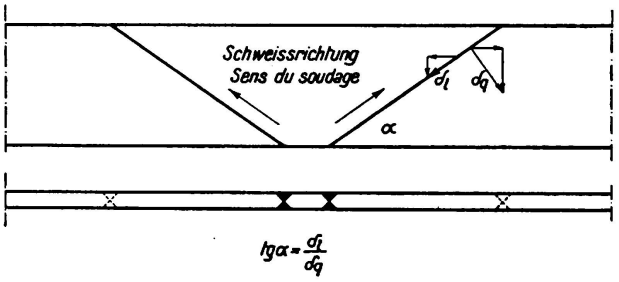


Fig. 1.
Joint de semelles.

Dans deux grands ouvrages on a assemblé les membrures, après le soudage des âmes, au moyen d'éclisses, selon la fig. 1. L'angle du coin est déterminé par la relation, tirée des essais, du retrait longitudinal au retrait transversal. Lorsque le soudage s'effectue à partir du côté le plus court vers le côté le plus long du coin, les composantes de retrait dans la direction longitudinale s'annulent

et elles s'additionnent dans le sens transversal; le couvre-joint est pour ainsi dire introduit dans l'assemblage. Des essais préliminaires ont justifié cette hypothèse.

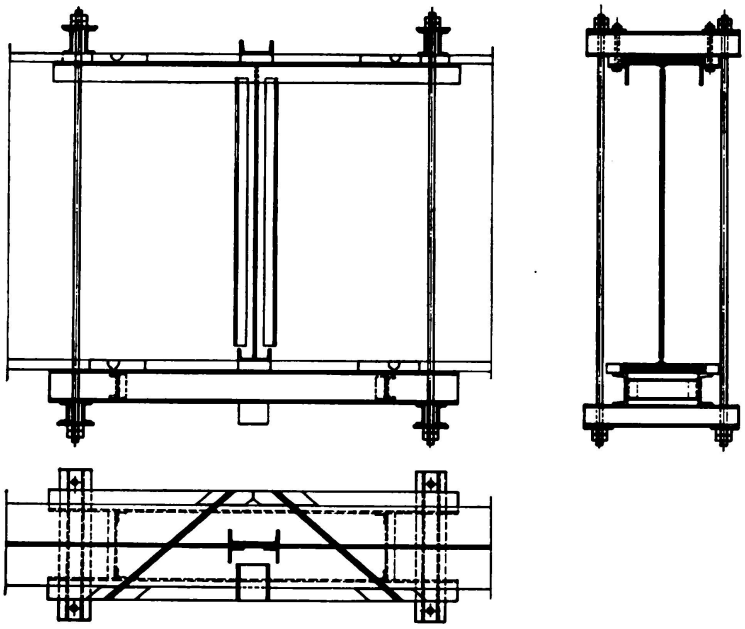


Fig. 2.
Fixation pour un joint en coin.
Projet.

L'application de ce procédé aux semelles épaisses des membrures de pont a montré par contre que l'effet de la fixation interne a dépassé notre attente lors de l'exécution de soudures en forme de tulipe. Lorsque la soudure est

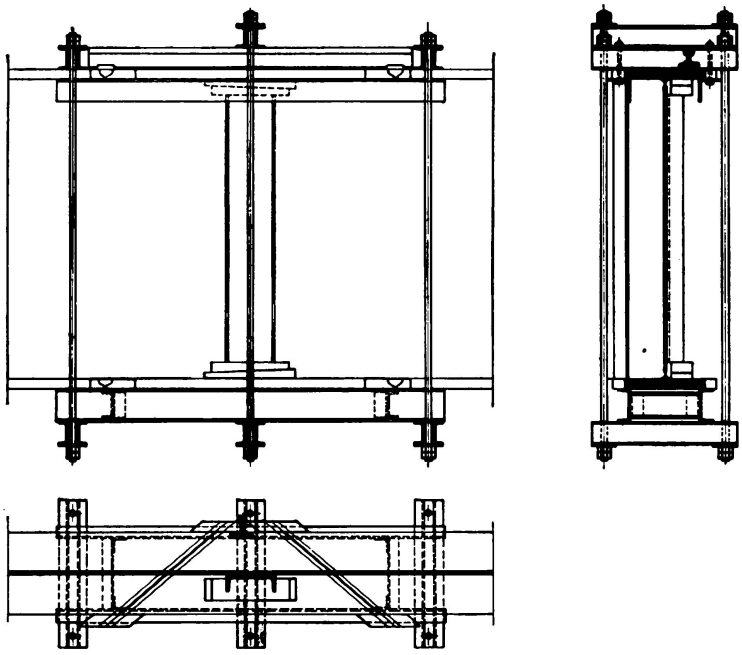


Fig. 3.
Fixation pour un joint en coin.
Exécution.

aux $^2/_3$ effectuée, il se produit un très fort retrait angulaire contre lequel il faut lutter par un agrafage toujours plus fort des pièces à assembler. La fig. 2 donne un projet de fixation; la fig. 3 montre la rigidité qu'il a fallu donner à cette fixation pour lutter contre le retrait angulaire. Dans les poutres en acier St. 37

il est toujours possible d'obtenir des soudures dont les retraits n'engendrent aucune fissure tandis que pour l'acier St. 52 on a observé une prédisposition à la fissuration. Dans ce cas on peut éviter les fissures en martelant la deuxième moitié de la soudure. Le martelage permet toujours d'obtenir les retraits nécessaires. On n'a pas encore suffisamment mis au clair la question de savoir si le martelage n'a pas une influence défavorable sur les propriétés de résistance du matériau.

Le choix exact de la suite du soudage et le chauffage des éléments de construction permettent d'éviter les fissures dues au retrait. Lors du soudage, par température estivale très élevée, d'une poutre à âme pleine en acier 52, un orage accompagné de grêle a interrompu les travaux. Par suite du refroidissement rapide de l'âme, mince par rapport aux membrures, l'âme s'est fendue sur toute la longueur du joint non complètement soudé. Pour souder à nouveau le joint de l'âme, on a chauffé les membrures à moitié soudées et on a obtenu une nouvelle soudure absolument sans défaut.

Plusieurs publications relatives à cette question ont fait ressortir l'importance du rôle joué par le constructeur dans la lutte contre les contraintes de retrait. Ainsi que les exemples précédents le montrent, le constructeur est cependant tout-à-fait impuissant vis-à-vis de la fixation interne; la fixation externe est réduite par la liaison à des pièces suffisamment élastiques, lorsque l'ensemble de la construction le permet. On ne devrait pas craindre de choisir des assemblages rivés aux endroits où il faut s'attendre à de très forts retraits et où des considérations d'ordre esthétique ne s'opposent pas à l'emploi du rivetage. Les exigences de l'architecte, souvent discutables, s'opposent nettement ici aux obligations de l'ingénieur; celui-ci ne doit pas toujours exécuter les éléments le plus économiquement possible mais suivant la méthode offrant la plus grande sécurité. On peut attribuer à de tels assemblages rivés la même importance qu'aux coupures dans les ouvrages de béton armé où elles sont disposées en vue du retrait.

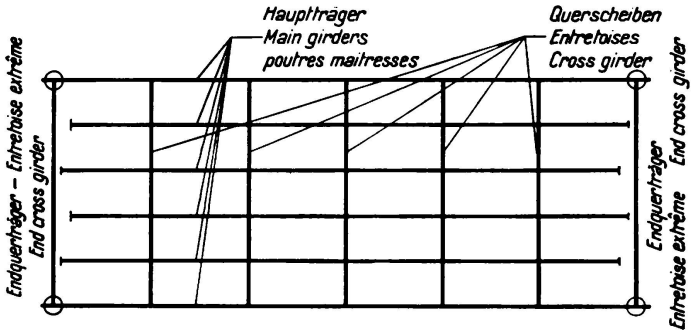


Fig 4.
Retrait des poutres principales d'une ossature de pont.

La fig. 4 représente schématiquement une ossature de pont dont les poutres maîtresses et les entretoises ont été soudées sur le chantier. Les retraits se sont additionnés différemment jusqu'à l'entretoise extrême. C'est pourquoi on relie généralement la poutre principale à l'entretoise d'extrémité par des assemblages rivés appropriés. L'entretoise d'extrémité reste ainsi sans contrainte et permet la disposition exacte du passage d'une voie de roulement à l'autre.

L'exécution des éléments dans lesquels le retrait se fait sentir suivant plusieurs directions est spécialement difficile. La fig. 5 représente la poutre maîtresse d'un pont, en forme de cadre ainsi que l'angle du cadre. Les contraintes statiques sont reportées sur la figure pour différentes sections et montrent la grandeur des forces qui doivent être transmises dans l'âme, entre autres

par les soudures d'angle des membrures. La très grande épaisseur de ces soudures d'angle engendre, principalement dans l'acier 52, des fissures qui ne peuvent être évitées que par martelage.

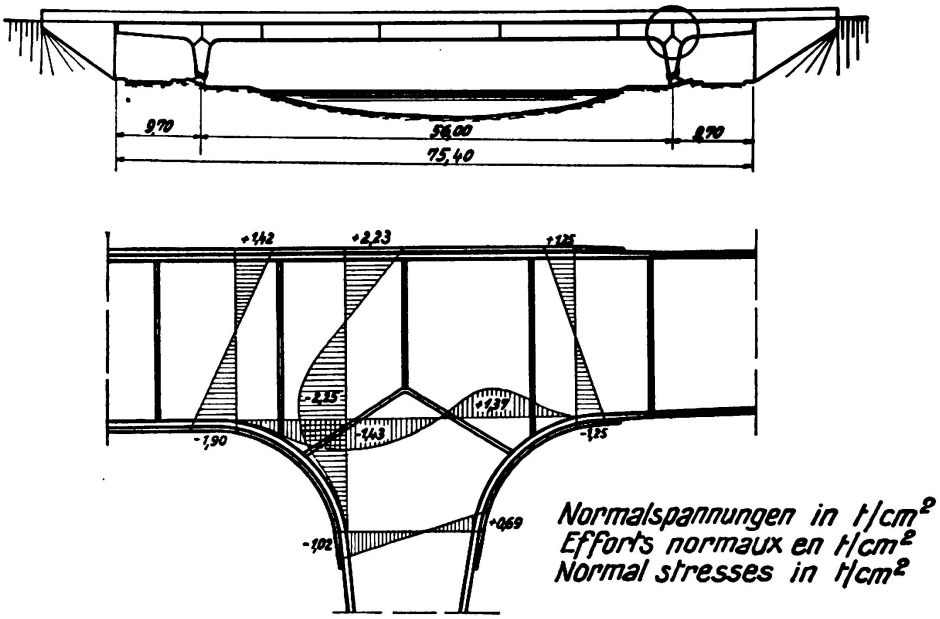


Fig. 5.

Contraintes statiques dans l'angle d'un cadre.

Dans ce cas — comme d'ailleurs dans les âmes en général — les contraintes de retrait peuvent amener le voilement ou, ce qui est plus dangereux encore, atteindre les contraintes de voilement et l'âme peut se rompre alors pour une surcharge additionnelle. Il est par conséquent recommandable, de dimensionner les raidisseurs des régions soumises à des contraintes de retrait pour les efforts longitudinaux et tranchants de la poutre en treillis de substitution et non pas seulement d'après la théorie du flambage.

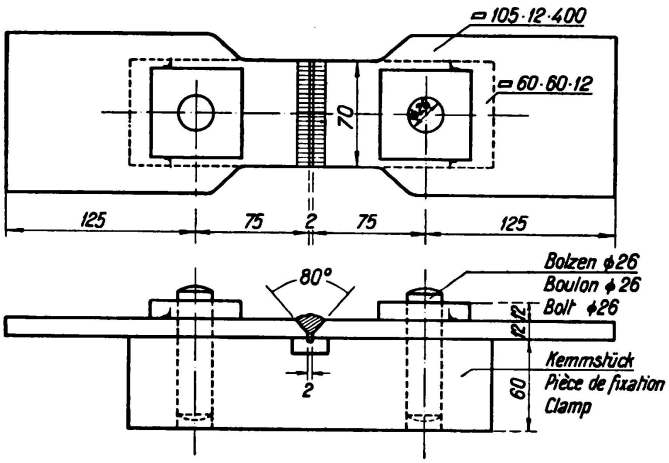


Fig. 6. Disposition d'un essai pour le mesurage des contraintes de retrait.

La théorie et les mesures des distorsions s'accordent pour montrer que les contraintes de retrait, qu'elles soient dues à la fixation externe ou à la fixation interne, se trouvent aux environs de la limite d'élasticité. Au moyen de l'installation représentée à la fig. 6 on a pu mesurer les contraintes de retrait résultant d'une fixation externe. L'éprouvette à assembler par une soudure en V était maintenue durant le soudage par des mandrins placés dans une forte pièce d'acier et entravant tout déplacement. Les éprouvettes fixées sans encastrement dans la machine d'essai furent soumises

à la traction jusqu'à ce que les mandrins purent être enlevés avec de légers coups de marteau, ce qui transmit les forces de retrait des mandrins à la machine.

