

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

Band: 3 (1948)

Rubrik: Ia: The present state of welding technic

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: 29.01.2026

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

Ial

Echecs dans la construction soudée

Rückschläge im geschweißten Stahlbau

Set-backs in welded structures

G. DE CUYPER

Ingénieur en chef, Directeur des Ponts et Chaussées, Bruxelles

Introduction

Avant de commencer la description des échecs, nous présentons quelques remarques générales :

- a) Les échecs ne sont pas dus à des erreurs de calcul ou à des dimensions insuffisantes des éléments ou de leurs assemblages. Au contraire, la rigidité propre des éléments ou celle résultant d'assemblages indéformables ont constitué des facteurs défavorables;
- b) Les fissures dans les soudures ne se sont pas produites parce que ces soudures étaient de dimensions insuffisantes. Au contraire, ce sont les soudures surabondantes, les intersections, les accumulations et les défauts qui les accompagnent, qui ont été néfastes;
- c) La description montre que l'épaisseur du métal, la structure cristalline à gros grains, la susceptibilité au vieillissement, la fragilité aux basses températures et le manque de résistance aux ruptures sans déformation ont joué un rôle important;
- d) Il résulte des constatations faites que plusieurs accidents se sont produits, tant pendant l'exécution qu'en service, par des températures basses ou à la suite de variations thermiques brusques;
- e) Si le rôle du métal d'apport semble quelque peu négligé, cela résulte de ce que, généralement, il était approprié au métal de base;
- f) La description montre que les accidents sont dus à un concours de plusieurs facteurs. Il est difficile de déceler le facteur primaire. La classification qui a été suivie dans la description ci-après peut donc paraître assez arbitraire. C'est la raison pour laquelle nous ne donnons que les facteurs probables;

g) La description ne relate pas tous les accidents. Nous n'avons pas, par exemple, décrit ceux dus aux particularités d'exécution, pouvant entraîner des effets de trempe locaux, ni ceux dus aux intersections ou jonctions superflues de soudures ou résultant de l'utilisation d'éléments contenant à l'avance des tensions résiduelles importantes.

Echecs dans lesquels la diminution de la qualité du métal de base a probablement joué un rôle

1. EPAISSEUR

Les accidents survenus montrent que les qualités métallurgiques, et tout particulièrement la non-sensibilité du métal aux ruptures brusques sans déformation, diminuent à mesure que l'épaisseur augmente. Malgré un corroyage et un laminage soignés, l'hétérogénéité des propriétés mécaniques suivant le travers et suivant l'épaisseur croît avec l'épaisseur.

2. POINÇONNAGE

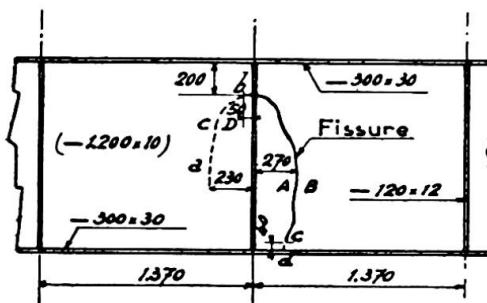
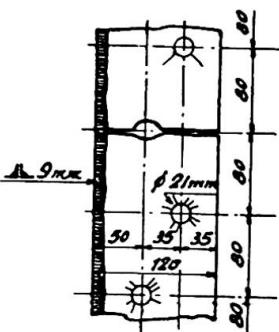


Fig. 1. Fissuration de l'âme d'une entretoise par basse température. Le détail à droite donne, en élévation, le raidisseur central fissuré.



Date de l'accident : décembre 1933.

Lieu : à l'atelier.

Température lors de l'accident : $\approx 0^\circ \text{C}$

Acier : Thomas ordinaire (nuance 37-44).

Nature de l'accident : fissuration de l'âme d'une entretoise.

Facteurs probables : poinçonnage des trous de rivets qui, malgré un alésage de 2 mm, a laissé des fissures microscopiques radiales. — Ecrouissage. — Vieillissement accéléré par le traitement thermique résultant de l'exécution des soudures voisines. — Tensions de retrait résultant de la fixation continue du raidisseur sur l'âme et les semelles par soudures trop fortes, déposées suivant un ordre non approprié.