La fig. 7 représente l'allure des diagrammes des contraintes-allongements tels qu'ils furent trouvés pour l'acier St. 37 et pour l'acier St. 52. Les contraintes de retrait se trouvent à la limite d'élasticité. Il en était de même lorsque les barres étaient soumises, avant le mesurage, à des efforts de grandeur usuelle, c.-à.-d. de 1,4 ou 2,1 t/cm² puis déchargées. Si les barres étaient étirées un peu au-dessus de la contrainte de retrait mesurée la première fois, la contrainte de retrait n'atteignait, lors d'une nouvelle mise en tension que 50 à 75 % de la première valeur. Pour l'acier St. 37, les valeurs de la plus haute ductilité se

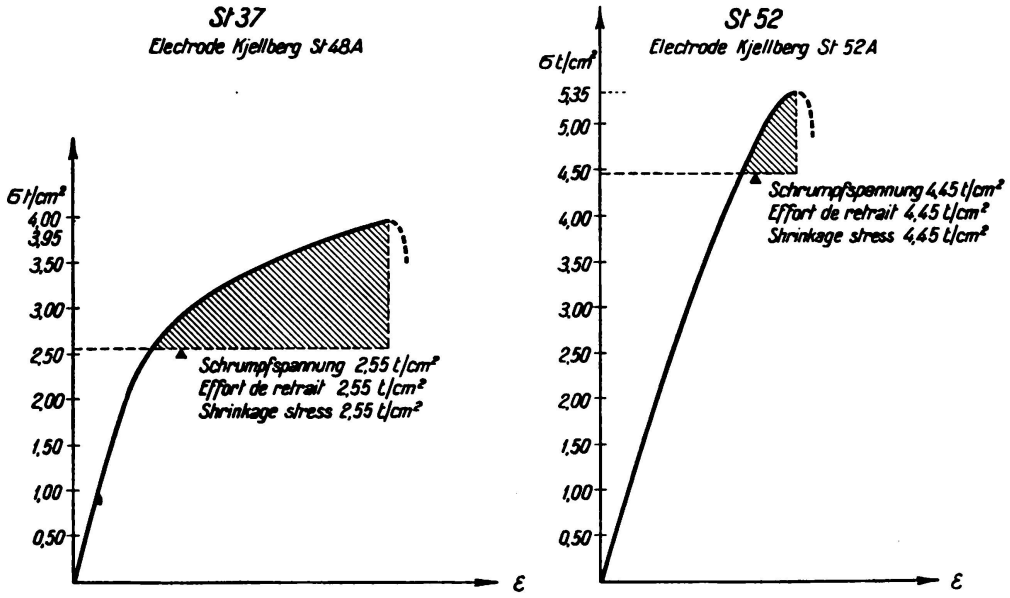


Fig. 7.

Diagrammes des allongements obtenus lors du mesurage des contraintes de retrait.

trouvent à la limite supérieure et pour l'acier 52 à la limite inférieure. On pouvait observer que l'acier employait un certain temps pour revenir à l'état de retrait. La réserve de puissance qui existe dans l'acier 37, au-dessus des contraintes de retrait, est assez grande dans la plupart des cas mais elle est très faible dans l'acier 52. Cela explique la plus grande prédisposition à la fissuration de ce dernier acier.

Pour des surcharges statiques extérieures, les contraintes de retrait, si elles ont résisté au soudage, ne sont pas plus dangereuses que toutes les autres contraintes propres. De nouveaux retraits provenant de soudages exécutés dans les environs ou de nouvelles contraintes propres produites par des effets de température, peuvent conduire à la fissuration et tout spécialement pour l'acier 52, par suite de la faible réserve dans les contraintes et les allongements.

Il serait recommandable d'exécuter des essais d'endurance avec l'installation que nous avons montrée. Une précontrainte comme celle de l'essai ordinaire de fatigue ne se présente que lorsque la surcharge agit en sens opposé à la contrainte de retrait. La résistance à la fatigue doit se trouver ici aux environs de la limite d'élasticité et l'amplitude d'oscillation applicable pour les soudures

bout à bout se monte, d'après les essais de résistance à la fatigue exécutés par la Commission allemande,[1] à 10 kg/mm² pour l'acier 37 et 13,1 kg/mm² pour l'acier 52. D'après les prescriptions allemandes cela exige pour un $\gamma = 1$, un α d'environ 0,65 pour l'acier 37 et d'environ 0,58 pour l'acier 52. Lorsque la charge et le retrait engendrent des contraintes de même sens, et souvent aussi dans le cas contraire, il ne se produit une modification de l'allure des contraintes que dans l'élément pour lequel on pouvait s'attendre à une résistance à la fatigue élevée, mais il est bon d'étudier chaque cas en particulier.

Les contraintes thermiques présentent encore journellement des difficultés à l'ingénieur, aussi bien au bureau qu'à l'atelier. Il faut cependant espérer que les investigations et l'expérience compléteront bientôt nos connaissances et nos méthodes; les contraintes de retrait, comme c'est le cas pour les contraintes secondaires dans les constructions rivées, ne présenteront alors plus aucune difficulté.

---

[1] Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen, Rapport du „Kuratorium für Dauerfestigkeitsversuche im Fachausschuß für Schweißtechnik beim Verein deutscher Ingenieure", p. 27 et 35—37.

IIIb 5

Contraintes thermiques constatées lors des travaux soudés en Belgique.

Bei Schweißarbeiten in Belgien festgestellte thermische Beanspruchungen.

Temperature stresses observed in welded constructions in Belgium.

A. Spoliansky,
Ingénieur des Constructions Civiles et Electricien A.I.Lg., Liége.

Nous nous bornerons dans la présente note à examiner les contraintes thermiques au sujet desquelles on peut dire que si l'on en ignore la valeur exacte on ne sait que trop bien que ces efforts sont considérables.

Nous n'en citerons qu'un seul exemple.

Lors de la soudure du dernier joint de montage d'un pont Vierendeel on a constaté un soulèvement de son appui de l'extrémité du pont avec formation d'un pli dans la bride inférieure.

Le poids du longeron était d'environ 80 t. On n'avait pas pris de précautions spéciales et necéssaires dans ce cas en vue de diminuer l'effet thermique de gros cordons de 36 mm.

Les effets élastiques se manifestent par:

1° le raccourcissement des pièces.

2° les déformations.

3° les tensions internes avec ou sans apparition de fissures et ruptures.

1° — *Raccourcissement des pièces.*

Par suite du retrait de la soudure les pièces se raccourcissent en prévoyant des pièces avec des longueurs légèrement supérieures à celles exigées on obtient les dimensions suffisamment exactes.

2° — *Déformations.*

Les déformations sont surtout importantes aux endroits ou les cordons sont disymétriques. La déformation est proportionnelle à la longueur libre de l'élément pouvant se déformer à la dimension du cordon; elle est inversément proportionelle à l'épaisseur de cet élément.

Les ponts soudés en Belgique sont en majeure partie des poutres Vierendeel à membrure supérieure parabolique. Cette bride est comprimée, on aurait donc

tout avantage à lui donner la plus grande raideur possible. Deux méthodes ont été employées:

a) poutre en double té avec semelles de forte épaisseur et largeur comprise entre 400 et 500 mm.

b) poutre en double té avec semelles constituées par des poutrelles de 400 à 500 PN. ou à larges ailes (fig. 1).

Au point de vue technique de la soudure la deuxième méthode est défectueuse, car la soudure est déposée sur l'âme de la poutrelle d'épaisseur réduite et à la déformation est plus importante.

La plupart des procédés d'atelier consistant en un redressage à froid des pièces déformées constituent un danger.

On a ainsi constaté, dans certains ateliers, où ces poutrelles brides étaient cintrées à froid, l'apparition d'une série de fissures normales à la soudure dans l'âme des poutrelles et dues à l'écrouissage partiel du métal (fig. 2).

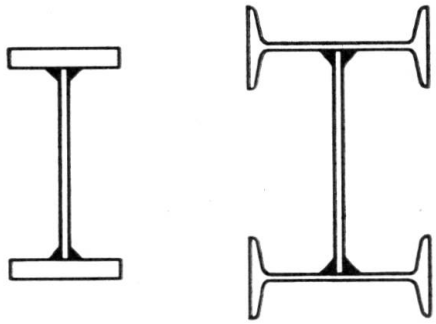


Fig. 1.
Constitution des brides supérieures des ponts Vierendeel.

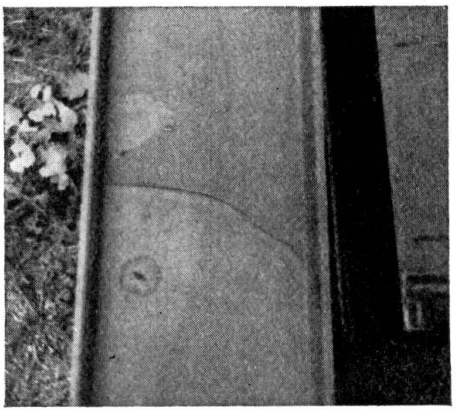


Fig. 2.
Fissure dans une poutrelle-semelle de la bride supérieure d'un pont Vierendeel.

On peut et l'on doit diminuer l'importance des déformations par un choix judicieux:

a) de l'épaisseur des pièces à assembler et

b) des dimensions des électrodes à employer.

Pour cette raison, comme pour d'autres d'ailleurs, les électrodes de gros diamètres sont à proscrire surtout pour les premières couches de fond.

On peut pratiquement annuler les déformations dans la majeure partie des cas par une disposition symétrique des cordons.

Dans les poutres Vierendeel ainsi que dans les bâtiments à noeuds rigides, dont l'emploi commence à se généraliser en Belgique, on trouve des goussets raccords avec section composée d'âme et semelle (fig. 3).

On peut exécuter ces goussets au moyen de 4 semelles (b) avec cordons symétriques ou avec 2 semelles (a). L'assemblage (b) est évidemment plus parfait, mais nécessite un plus grand nombre de soudures.

Dans les pièces en caisson (fig. 4) malgré la symétrie des soudures on constate des torsions d'ensemble dues d'une part au fait que le dépôt des cordons n'est

pas rigoureusement identique et d'autre part au fait que les éléments ne sont pas non plus rigoureusement semblables.

3° — *Tensions internes.*

Le retrait des soudures crée dans une zône assez étendue des tensions qui sont considérables et peuvent constituer un danger, surtout dans des zônes à tensions préexistantes.

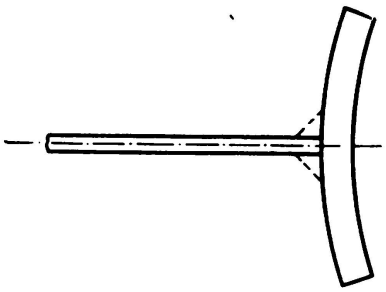


Fig. 3.
Contreflèche donnée a une semelle à souder.

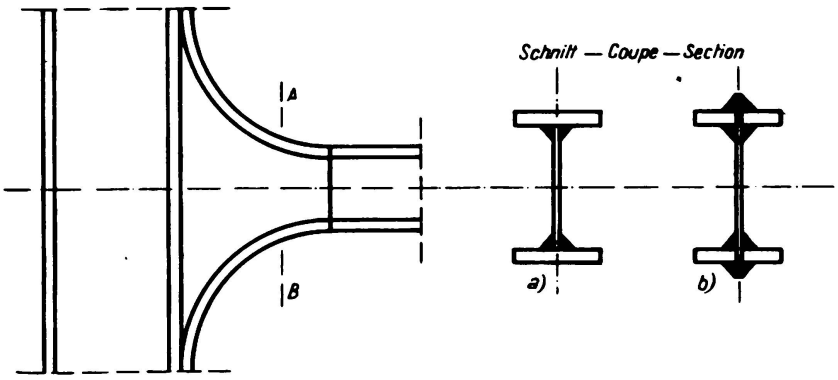


Fig. 4.
Détails d'un noeud à raccord tangentiel.

C'est ainsi que dans des laminés à fortes épaisseurs, le dépôt d'un cordon de soudure peut même déterminer le bris de la pièce.

On a couramment observé, en Belgique, des ruptures qui se sont produites

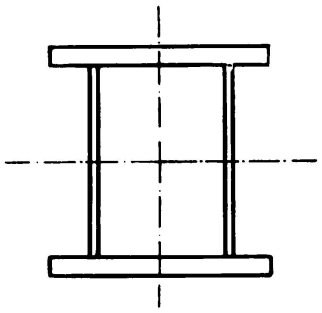


Fig. 5.
Profil en caisson soudé.

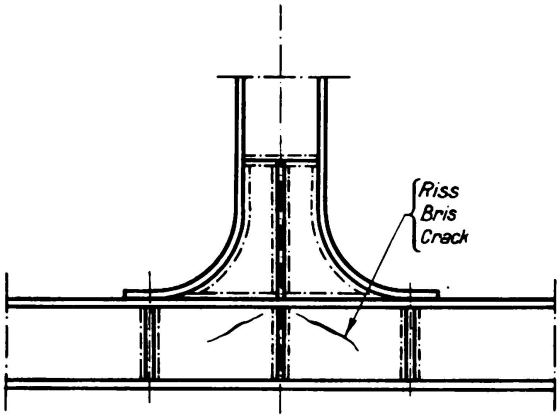


Fig. 6.
Détail d'un noeud d'un pont Vierendeel.
Fissures caractéristiques.

dans des poutrelles Grey où, comme on le sait, les tensions de laminage sont importantes.

Le perçage de trous peut rendre un laminé impropre à la soudure par la rupture de la zône écrouie provoquant des fissurations et le bris des parties saines de la pièce.

Une concentration de cordons de soudure dans un espace limité est à proscrire.

De même il faut éviter un voisinage trop rapproché de cordons de soudure de dimensions nettement différentes.

Des accidents ont été constatés en Belgique, lors de la soudure d'entretoises

aux noeuds des poutres Vierendeel où il y avait un certain nombre de raidisseurs (fig. 5), ainsi que dans la soudure des montants en croix de ces ponts (fig. 6).

Les raidisseurs constituent un grand inconvénient pour les poutres à âme pleine. S'il était possible de diminuer considérablement leur quantité en renforçant suffisamment l'épaisseur d'âme la constitution des poutres serait améliorée. On pourrait aussi évidemment améliorer la forme des raidisseurs en ne les continuant pas jusqu'à la semelle tendue (fig. 7).

Le principal danger de ces efforts thermiques est que les fissures ou ruptures n'apparaissent pas forcément à l'atelier immédiatement après la soudure. Des fissures microscopiques peuvent être indécelables et ne se manifester qu'au bout

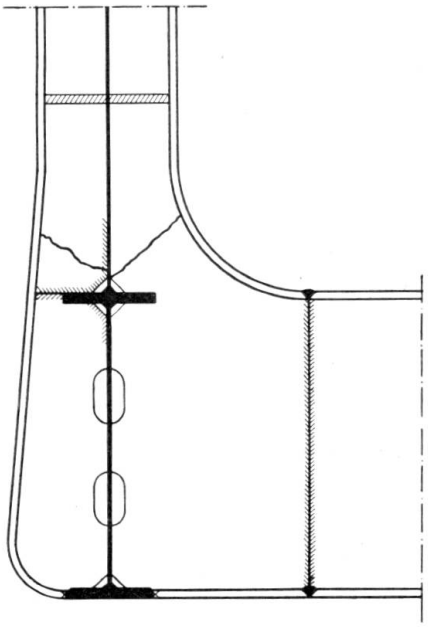


Fig. 7.
Fissures caractéristiques dans les montants en croix des ponts Vierendeel.

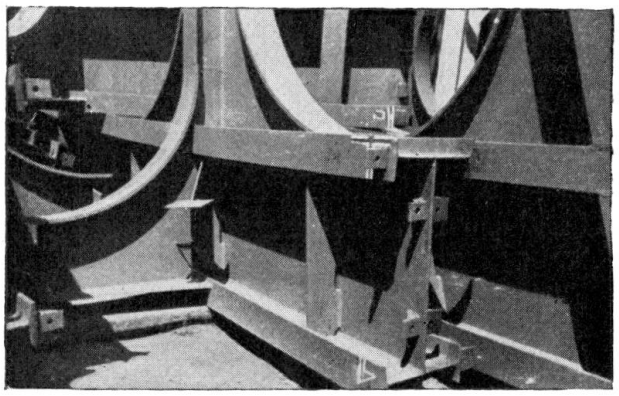


Fig. 8.
Assemblage de l'entroise au montant en croix.

de plusieurs mois. Cette apparition à retardement de fissure constitue d'ailleurs un phénomène inexpliqué mais propre à la soudure. On pourrait peut être rapprocher ces effets des accidents qu'on observe dans certaines pièces de fonte où des ruptures ont été également constatées aux endroits singuliers.

Nous avons pu ainsi constater, lors d'une modification, où un plat soudé sur une poutre en double tés a dû être coupé au chalumeau, la présence de multiples fissures dans le métal de base, comme dans le métal d'apport (fig. 8). Ces fissures étaient probablement dues à l'emploi d'un plat fourré.

Un autre exemple frappant mérite d'être signalé:

Quelques mois après qu'un pont était complètement soudé, le tablier en béton et le platelage étant établi, une rupture brusque accompagnée d'un bruit s'est produite, dans l'axe de la soudure du joint d'âme (fig. 9).

A notre sens, la tension de retrait des cordons dans les semelles de 36 mm d'épaisseur a été suffisante pour déterminer un début de fissuration dans le cordon d'âme.

Dispositions à prendre pour amoindrir les effets des tensions thermiques.

Précautions avant exécution.

A. *Localisation et dimensions des soudures.*

Les soudures doivent être localisées en des endroits où leur sollicitation sera en tout état de cause faible. Il faut éviter de déposer des cordons à proximité les uns des autres et en diminuer le plus possible l'importance.

Un choix judicieux d'assemblages a une importance capitale. En Belgique, cette question a été poussée très loin et a conduit à la mise au point, tant pour les ponts que pour les charpentes, d'un noeud courbe à raccords tangentiels. Monsieur *Campus* présente d'ailleurs à ce Congrès une étude de ce noeud.

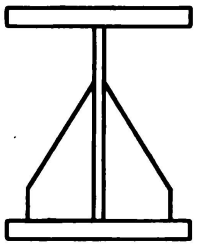


Fig. 9.
Raidisseur d'une poutre à âme pleine.

B. *Dimensions des pièces à assembler.*

L'épaisseur et la longueur des pièces doivent être soigneusement établies.

Il faut, en effet, limiter le minimum d'épaisseur des tôles car:

1° on a constaté dans les tôles minces une diminution plus notable de l'allongement aux températures de 600 à 800°, et par conséquent une tendance accrue à la fissuration.

2° On peut craindre des morsures trop fortes de la soudure, pour laquelle, au point de vue opératoire, existe un minimum de dimension.

3° Pour amoindrir les déformations.

4° Pour diminuer la quantité nécessaire de raidisseurs.

C. *Ordre de dépôt de soudure.*

Les cordons doivent être déposés dans un ordre qui ne peut être laissé à l'appréciation du soudeur. Tout comme pour le retrait du bétonnage, un programme doit être établi en vue de diminuer l'importance du retrait des soudures.

D. *Analyse métallographique du métal de base et du métal d'apport.*

Celle-ci est d'une importance capitale. Il faut pouvoir être certain des caractères de la soudabilité du métal de base.

E. *Exécution des pièces.*

Elle doit être particulièrement soignée en vue d'éviter de trop grandes tolérances qui amènent fatalement à un dépôt exagéré de soudure.

F. *Précautions spéciales.*

Dans des cas spéciaux une technique particulière doit être mise au point tel que le chauffage avant soudure.

Dispositifs opératoires.

G. *Appareillage électrique.*

Il est de toute importance de pouvoir obtenir un dépôt régulier, par conséquent il faut veiller à l'installation électrique en général, qui doit être spécialement étudiée en vue des travaux de soudure.

Les groupes transformateurs, les câbles conducteurs doivent pouvoir être tels que les chutes de voltages et d'ampèrage soient limitées.

Des appareils de mesure électrique doivent être installés en nombre suffisant et consultés d'une manière ininterrompue.

H. *Choix des caractéristiques électriques.*

Ce choix est extrêmement complexe.

Il faut diminuer la température de pose, pour diminuer les contraintes thérmiques, mais cette température doit être suffisante pour une bonne pénétration.

Pour un travail déterminé, c'est à dire, pour des aciers de composition déterminée et pour lequel des électrodes de composition adéquate sont adoptées, pour des épaisseurs de pièces à assembler il y a des caractéristiques électriques optima à imposer.

I. *Limitation du diamètre maximum des électrodes à employer.*

Un grand nombre d'accidents constatés en Belgique avait pour raison principale que des ateliers en vue de diminuer les frais de la main d'oeuvre, exécutaient leurs travaux avec des électrodes de diamètre trop important. D'une part, les dangers d'une vitesse de trempe accrue, d'autre part le courant trop intense et par conséquent les tensions thermiques accrues font qu'il est de toute nécessité de limiter l'épaisseur maximum des électrodes à employer. Ce maximum est provisoirement fixé par les Ponts et Chaussées Belges par une électrode de 5 mm de diamètre sauf pour la couche de fond où elle ne dépassera pas 4 mm.

J. *Précautions à prendre lors d'un travail hivernal.*

Actuellement on interdit en Belgique de souder à des températures inférieures à 4^0 centigrade.

K. Pour déterminer la meilleure technique à suivre, il y aurait évidemment lieu de pouvoir déterminer l'ordre de grandeur des tensions thermiques et à comparer ces valeurs suivant différents modes d'exécution.

En Belgique un groupe de constructeurs à confié à un laboratoire de l'Etat la mission de procéder à un cycle complet d'études à ce sujet.

Dispositifs après opératoires.

L. Il faut interdire la manipulation des pièces à soudure encore chaude.

M. Des dispositifs doivent être pris pour obtenir un refroidissement lent des soudures.

N. On peut espérer que les essais commencés en Belgique pourront indiquer des dispositifs spéciaux pratiques et économiques pour diminuer après soudure les contraintes thermiques.

IIIb 6

Ruptures enregistrées sur des ponts en fer forgé et en acier doux soudés électriquement.

Versager bei elektrisch geschweißten Brücken aus Schmiedeeisen und Flußstahl.

Recorded Failures of Electrically Welded Wrought Iron and Mild Steel Bridges.

H. J. L. Bruff,
Bridge Engineer, North Eastern Area, London & North Eastern Railway. York.

En ce qui concerne les travaux de soudure effectués sur des ponts existants, je n'ai pu, malgré mes recherches, trouver aucun rapport décrivant des ruptures constatées sur des assemblages soudés. Mon Chef, Mr. *John Miller,* Ingénieur du Secteur Nord-Est du London & North Eastern Railway, a eu l'occasion de constater des ruptures au cours de l'exécution de travaux de soudure sur des ponts. C'est pourquoi j'ai présenté avant ce Congrès un mémoire sur les « Détériorations dans les ponts de fer forgé et d'acier soudés électriquement ».[1] J'ai ainsi l'espoir que les ruptures constatées par ailleurs seront également portées à l'attention de l'Association Internationale des Ponts et Charpentes et que ces ruptures pourront ainsi être étudiées, aussi bien que celles que je signale, tant dans leurs causes que dans leurs effets. Si leur importance est suffisamment marquée, l'on pourra en déduire les méthodes à adopter et les précautions à prendre pour éviter à l'avenir de semblables ruptures.

Depuis la présentation de mon mémoire, des ruptures d'un genre quelque peu différentes ont pu être constatées. Je profite donc de l'occasion qui m'est offerte pour les décrire.

Ces ruptures se sont produites au cours de travaux de réparation sur un vieux pont à poutres pleines en fer forgé situé à Leeds. Non seulement cet ouvrage avait gravement souffert de la corrosion, mais il nécessitait un renforcement, étant jugé inapte à supporter l'intensité du trafic moderne.

Au moment de la construction en 1867, les autorités locales avaient essentiellement tenu à ce que le pont présentât un aspect ornemental; il était en effet construit à proximité du principal édifice religieux de la ville, auquel d'ailleurs il donnait directement accès. Les poutres principales, du type en caisson, avaient donc été revêtues de plaques ornementales en fonte, dans le style gothique qui prévalait à l'époque; l'infrastructure était également, jusqu'à ces derniers temps, masquée par des panneaux de style gothique. Par suite de cette disposition, une

[1] Voir le 4e vol. de «Mémoires» de l'A.I.P.C. (1936), p. 185.

grande partie de l'ouvrage était inaccessible et n'avait pu faire l'objet d'aucune inspection, d'aucun travail de peinture depuis la construction; ce n'est que tout récemment, en retirant les panneaux décoratifs, que l'on a pu constater les ravages causés par la corrosion, ravages fort graves et très étendus.

Deux solutions se présentaient:

a) Remplacer le pont, ce qui aurait été extrêmement coûteux, car il est environné de tous côtés de propriétés commerciales importantes; de plus, il ne pouvait être question d'interrompre le trafic, même pendant une période très courte, car il fait partie d'une des plus importantes lignes de chemins de fer du nord de l'Angleterre.

b) Réparer et renforcer l'ancien pont par soudure électrique, méthode qui a été adoptée.

Les ruptures observées sur les soudures se sont produites sur les entretoises, qui étaient du type en caisson. Ces poutres étaient gravement attaquées par la corrosion et leurs âmes avaient subi des distorsions sous l'action des excès de charge. Ces avaries avaient été provoquées par le remplacement, au cours du temps, de rivets par des boulons qui avaient cédé sous l'action de la rouille. Les travaux de réparation furent ainsi plus importants qu'il n'avait été prévu et d'une exécution plus délicate.

La partie la plus délicate des travaux a été l'assemblage par soudure de nouvelles âmes, ces pièces devant être montées entre les ailes verticales des cornières, ce qui nécessitait l'adoption de soudures bout à bout d'une grande largeur. La méthode employée pour effectuer ce travail a consisté à assembler les tôles d'âme par des soudures provisoires sur les extrémités des cornières, puis à souder alternativement en haut et en bas, bout à bout, par cordons d'environ 6″ de longueur. Le nombre des cordons allait jusqu'à sept dans certains cas. La

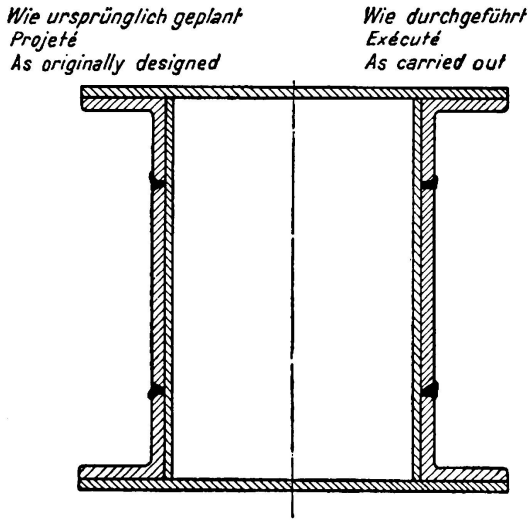


Fig. 1. Section de poutre transversale.