3. CISAILLAGE

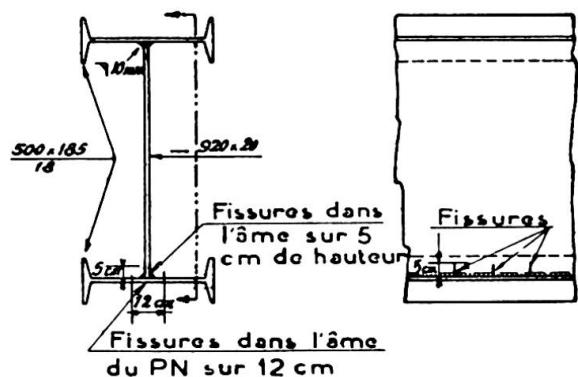
Date de constatation de l'accident :
juin 1936.

Lieu : à l'atelier.

Température : probablement normale.

Acier : Thomas ordinaire (nuance 42-50).

Fig. 2. Fissuration d'une membrure dont l'âme présentait des fissures microscopiques résultant d'un cisaillement.



Nature de l'accident : fissuration de l'âme d'une membrure.

Facteurs probables : le cisailage de l'âme a produit des fissures microscopiques normales à la coupe. — Ecrouissage. — Vieillissement accéléré par le traitement thermique résultant de l'exécution des soudures. — Tensions de retrait dues à des soudures d'angle de dimensions trop fortes, déposées par des électrodes de 7 mm de diamètre. — Les fissures microscopiques se sont propagées sous l'effet des tensions de retrait.

4. MORTAISAGE OU DÉCOUPAGE À ANGLES VIFS

Date de la constatation de l'accident :

avril 1936.

Lieu : à l'atelier.

Température : probablement normale.

Acier : Thomas ordinaire (nuance 42-50).

Nature de l'accident : fissuration d'une âme de raidisseur de montant.

Facteurs probables : parachèvement insuffisant des surfaces découpées. — Ecrouissage. — Vieillissement accéléré par la soudure. — Tensions de retrait résultant de la fixation d'une pièce mince, de dimensions réduites, présentant des angles vifs rentrants, sur des éléments rigides par leur épaisseur.

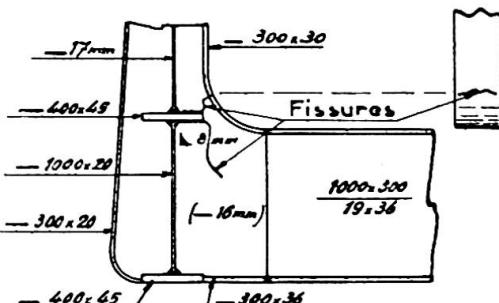


Fig. 3. Fissuration de l'âme du raidisseur d'un montant par suite d'un mauvais parachèvement.

5. CINTRAGE À FROID AVANT SOUDURE

Date de l'accident : début de 1936.

Lieu : à l'atelier.

Température : probablement aux environs de 0°.

Acier : Thomas ordinaire (nuance 42-50).

Nature de l'accident : un large plat de 300 × 30 mm, cintré à froid à la machine à rouleaux sous un rayon de 1^m50, s'est fissuré lors de sa mise en œuvre, avant qu'on ait commencé à souder.

Facteurs probables : écrouissage et vieillissement. — Température basse au moment de l'écrouissage. — Métal d'une fragilité originelle, due à un état structural défectueux à gros grains, résultant d'un surchauffage lors du laminage.

6. EXÉCUTION AUX BASSES TEMPÉRATURES

Dates des accidents : hiver 1933-1934.

Lieu : à l'atelier.

Température : entre -5° et -10° C.

Acier : Thomas ordinaire (nuance 37-44).

Nature de l'accident : fissuration de l'âme d'une membrure inférieure (suivant c-d) lors de la réfection d'une soudure a-b.

Facteurs probables : température très basse, diminuant la résistance du métal de base aux

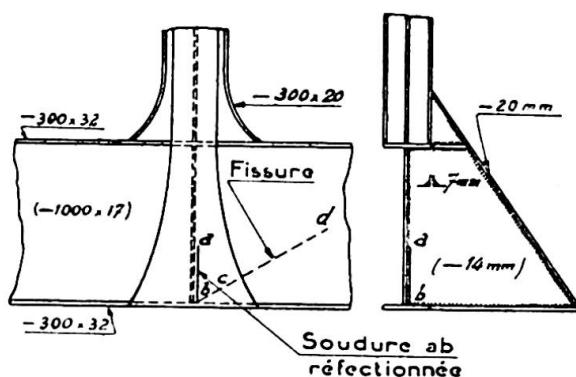


Fig. 4. Fissuration de l'âme d'une membrure inférieure lors de la réfection d'une soudure.

ruptures sans déformation et provoquant une trempe du métal déposé.