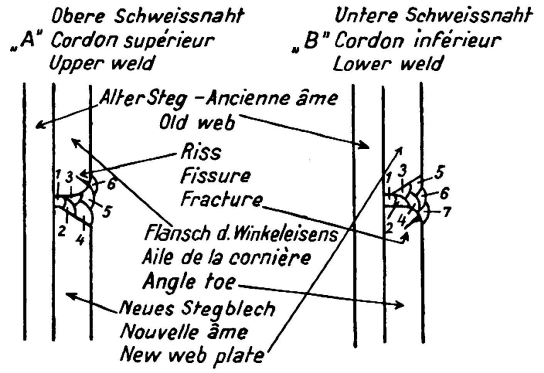


Fig. 2.
Détails des soudures d'âme bout à bout telles qu'elles ont été conçues.

préparation de ces joints bout à bout a été effectuée suivant la méthode habituellement adoptée par mon chef pour les soudures de cette nature et les soudures ont été faites suivant les indications de la fig. 2, A et B.

On a constaté que lorsque la dernière passe était déposée, il se produisait une fissure le long de la soudure, parallèlement à cette dernière, ainsi que le montre la photographie. On a admis que la pose de nouvelles passes (fig. 2, A 6 et B 7) ne garantissait pas une pénétration effective de cette passe dans le métal sain de la racine des fissures.

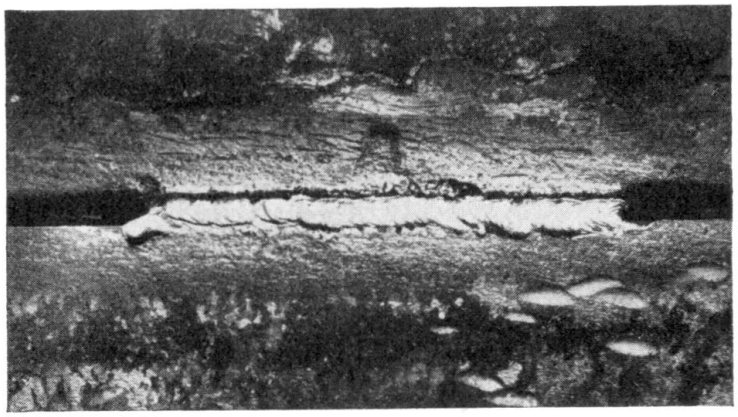


Fig. 3.

Fissures sur des cordons parallèles aux cornières.

Après un certain nombre d'essais, on a constaté que la méthode indiquée sur la fig. 4 donnait les résultats les meilleurs.

On a tout d'abord effectué le joint inférieur ou de pied sur toute la longueur de l'âme, puis le joint supérieur ou de tête. Ainsi qu'on le remarquera, il n'a été prévu aucun chanfrein sur la soudure de tête; pour la soudure de pied, le chanfrein a été terminé en arête vive. Ce type de chanfrein à arête vive a été adopté depuis en remplacement de la forme indiquée dans mon rapport (voir fig. 2 ci-dessus); il permet en effet de réaliser une meilleure fusion à la jonction des tôles.

Les fissures observées semblent avoir été causées par la contraction du métal perpendiculairement à la direction du laminage, ce retrait prenant une importance de plus en plus grande au fur et à mesure de l'avance du soudage. Un morceau de cornière découpée a montré une structure fibreuse orientée parallèlement à la longueur de la barre, ainsi que cela se présente invariablement dans un fer forgé de bonne qualité.

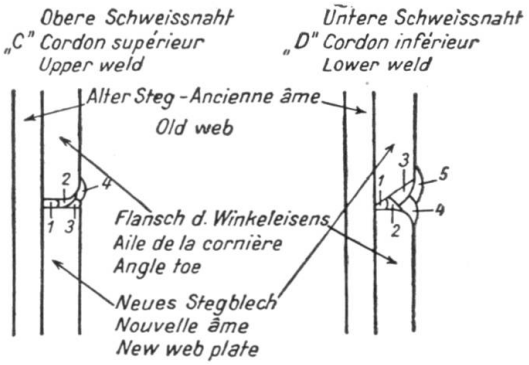


Fig. 4.

Soudures d'âme bout à bout telles qu'elles ont été effectuées.

L'idée qui a présidé au choix de la méthode adoptée en définitive était d'obtenir une soudure couvrante (fig. 4: C 2 et D 4) offrant une meilleure résistance à la contraction mise en jeu par le retrait des cordons de soudure (fig. 4: C 3 et C 4, D 5) que celle que pouvait fournir le métal des cornières. Après adoption de la méthode ainsi exposée, on n'a plus constaté aucune fissure sur les cordons de soudure, tant immédiatement après leur pose que par la suite.

IIIb 7

La réduction des contraintes thermiques dans les constructions métalliques soudées.

Verminderung der Wärmespannungen in geschweißten Stahlbauten.

The Reduction of Thermal Stresses in Welded Steelwork.

Dr. Ing. A. Dörnen,
Dortmund-Derne.

Les *contraintes thermiques* dans les constructions métalliques soudées se composent des *contraintes de laminage,* engendrées dans les différentes barres par le laminage, et des *contraintes de soudage* qui s'ajoutent par suite du soudage. Ces contraintes s'additionnent. Deux problèmes en résultent:

1° Réduire à un minimum les contraintes thermiques dans les ouvrages métalliques soudés,

2° Déterminer si les inévitables contraintes thermiques mettent en danger la résistance des constructions métalliques soudées.

Les *contraintes de laminage* existent dans tous les profilés laminés, même dans les ronds, elles résultent de l'inégalité du refroidissement. Le noyau d'une barre ronde refroidie est soumis à la traction et l'enveloppe à une compression correspondante. Après le laminage, la barre se refroidit de l'extérieur vers l'intérieur, l'enveloppe est donc froide avant le noyau. Au début le noyau est encore plastique et suit le retrait de l'enveloppe, sans être mis sous tension. L'enveloppe se durcit et ne peut alors plus suivre plastiquement le retrait du noyau. Elle est donc soumise à une compression élastique qui, après le refroidissement, correspond à une traction élastique dans le noyau. Il est simple de contrôler ces rapports de tension par des essais:

Si l'on tourne par ex. un rond laminé de 80 mm d'épaisseur et 1000 mm de longueur jusqu'à 30 mm de diamètre, on libère le noyau soumis à la traction de l'enveloppe qui empêche sa contraction et le noyau se raccourcit de 0,15 mm. Cela correspond à une contrainte moyenne de laminage de 300 kg/cm² dans le noyau.

Un recuit permet de réduire les contraintes de laminage mais non pas de les éliminer car, lors du refroidissement qui suit le recuit, on a les mêmes rapports que dans la barre encore rouge après le laminage. Les contraintes résiduelles dans la barre sont d'autant plus faible que le refroidissement est plus lent. L'essai suivant montre que même un recuit répété ne peut pas supprimer toutes les tensions dans une barre:

On a porté 63 fois au rouge clair un rond laminé de 70 mm d'épaisseur et de

1000 mm de longueur en le laissant chaque fois lentement refroidir. Il s'est raccourci régulièrement de 26 mm. Lors du chauffage, l'enveloppe qui, comme nous l'avons dit ci-dessus, est, à froid, soumise à une compression élastique, devient plastique avant le noyau. Les contraintes de traction qui existent dans le noyau encore froid et élastique en ce moment refoulent l'enveloppe chaude et plastique. La barre devient donc plus courte et aussi plus épaisse. Après cette égalisation elle n'est sollicitée à aucun effort. Le refroidissement engendre dans la barre des contraintes thermiques dont la grandeur et la répartition sont les mêmes qu'après le laminage. Si l'on répétait cet essai un nombre assez grand de fois, la barre deviendrait finalement une sphère.

Dans les barres laminées de forme plus compliquée, les contraintes de laminage sont en général plus grandes que dans les simples ronds. J'ai déterminé dans l'âme de profilés NP 50 une compression provenant du laminage de 170 kg/cm² et dans l'âme de profilés à larges ailes $42^1/_2$ une compression atteignant même 1600 kg/cm².[1] Cette grande différence provient de la différence dans le rapport entre les ailes et l'âme. Dans la construction des ouvrages soudés il faut donc employer des profilés simples avec les plus faibles contraintes de laminage.

Lors du soudage, les *contraintes de soudage* s'ajoutent aux contraintes de laminage. Leur grandeur et leur extension dépend des moyens employés et de la suite du soudage.[2],[3] Toutes les autres conditions restant les mêmes, ces contraintes croissent avec la grandeur de la section des soudures. La section des cordons de soudure ne doit donc pas être plus grande qu'il n'est nécessaire. Il faut par conséquent préférer les soudures en X aux soudures en V car pour un angle d'ouverture de 90° et des pièces de même épaisseur, une soudure en X possède la même résistance qu'une soudure en V, avec une section de moitié plus petite (qui demande par conséquent la moitié moins de travail) et de plus faibles contraintes de soudage. En outre, l'excentricité des soudures en V produit des distorsions que l'on ne peut éliminer que rarement en plaçant de manière appropriée les pièces à assembler. Après le soudage il faut procéder à une rectification coûteuse et pas très avantageuse pour la pièce en question.

Dans des cordons de même section, les contraintes de soudage sont plus grandes lorsque l'on exécute la soudure en une seule passe au moyen d'une électrode épaisse que lorsqu'on la fait en plusieurs passes avec de minces électrodes. Il ne faudrait jamais employer des électrodes de plus de 8 mm de diamètre dans la construction métallique. D'autre part il ne faut pas descendre au-dessous de 4 mm sinon la fusion des fortes sections généralement employées dans la construction métallique n'est pas suffisante pour garantir une bonne pénétration.

Le soudage à pas de pélerin permet peut-être de réduire un peu les contraintes de soudage mais il faut tenir compte des nombreuses reprises et de leurs inconvé-

---

[1] Dr. Ing. *Dörnen:* „Schrumpfspannungen an geschweißten Stahlbauten". Der Stahlbau 1933, fasc. 3.

[2] Dr. Ing. *Schroeder:* „Zustandsänderungen und Spannungen während der Schweißung des Stahlbaues für das Reiterstellwerk in Stendal". Der Bauingenieur 1932, fasc. 19/20.

[3] Dr. Ing. *Krabbe:* „Entstehung, Wesen und Bedeutung der Wärmeschrumpfspannungen". Elektroschweißung 1933, fasc. 5.

nients. Par conséquent il faudrait souder régulièrement en une seule fois et à partir du milieu de la pièce vers les extrémités.

Dans un article publié en 1936[4] ainsi que dans son rapport, *Bierett* fait une distinction entre les contraintes de soudage naturelles et les contraintes de soudage additionnelles; il divise ces dernières en contraintes dues à une fixation interne et contraintes dues à une fixation externe. Les contraintes naturelles de soudage correspondent aux contraintes de laminage et doivent être étudiées les premières. En général elles ne sont pas plus grandes[5] que les contraintes de laminage et — d'après *Bierett* — pas du tout dangereuses, de même que ces dernières. Les contraintes additionnelles de soudage par fixation interne, proviennent de ce que le joint à souder est exécuté en différentes passes successives sur sa longueur et sa section; le métal d'apport fondu précédemment est déjà froid lorsqu'on applique de nouvelles passes. Ces contraintes sont tout spécialement critiques dans la racine des fortes soudures et peuvent facilement provoquer des fissures; dans ce cas, la soudure est défectueuse dans son noyau. On peut fortement réduire ces contraintes en martelant soigneusement les passes déjà froides et — ainsi que le recommande *Bierett* — en chauffant les parties déjà terminées de la soudure jusqu'à ce que la soudure ou tout au moins sa racine soit exécutée sur toute sa longueur. Pour les soudures très importantes, comme par ex. les soudures bout à bout des semelles tendues, je recommande de souder le cordon au delà des dimensions des semelles, de chauffer au rouge clair le joint des deux côtés sur une longueur de 25 cm et d'usiner le bourrelet de soudure aux dimensions des semelles — éviter les travaux sur du métal chauffé au bleu! —. De cette façon, non seulement on élimine toutes les contraintes additionnelles de soudage provenant de la fixation interne mais en outre on rend plus dense la structure de la soudure et l'on rend plus intime la liaison de la soudure au métal de base dans la zone de transition. Cette méthode permet d'introduire dans les joints de semelles, les joints d'âme et même dans les joints universels de poutres à âme pleine, un état de tension correspondant à peu prés à celui qui existerait si le tout avait été laminé en une seule fois. Les brûleurs à gaz se sont révélés très propres à ce genre d'opération; ils se composent de longs tuyaux avec une série de trous et on les place d'une manière adéquate sur la pièce à traiter. A l'atelier, les brûleurs sont alimentés par la conduite de gaz. Pour le chantier on peut employer soit du gaz comprimé soit du gaz liquide.

Les contraintes additionnelles de soudage par fixation externe se présentent lorsque les pièces à souder ne peuvent pas suivre le retrait de la soudure. Des mesures spéciales permettent d'éliminer ou de réduire fortement ces contraintes dans les types d'ouvrages que l'on soude le plus souvent à l'heure actuelle, c'est-à-dire les poutres, les arcs et les cadres à âme pleine, les poutres du type *Langer* ainsi que les poutres Vierendeel. C'est ce que nous exposerons ci-dessous pour résoudre le *premier* problème posé.

La poutre à âme pleine la plus simple et la meilleure se compose d'une âme

---

[4] Prof. Dr. *Bierett:* „Welche Wege weisen die Erkenntnisse über Schrumpfwirkungen den Arbeitsverfahren für die Herstellung von Stumpfnähten im großen Stahlbau?" Der Stahlbau 1936, fasc. 9.

[5] Dr. Ing. *Dörnen:* „Schrumpfspannungen an geschweißten Stahlbauten". Der Stahlbau 1933, fasc. 3.

et de deux semelles sans aucun joint sur toute la longueur de la poutre. Il suffit dans ce cas d'effectuer les soudures de gorge et de souder les raidisseurs. Si on le juge nécessaire on peut presque complètement éliminer des soudures de gorge les contraintes thermiques additionnelles dues à la fixation interne en chauffant à 400—500° chaque cordon sur toute sa longueur. Si l'on fait en sorte que les semelles puissent suivre sans résistance le retrait transversal des soudures de gorge on n'a aucune contrainte thermique additionnelle due à la fixation externe. Il est préférable de ne souder les raidisseurs que lorsque l'âme et les semelles sont soudées. Après le soudage des cordons de gorge l'âme est soumise d'abord à une compression qui est atténuée ou même transformée en traction par le soudage des raidisseurs, parallèlement ou perpendiculairement à l'axe de la poutre. Par le fait même, la traction qui existe dans les cordons de gorge et leurs environs

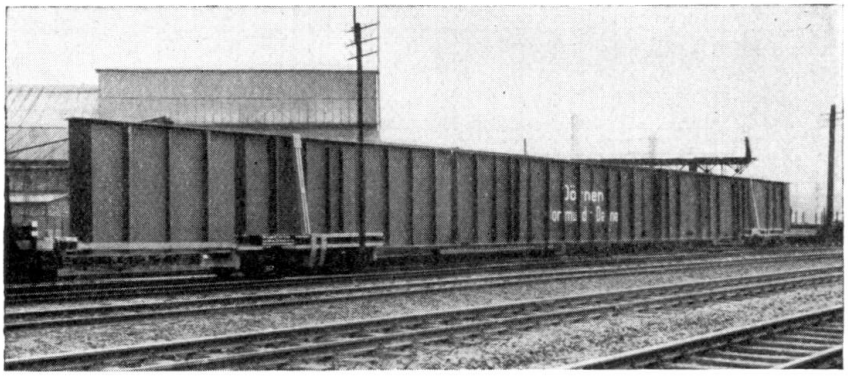


Fig. 1.

devient plus faible, surtout lorsque les extrémités des cordons de fixation des raidisseurs verticaux se trouvent suffisamment éloignées des cordons de gorge. Une épaisseur de 3 mm suffit pour les soudures verticales des raidisseurs. La simplicité de cette exécution est réduite lorsque les dimensions de la poutre dépassent certaines valeurs, soit en longueur, soit dans l'épaisseur des membrures. Les semelles trop épaisses ne sont pas à recommander car leur laminage présente des difficultés. Pour l'acier St. 37. 12, on ne devrait pas dépasser 50 mm. Lorsque l'on a besoin de semelles plus épaisses on se servira plus volontiers de plusieurs semelles, elles-mêmes si possible sans joints. Dans de pareils cas il faut d'abord souder l'âme à la seule semelle intérieure car les forces de traction longitudinales engendrées par le retrait des soudures de gorge sont, dans des cordons de même section, plus faibles lorsque les sections à assembler sont plus faibles et par le fait même plus compressibles. La traction est encore réduite par les soudures d'angle fixant les autres semelles. Il est préférable de souder les raidisseurs lorsque l'âme est soudée aux seules semelles intérieures.

Lorsque la poutre est trop longue, l'âme ou les membrures ou les deux auront des joints. En général il est préférable de joindre les âmes que les semelles. On soude d'abord (bout à bout) les âmes entre elles. Les soudures seront éventuellement libérées par chauffage des contraintes additionnelles dues à la fixation interne et étudiées aux rayons X. On évite des contraintes thermiques dues à la fixation externe en plaçant simplement les pièces l'une contre l'autre lors du soudage des cordons. On ne peut pas prétendre que cela empêchera toute fissu-

ration de la soudure soumise au retrait. La bonne qualité de toute soudure bout à bout dépend en premier lieu de la perfection de la racine qui ne doit pas

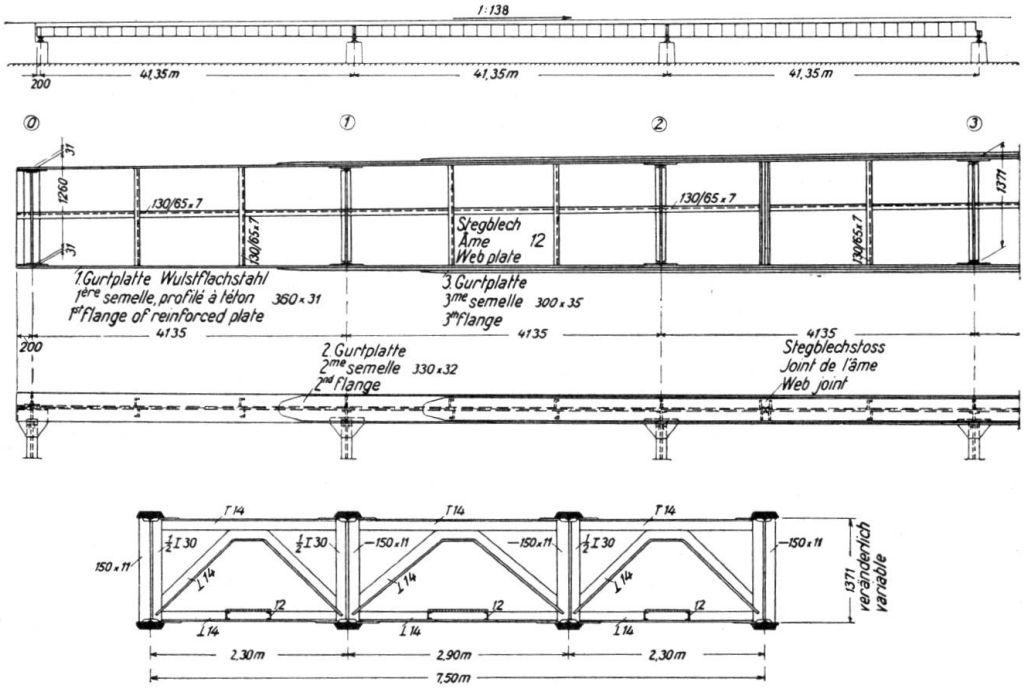


Fig. 2.

Poutres soudées.

présenter la plus fine fissure. On découpe ensuite les bords de l'âme conformément à la contre-flèche de la poutre, on prépare puis on exécute le soudage des

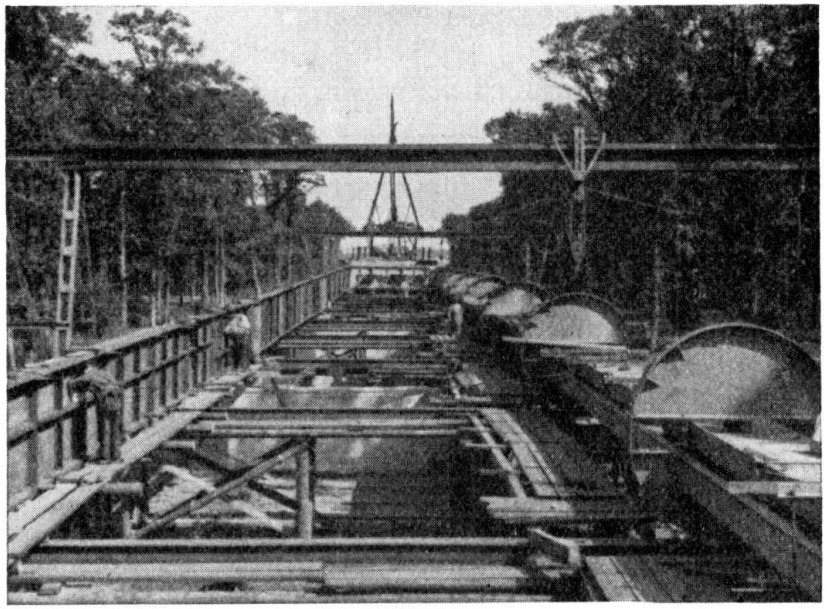


Fig. 3.

semelles. On applique les raidisseurs lorsque l'âme est soudée aux semelles intérieures. Il faut cependant éviter de placer les raidisseurs verticaux aux en-

virons des joints verticaux de l'âme afin que ces derniers ne soient pas trop fortement sollicités à la traction.

Si l'on ne peut plus éviter les joints dans les semelles, on soude chaque bande de semelles pour soi et alors seulement on les assemble à l'âme ainsi que nous

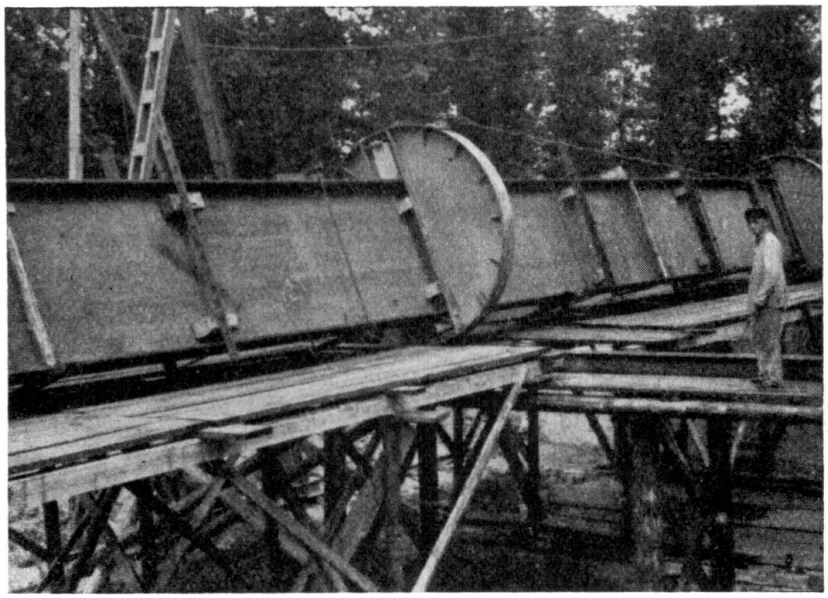


Fig. 4.

venons de l'exposer. Ce processus donne de si bons résultats que tout se passe comme si l'on n'avait aucun joint. Il faut au préalable éliminer par chauffage les contraintes thermiques additionnelles engendrées dans les joints des semelles par

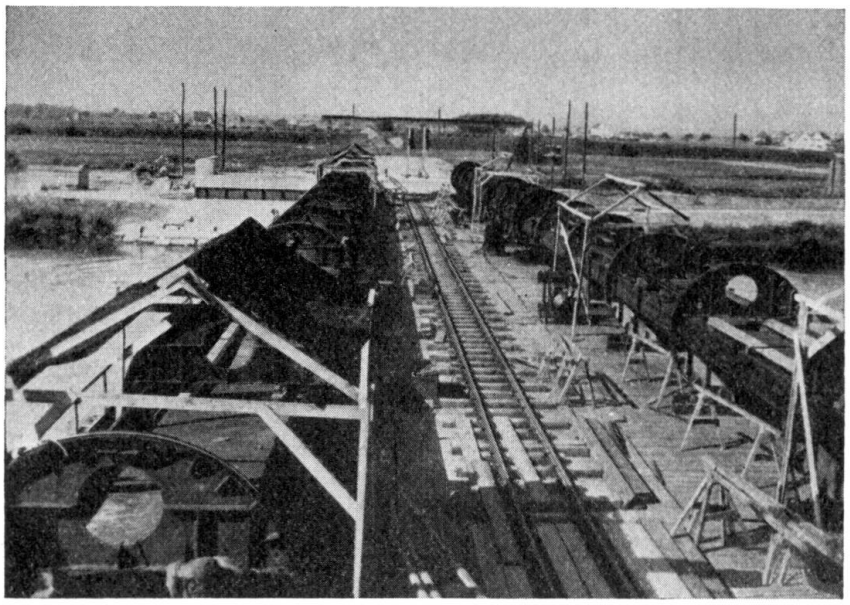


Fig. 5.

la fixation interne. De même que dans les âmes il faut éviter ici les contraintes thermiques additionnelles dues à la fixation externe. Il est avantageux de placer

les joints des semelles aux endroits où les sollicitations sont minima, dans les poutres continues par exemple, aux endroits où les moments maxima sont les plus faibles, c'est-à-dire où le matériau est le moins sollicité. Il est bon de ne pas disposer dans la même section les joints de semelles et les joints d'âme. Cette manière de procéder permet de construire à l'atelier des poutres à âme pleine de très grande longueur. La fig. 1 représente une poutre à âme pleine de 63 m de longueur, de 4 m environ de hauteur et d'un poids d'environ 105 t, exécutée de la sorte et transportée d'une seule pièce de Dortmund-Derne au chantier (Rügendamm). Lorsque les dimensions sont plus grandes encore on peut entièrement souder sur le chantier les âmes et les