— Tensions résiduelles de retrait dans un élément mince, fixé par soudure à des éléments épais et rigides. — Tensions de retrait perturbatrices, introduites par une réfection de la soudure.

7. SOLICITATION SUIVANT L'ÉPAISSEUR

Date de l'accident : juin 1935.

Lieu : au montage sur chantier avant la mise en service.

Température : au-dessus de 10°.

Aciers : a) éléments de montants : Thomas ordinaire (nuances 37-44) ;

b) tôle intercalaire A-A : acier Siemens-Martin (nuance 37-44).

Nature de l'accident : lors de la soudure des cordons d'angle supérieurs, la structure feuilletée de la tôle intercalaire est apparue.

Facteur probable : tensions de retrait disloquant la structure feuilletée de la tôle intercalaire.

8. UTILISATION AUX BASSES TEMPÉRATURES

Pendant l'hiver 1939-1940, par des températures de — 15° à — 20°, des accidents se sont produits dans trois ouvrages en service depuis plusieurs années. Certains éléments contenaient des tensions résiduelles dues, soit à leur fabrication, soit à la soudure, soit à la combinaison des deux facteurs. Il est probable que de petites fissures existaient dans les soudures tant d'atelier que de montage. Outre le vieillissement naturel, la température exceptionnellement basse a agi doublement pour aggraver l'effet de ces défauts. En effet, les contractions thermiques, entravées et inégales, ont majoré les tensions principales et secondaires; ensuite la résistance du métal aux ruptures sans déformation était diminuée.

Echecs dus à des conceptions ou exécutions, augmentant l'importance des tensions résiduelles

1. ÉPAISSEUR

Les tensions résiduelles croissent avec l'épaisseur en raison des dimensions accrues des soudures. Un acier calmé à grains fins, un préchauffage et un recuit de normalisation sont utiles pour diminuer les risques de fissuration.

2. DEGRÉ DE RAIDEUR DES ÉLÉMENTS DE LA CONSTRUCTION

a) *Considérés isolément :*

Date de l'accident : fin décembre 1935.

Lieu : au montage.

Température : aux environs de 0°.

Acier : Thomas ordinaire (nuance 42-50).

Nature de l'accident : fissuration d'un large plat, qui s'est produite après l'exécution complète de la soudure bout-à-bout.

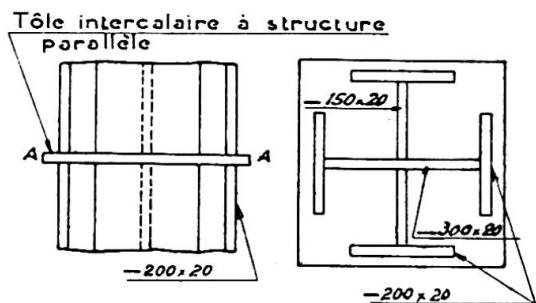


Fig. 5. Apparition de la structure feuilletée de la tôle intercalaire lors de la soudure des cordons d'angle supérieurs.

Facteurs probables : tensions résiduelles importantes, dues à l'importance de la soudure et du bridage — Acier à gros grain de surchauffe d'une fragilité exceptionnelle. — Feuilletage avec fissures microscopiques, non constaté lors de l'usinage.

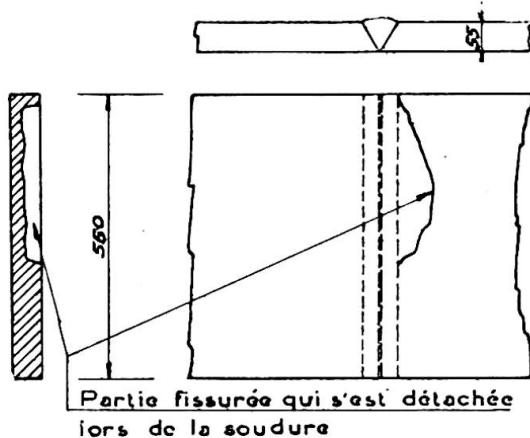


Fig. 6. Fissuration d'un large plat à la suite de l'exécution d'une soudure bout-à-bout.