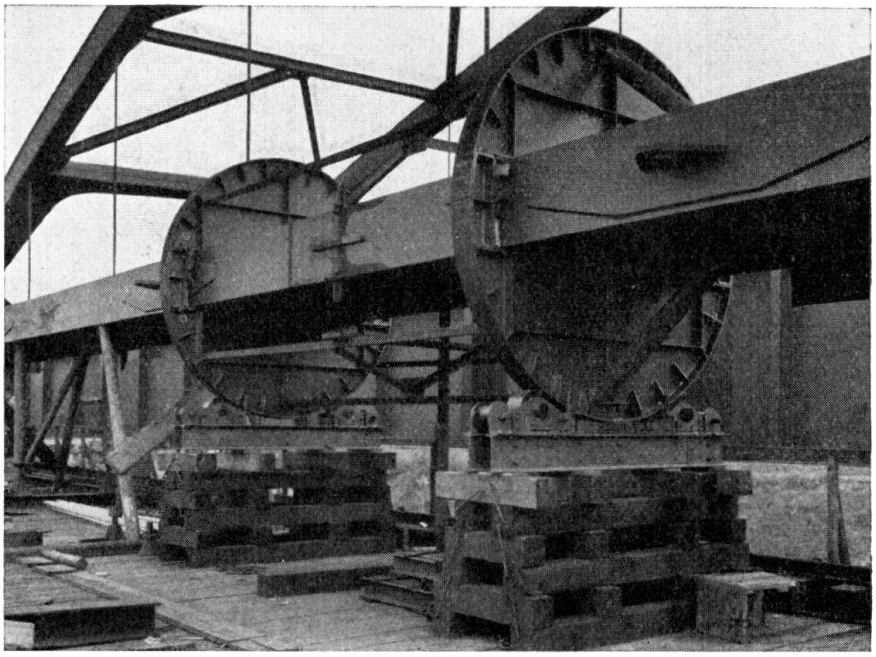


Fig. 6.

semelles. Il suffit dans ce cas de prévoir les mêmes installations et les mêmes conditions qu'à l'atelier. Il est évident que dans ce cas tous les cordons doivent être exécutés, même sur le chantier, en position normale, en plaçant les poutres dans des dispositifs rotatifs, et en outre à l'abri des intempéries. Comme exemple, citons la construction en acier St. 52 de 4 poutres à âme pleine soudées de 130 m de longueur chacune (poutres sur 4 appuis, fig. 2, 3 et 4) pour le pont sur l'Elbe près de Dömitz. Ces poutres ont été construites exactement suivant la méthode ci-dessus. Nous n'avons rencontré aucune difficulté quoique ce fut la première fois que l'on procédait de la sorte. C'est suivant la même méthode que l'on a construit les poutres raidisseuses, d'une longueur de 95 m environ, d'un pont d'autoroute du type *Langer* franchissant le Lech près d'Augsburg (fig. 5 et 6).

On voit que les conditions sont jusqu'à présent extraordinairement favorables pour le soudage des poutres à âme pleine. Elles deviennent plus compliquées lorsqu'il est impossible d'éviter les joints universels, et lorsqu'il faut rassembler par soudage des éléments de poutre terminés. On ne peut plus éviter alors les contraintes thermiques additionnelles dues à la fixation externe. On peut

cependant les maintenir dans des limites admissibles en adoptant une suite adéquate du soudage; on peut en outre faire en sorte que, par exemple dans les zones soumises à une forte traction, le soudage engendre une compression agissant comme précontrainte et inversément. Citons comme exemple le joint

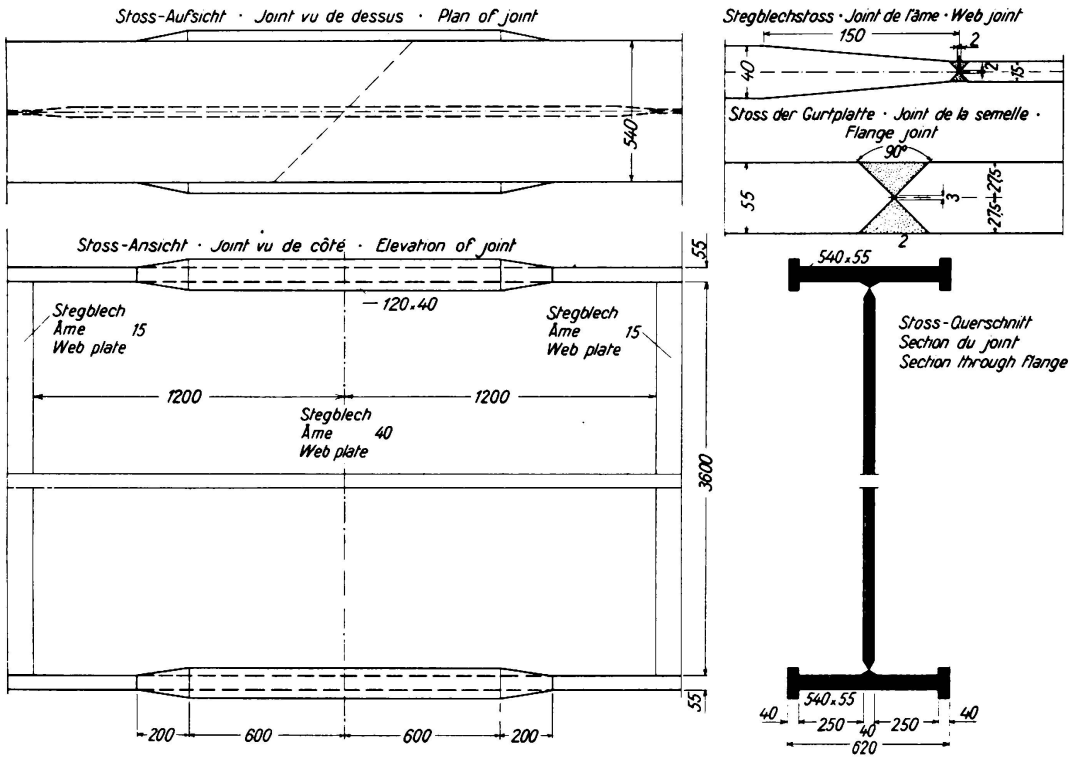


Fig. 7.

représenté à la fig. 7 des poutres à âme pleine du pont sur le Strelasund de la digue de Rügen. Il s'agit d'une poutre continue soudée reposant sur 6 appuis et dont les ouvertures ont chacune 54 m. Des mensurations exactes du Laboratoire d'essai des matériaux de Dahlem ont permis de fixer une suite du soudage telle que la membrure la plus fortement sollicitée à la traction par le poids propre et

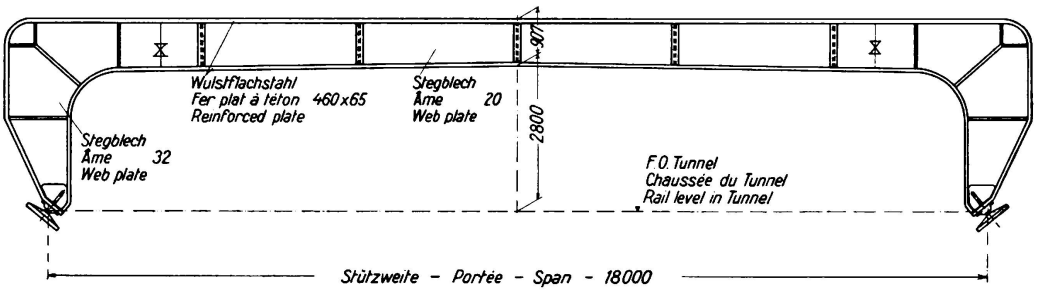


Fig. 8.

la surcharge était soumise à une précontrainte de compression d'environ 300 kg. L'âme renforcée était, en son milieu, soumise à une précontrainte de traction d'environ 350 kg.

Dans les arcs et les cadres à âme pleine, les contraintes thermiques sont à peine plus défavorables que dans les poutres à âme pleine, pour autant que l'on puisse

éviter les contraintes dues à la fixation externe. Pour le cadre de la fig. 8 (Duisburg) on a d'abord soudé les trois pièces de l'âme puis seulement les deux membrures qui sont d'une seule pièce sans joint et pliées. Du fait que l'on a soudé à partir du milieu, vers les deux articulations et que l'on a appliqué les semelles à l'âme grâce à un dispositif spécial, on a pu éliminer les contraintes thermique additionnelles dues aux fixations externes.

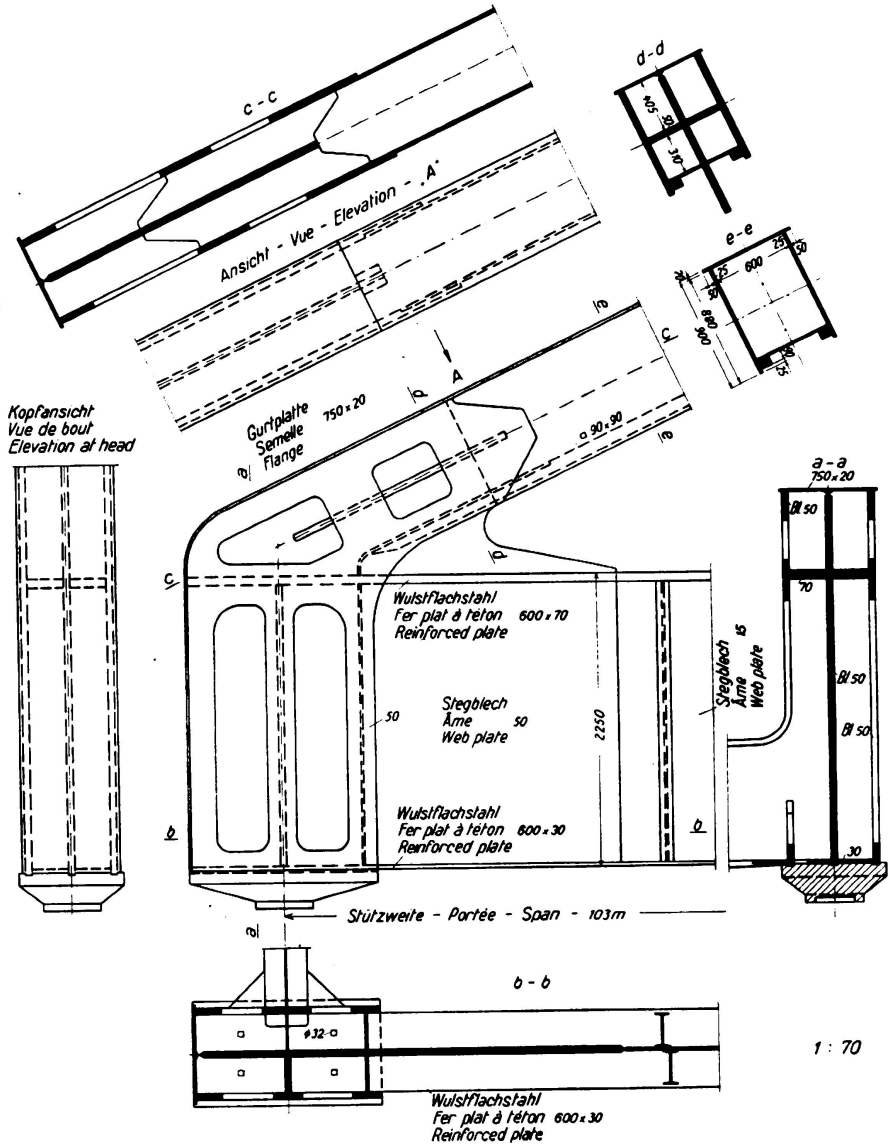


Fig. 9.

Jusqu'ici nous n'avons parlé que de constructions que l'on peut considérer comme planes. La lutte contre les contraintes de retrait dues à la fixation externe est beaucoup plus compliquée dans les constructions spatiales. Dans certains cas il faut appliquer des mesures spéciales. La fig. 9 représente par exemple l'extrémité d'une poutre du type *Langer* de 104 m de portée, complètement soudée et composée uniquement de profilés laminés. Même si le soudage de cette pièce n'a présenté aucune difficulté insurmontable, son exécution n'était cependant pas des plus simples. Cette pièce exigeait de nombreux travaux de soudage.

Elle a été exécutée à 8 exemplaires en tout pour les deux ponts juxtaposés. De nombreuses investigations, y compris aux rayons X, ont prouvé la perfection de son exécution. L'expérience acquise dans cette construction nous a conduit à exécuter suivant la fig. 10 la pièce d'extrémité d'une poutre du type *Langer* de 95 m de portée. Afin de simplifier les travaux de soudage et de réduire les contraintes de retrait on a introduit une pièce forgée entre l'arc à paroi double et la poutre raidisseuse à paroi simple. Cette pièce pénètre fortement dans la poutre raidisseuse et a été soudée d'une manière simple et parfaite, sans con-

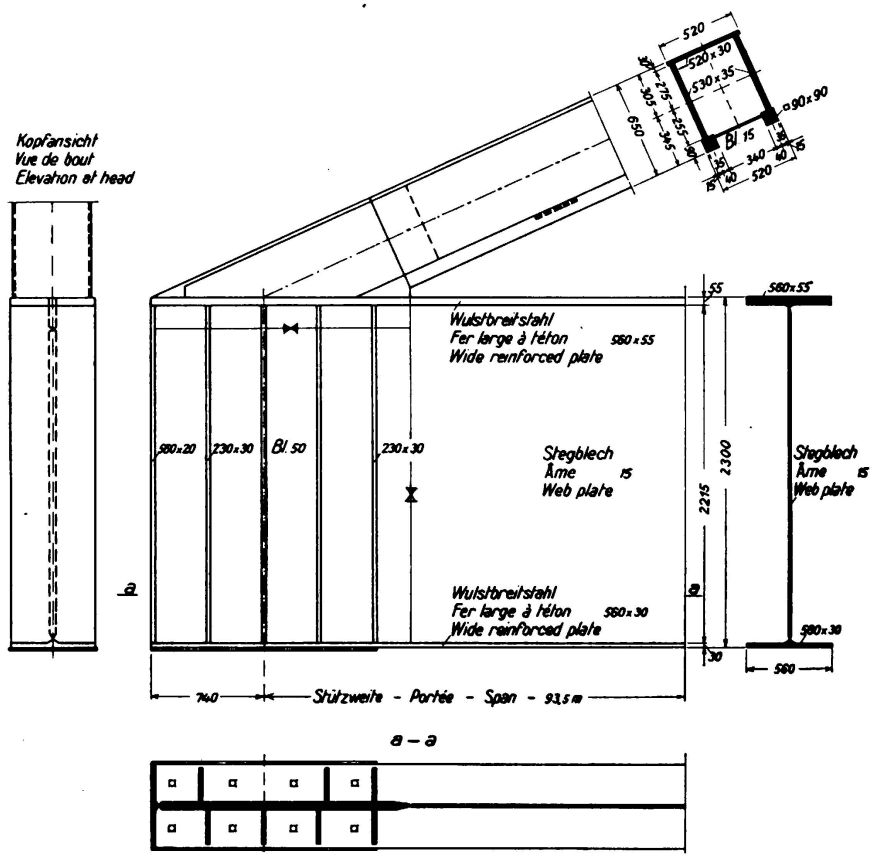


Fig. 10.

traintes de retrait dues à la fixation externe, avec l'âme et la semelle fendue. C'est sur cette pièce forgée que repose l'arc à paroi double. Je crois que cette solution se justifie d'elle-même et je ne m'y arrêterai pas plus longtemps.

Pour éviter les contraintes de retrait, il ne faut pas craindre, dans certains cas particuliers, d'avoir recours au rivetage dans un ouvrage soudé. Cela permet souvent de réaliser une économie. Il ne faut pas vouloir tout souder dans toutes les circonstances. Cette manière de voir a été approuvée au dernier congrès international de Paris en 1932. Il est par exemple toujours avantageux de river les assemblages des longerons et des entretoises ainsi que les assemblages du contreventement dans les ponts métalliques soudés. Pour ériger de grands ponts, on doit recourir en ces points à des assemblages boulonnés, et ceci afin de simplifier le travail de mise en place des différentes parties de la superstructure. On peut donc disposer ces assemblages boulonnés de telle sorte qu'ils suffisent comme assemblages rivés tout en économisant des soudures. L'expérience m'a

montré que la façon la plus économique de construire des ponts réticulés soudés est d'assembler par soudures les différents membres du treillis et du tablier à l'aide de profilés laminés et de river les noeuds et les attaches. Dans les sections tendues on peut compenser l'affaiblissement produit par les trous de rivets en soudant des renforcements locaux. J'ai construit, d'après cette méthode et avec d'excellents résultats au point de vue économique, plusieurs superstructures dont la fig. 11 donne un exemple.

Le second problème est résolu lorsque, comme dans toutes les constructions normales avec cordons d'épaisseur normale, les contraintes thermiques ne sont pas plus grandes que les contraintes de laminage dans les profilés laminés. Nous

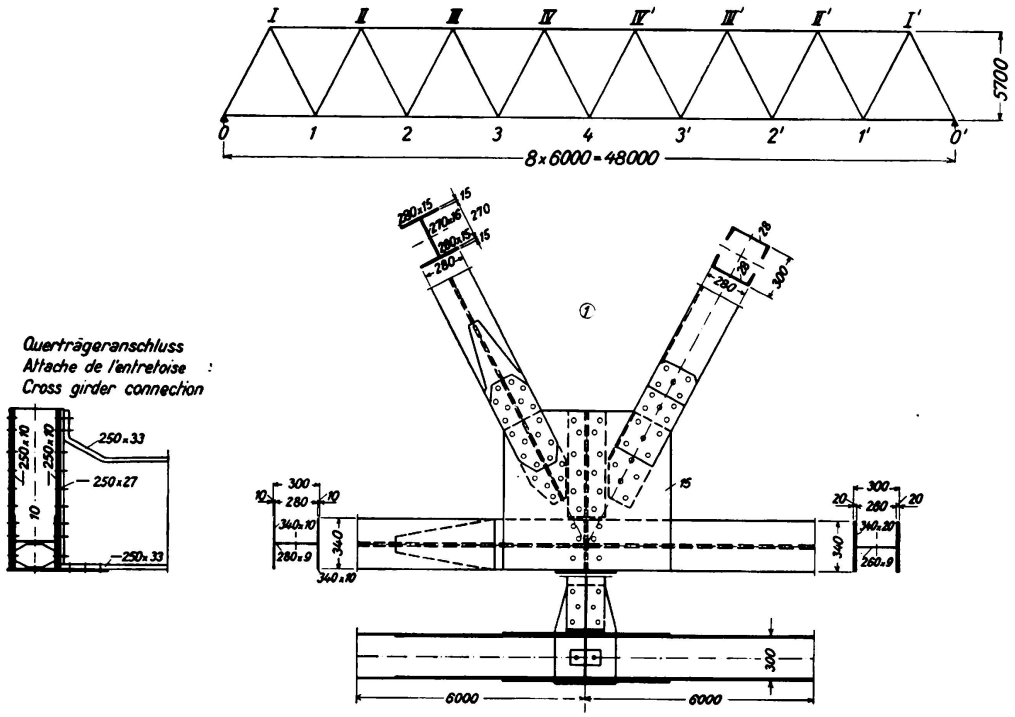


Fig. 11. Poutre-maîtresse. Noeud No. 1.

savons en effet, par l'expérience acquise au cours de plusieurs décades, que ces dernières ne sont pas dangereuses. Cependant on a mesuré dans des constructions d'un type spécial, avec soudures très épaisses, des contraintes de soudage qui dépassent parfois 2000 kg/cm². On ne peut pas considérer sans autre de telles contraintes comme non dangereuses. Le *Dr. Schroeder* a publié en 1931 un rapport à ce sujet où il explique l'origine de ces fortes contraintes de soudage. Des essais effectués sur de petites pièces ont montré que ces contraintes de soudage ne s'ajoutent pas aux contraintes engendrées par la surcharge et par conséquent ne mettent pas en danger la résistance de la pièce. Ce phénomène n'a trouvé aucune explication fondée mais c'est un fait dûment constaté. Des doutes subsistaient cependant toujours et le *Dr. Schaper* s'est décidé à entreprendre des essais sur des pièces de grandeur naturelle; les résultats acquis seront prochainement publiés.[6] Décrivons un de ces essais: On a découpé les deux angles d'un

[6] Publiés depuis lors: *Schaper:* „Die Schweißung im Ingenieurhochbau und Brückenbau". Elektroschweißung 1937, fasc. 7.

cadre complètement soudé du tunnel pour piétons de Duisburg (fig. 8) et on les a placé dans la presse de 600 t de Dahlem. On a mesuré dans ces pièces les contraintes de soudage indiquées à la fig. 12. L'angle a supporté des contraintes d'essai de 2500 kg/cm² sans subir aucun dommage apparent. La machine ne permettait pas d'appliquer une plus forte surcharge, c'est pourquoi ces angles seront placés dans une machine plus forte. Cet essai prouve que même des contraintes de soudage de plus de 2000 kg/cm² ne mettent pas en danger la résistance des constructions soudées. Les autres essais de *Schaper* ont fourni le même résultat.

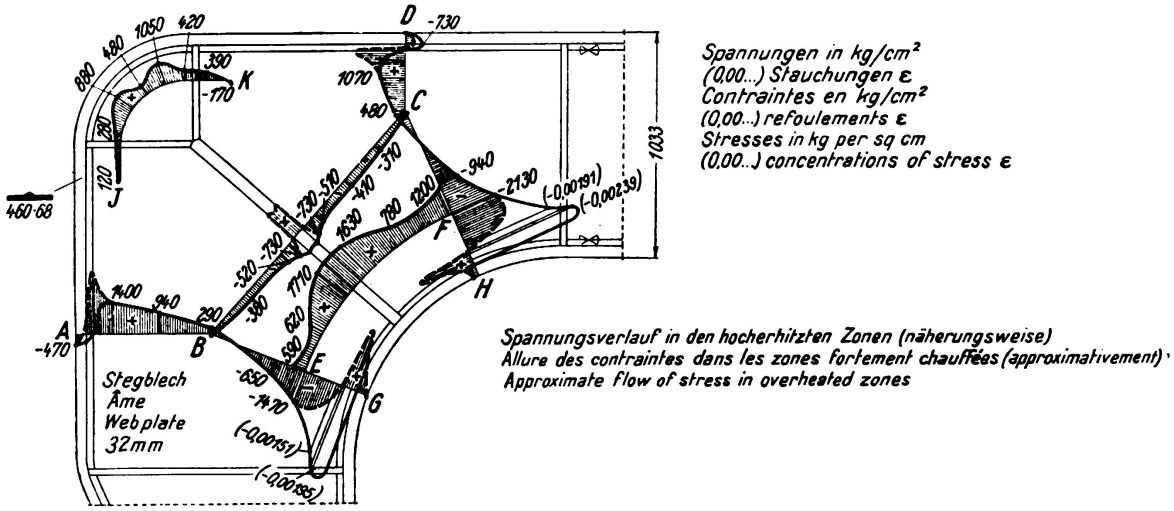


Fig. 12.

Mensuration des contraintes de soudage lors de la construction.

En terminant je voudrais citer un article de *Körber* et *Mehovar*[7] dans lequel les auteurs démontrent que le remisage des rails nouvellement laminés en modifie les propriétés mécaniques: L'allongement et la striction qui précèdent la rupture — caractéristiques pour les hautes capacités de travail — croissent d'une manière importante avec un remisage prolongé. Le recuit peut accélérer et augmenter cet effet. On suppose que la raison en est l'égalisation des contraintes structurales. On ne peut pas transposer sans autre à nos aciers de construction les relations trouvées pour les aciers de rails. D'autres part ces relations ne peuvent pas s'écarter fortement les unes des autres. On peut donc conclure que le remisage provoquera également une égalisation des contraintes structurales dans les cordons de soudure. Si les auteurs, que nous venons de citer ont pu constater un accroissement de l'allongement et de la striction par suite d'un recuit modifiant la cristallisation, on peut penser qu'il faut appliquer un traitement correspondant aux soudures importantes et à leurs environs. Je suis d'avis qu'à ce point de vue il est encore possible d'améliorer les cordons de soudure.

---

[7] *Friedrich Körber* et *Johannes Mehovar:* „Beitrag zur Kenntnis der zeitlichen Änderungen der mechanischen Eigenschaften walzneuer Schienen, insbesondere aus Thomasstahl". Mitteilungen aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung zu Düsseldorf, vol. XVII, livraison 7, mémoire 277.

IIIb 8

Sur la pratique des constructions soudées.

Aus der Praxis der geschweißten Konstruktionen.

Structural Welding in Practice.

Dr. Ing. A. Fava,
Chef de Service aux Chemins de fer de l'Etat, Rome.

Dans tous les domaines de la construction métallique, la soudure est entrée, en Italie, dans la pratique courante; on rencontre cependant quelques difficultés importantes dans la construction des grandes travées de ponts. En procédant suivant toutes les règles, on arrive assez facilement à obtenir des assemblages soudés offrant une résistance suffisante, même s'ils sont soumis à des actions dynamiques et répétées. Les difficultés proviennent cependant des déformations, qui, dans la construction des grandes poutres, se produisent durant le refroidissement des cordons, et des efforts internes qui s'introduisent dans le matériau et qui, ainsi que nous l'a montré l'expérience, sont très élevés lorsque ces déformations sont de sens contraire.

Pour limiter les déformations ou les efforts internes correspondants, sans adopter des épaisseurs trop fortes, il faut recourir à une série d'expédients et d'essais qui relèvent sensiblement le coût unitaire de ces constructions soudées. L'augmentation de prix n'est pas compensée actuellement par une diminution de poids; aussi, dans les conditions actuelles, la soudure ne convient-elle pas, au point de vue économique, à la construction des grandes travées de ponts. En Italie, il est actuellement encore nécessaire d'économiser autant que possible le poids du fer. Il nous faut faire remarquer d'autre part que les usines métallurgiques sont en train d'étudier le laminage d'une série de profilés spéciaux destinés à faciliter l'exécution des travaux de soudage et permettant de limiter les déformations; on peut attendre de ces profilés la solution économique du problème.

Le réseau des Chemins de fer de l'Etat construit actuellement des ponts complètement soudés avec poutres-maîtresses à âme pleine de 40 m de portée. Pour les portées plus grandes on choisit les ponts avec poutres-maîtresses réticulées; dans ces ponts tous les membres, y compris les traverses sont soudés et seuls les assemblages de montage (y compris la liaison des barres du treillis aux membrures) sont rivés.

La fig. 1 représente un de ces ponts et la fig. 2 montre une de ses entretoises au cours du soudage; cette dernière est montée sur un dispositif qui permet de la déplacer facilement et rapidement et qui permet en outre d'exécuter les cordons de soudure dans l'ordre le plus propre à limiter les déformations.

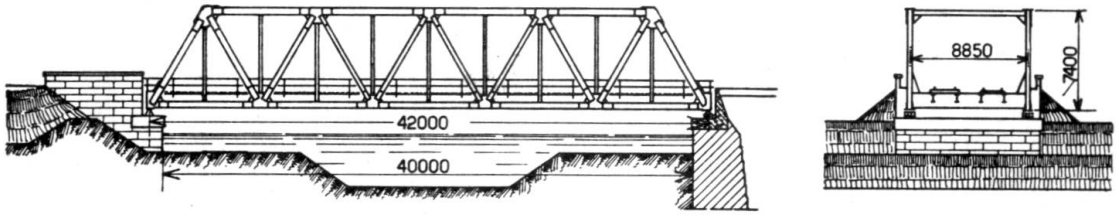


Fig. 1.