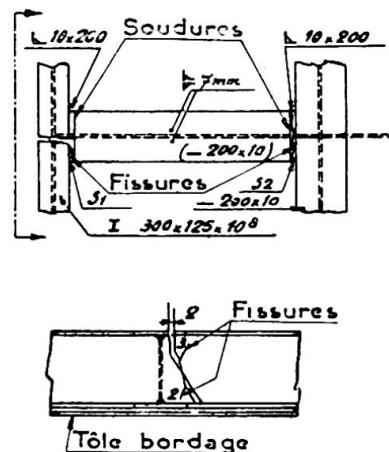


Fig. 7. Propagation d'une fissure, à partir d'une soudure latérale, dans une vanne levante d'écluse.

b) Considérés dans leurs réactions mutuelles :

Date de la constatation de l'accident : décembre 1941.

Lieu : sur un ouvrage en service depuis plus de deux ans.

Température lors de l'exécution : probablement normale.

Acier : Thomas ordinaire (nuance 37-44).

Nature de l'accident : il s'agit d'une vanne levante d'écluse; la fissure, partant d'une soudure latérale, s'est propagée dans la semelle et l'âme d'une poutrelle normale P N 30.

Facteurs probables : la liaison rigide d'éléments de dimensions moyennes a conduit à une construction de grande raideur, du fait que les retraits des soudures étaient entravés. — Soudures présentant plusieurs défauts.

3. BRIDAGES

Date de l'accident : janvier 1940.

Lieu : sur un ouvrage en service depuis plus de deux ans.

Température lors de l'accident : de -15° à -20° .

Acier : Thomas ordinaire (nuance 42-50).

Nature de l'accident : rupture d'un joint de montage d'une membrure inférieure.

Facteurs probables : Le couvre-joint inférieur avait été soudé en premier lieu, d'où tensions résiduelles dans la soudure de la semelle inférieure. — Celle-ci présentait des défauts suivant l'épaisseur. — Température très basse, diminuant la résistance du métal de base aux ruptures sans déformation.

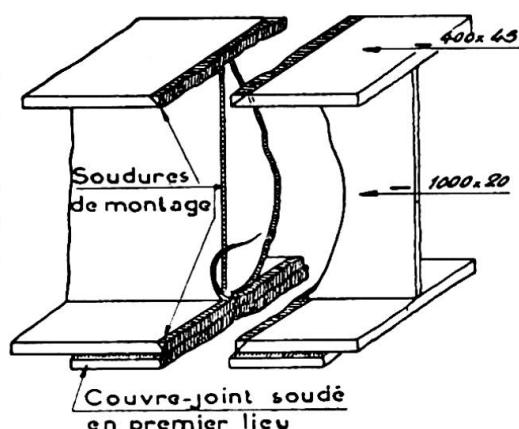


Fig. 8. Rupture d'un joint de montage d'une membrure inférieure.

4. EXÉCUTION DE SOUDURES SOUS CONTRAINTE

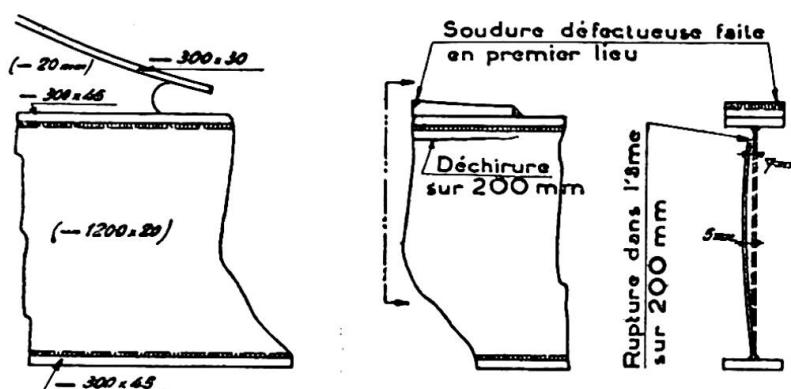


Fig. 9. Rupture d'une membrure inférieure de pont.

Date de l'accident : mars 1938.

Lieu : sur un ouvrage en service depuis plus d'un an.

Température lors de l'accident : normale.

Acier : Thomas ordinaire (nuance 42-50).

Nature de l'accident : rupture d'une membrure inférieure de pont.

Processus probable de la rupture : la soudure, reliant la patte d'attache à la semelle courbe avait été faite en dernier lieu. Elle transformait la base du montant en un véritable tendeur. Cette soudure présentait des défauts, notamment à la racine, parce qu'elle n'avait pas été reprise au dos. La rupture de ce tendeur a provoqué une sollicitation brusque de la membrure sous-jacente.