Malgré toutes les précautions destinées à réduire dans ces poutres les effets du retrait des cordons de soudure au cours du refroidissement, on obtient une certaine courbure dans la base des poutres. Du fait que ces bases doivent être absolument planes, on n'a pas trouvé d'autre remède que de donner aux fers plats qui composeront les assemblages, une courbure préventive de sens opposé

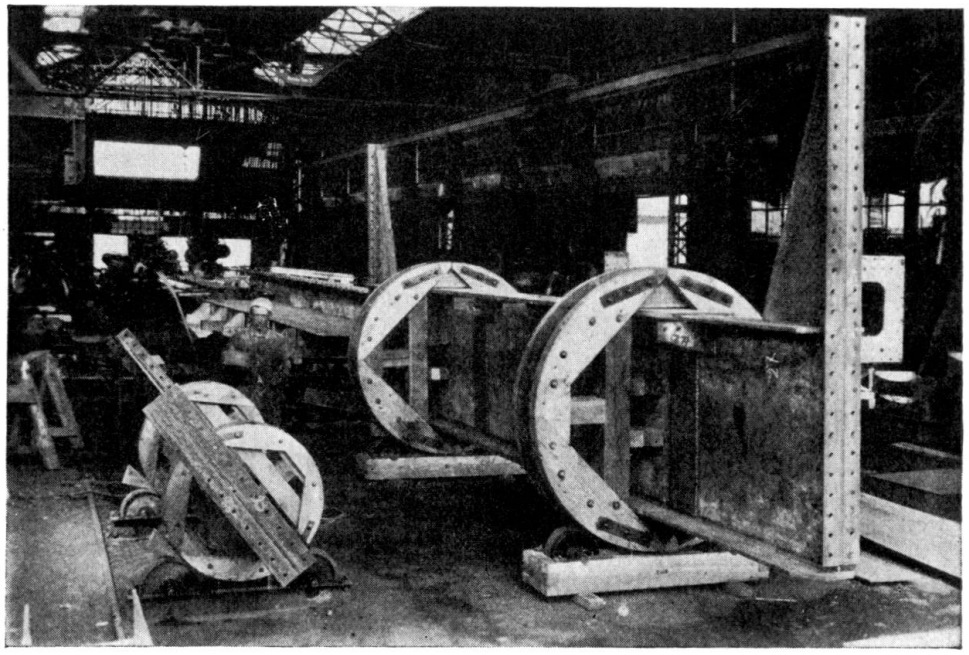


Fig. 2.

à celle qu'engendrera le refroidissement. Cela donne une idée du coût de ces constructions.

Plutôt que de s'étendre à la description de ces ponts de chemin de fer nous allons citer quelques ponts-routes ordinaires entièrement soudés. Quoique ces

ponts soient modestes, ils peuvent présenter un intérêt en tant que précurseurs de réalisations plus importantes. Ces ponts ont des poutres-maîtresses réticulées et les barres du treillis sont soudées à leurs attaches. Les sections des fers ont été

Fig. 3.

choisies par rapport aux sollicitations qu'elles doivent supporter de telle sorte que les déformations soient minima.

Les fig. 3 et 4 se rapportent à un petit pont sur le torrent Isorno près de Domodossola. Tant les nervures que les diagonales des poutres-maîtresses ont des

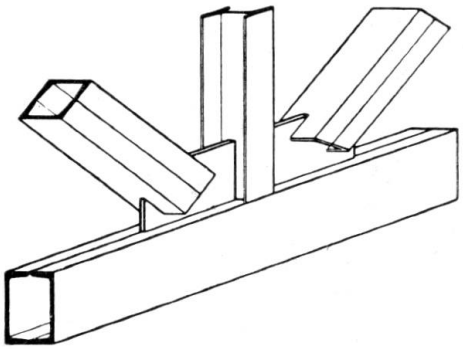


Fig. 4.

sections tubulaires obtenues en assemblant par des soudures deux profilés en [. Ces membrures (fig. 4) ont des fentes dans lesquelles sont introduites les tôles de gousset.

Les fig. 5 et 6 représentent deux ponts de 25 m sur l'Adige à Cengles. Dans ces ponts, les membrures des poutres-maîtresses sont constituées par des fers en

[reliés par des soudures; les diagonales se composent de deux fers en [reliés par des goussets; les montants sont des fers en I que l'on a découpés à la flamme

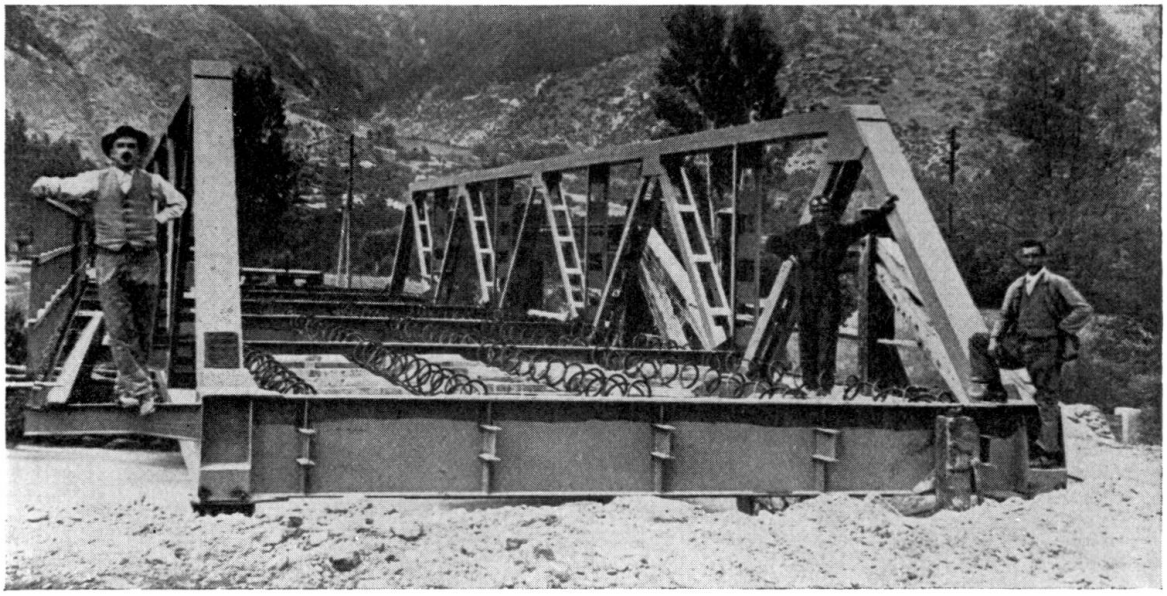


Fig. 5.

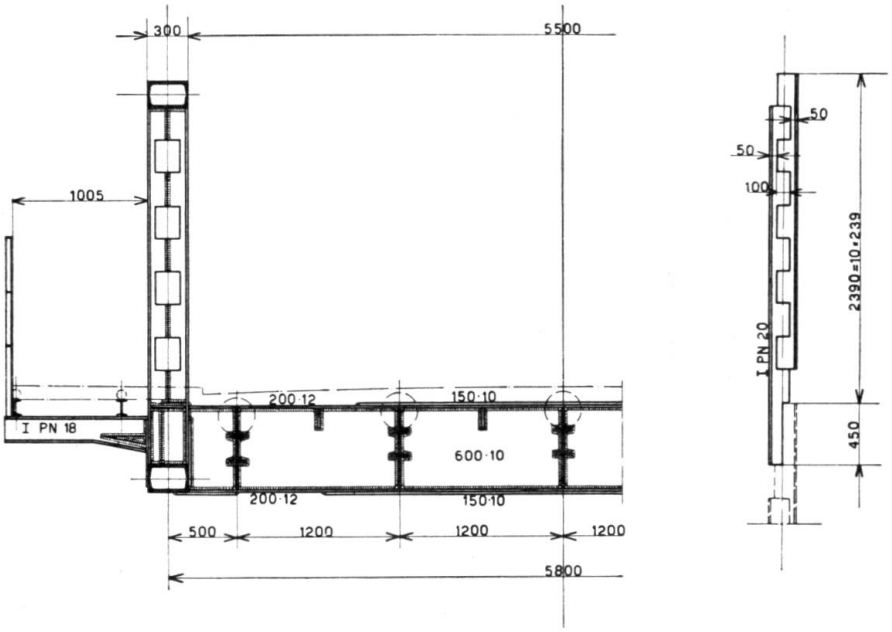


Fig. 6.

et que l'on a resoudés en déplaçant les deux pièces (fig. 6). Le tablier est en profilés laminés du type Alpha, recouverts d'une dalle de béton armé.

Les fig. 7 et 8 représentent un pont-route de 30 m de portée avec poutres-maîtresses à âme pleine, renforcées par un léger arc supérieur de compression. Dans cet ouvrage très léger et d'aspect élégant, tous les membres sont soudés, y compris les appareils d'appui.

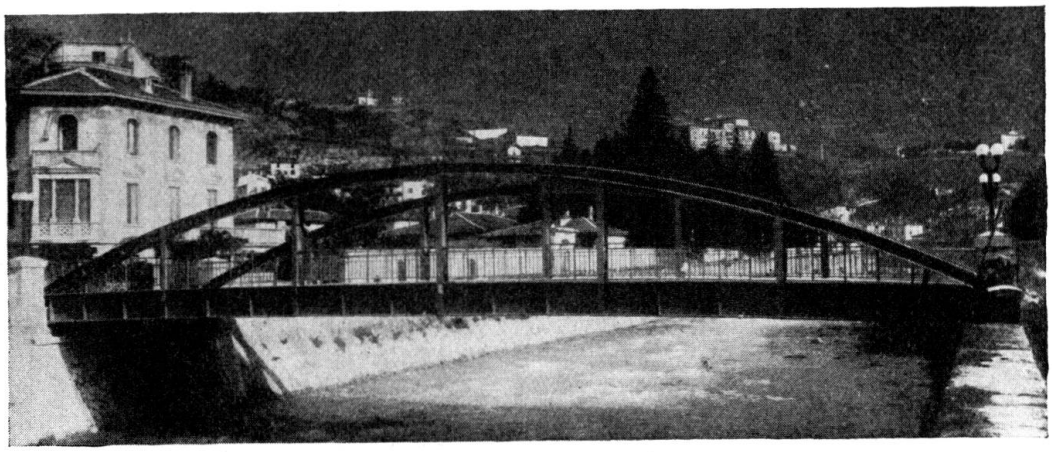


Fig. 7.

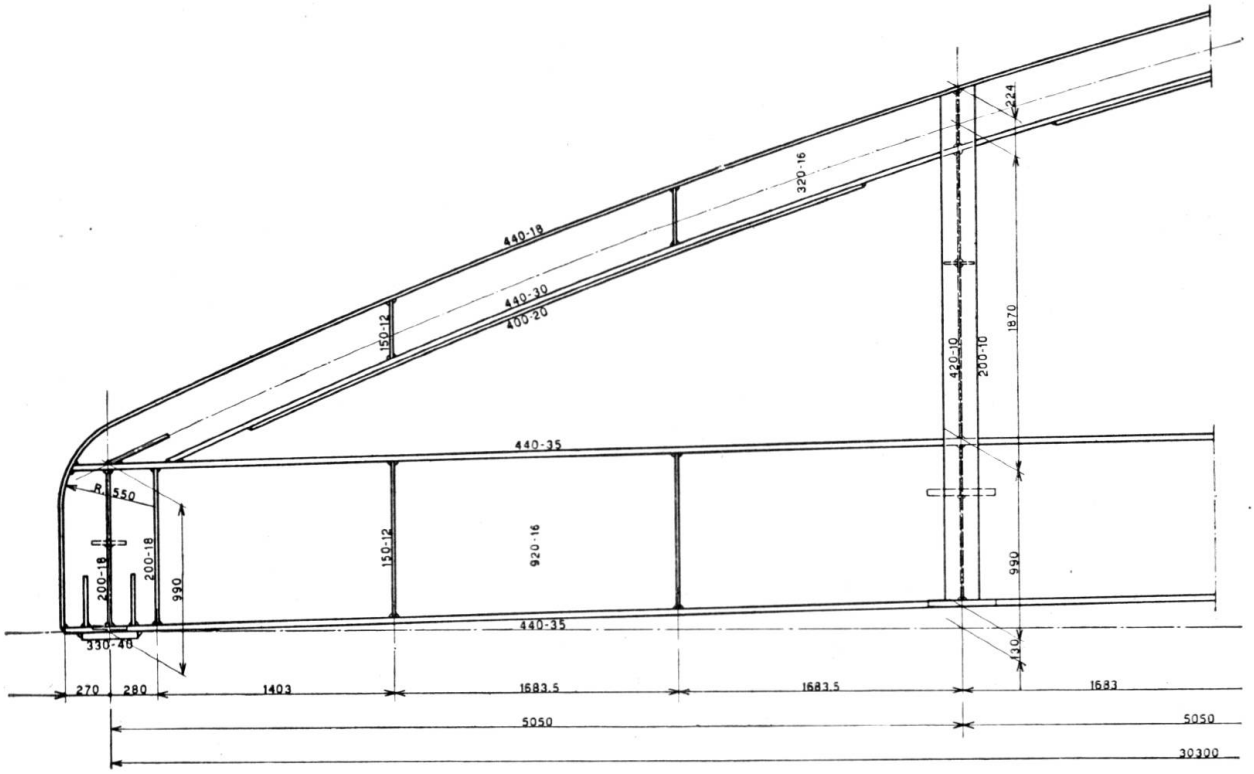


Fig. 8.