Facteurs probables : tensions résiduelles importantes dans la soudure de la patte d'attache. — Défauts d'entaille, fissures dans cette soudure. — Métal peu apte par sa nature et ses dimensions à résister aux ruptures sans déformation et aux défauts d'entaille. — Défauts, fissures et sollicitation polyaxée des soudures au collet de la membrure inférieure.

5. EXÉCUTION DE SOUDURES SANS PROGRAMME OU DANS UN ORDRE NON ADÉQUAT

Date de l'accident : mai 1936.

Lieu : au montage, avant la mise en service du pont.

Température lors de l'accident : normale.

Acier : Thomas ordinaire (nuance 42-50).

Nature de l'accident : fissure dans une soudure en X de l'âme d'une membrure inférieure de pont.

Facteurs probables : la soudure des semelles rigides de forte épaisseur ayant été faite en premier lieu, il en est résulté des tensions résiduelles importantes lors de la soudure en X de l'âme. — La soudure de l'âme, faite en montant, présentait des défauts à l'enracinement.

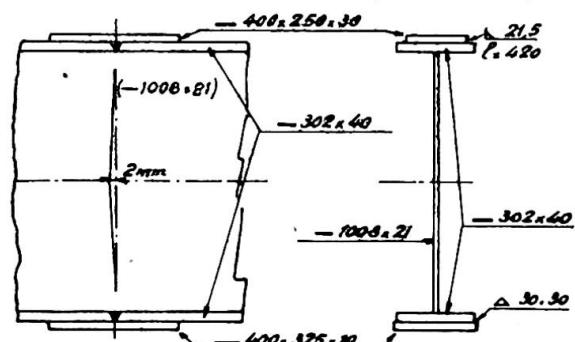


Fig. 10. Fissure dans une soudure en X de l'âme d'une membrure inférieure de pont.

Echecs dus à des conceptions ou exécutions, entraînant des états doubles ou triples de tension

1. ÉPAISSEUR

Les soudures d'éléments de forte épaisseur ont donné lieu à des échecs du fait qu'elles étaient le siège de tensions doubles ou triples. Cet état de

tension favorise la rupture par décohésion prématuée. Pour l'éviter, il faut des aciers calmés, à grains fins, plus résistants à la décohésion et en même temps un préchauffage et un recuit des soudures.

2. INTERSECTION D'ÉLÉMENTS SOUS TENSION ET RÉGIONS DE FAIBLE VOLUME À SOLLICITATION MULTIPLE

Date de l'accident : janvier 1940.

Lieu de l'accident : sur le pont en service depuis plus de deux ans.

Température lors de l'accident : entre -15° et -20° .

Métal employé : acier Thomas (nuance 42-50).

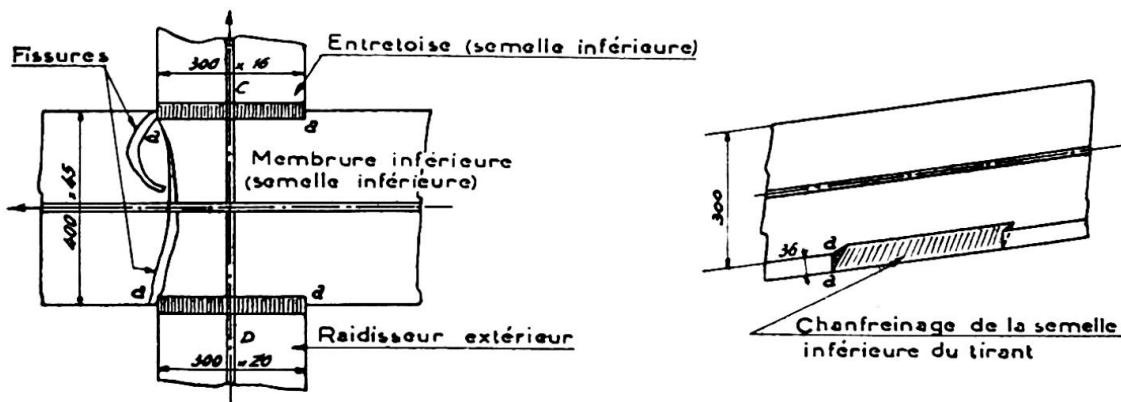


Fig. 11. Rupture de la semelle inférieure de la membrure inférieure du pont.

Nature de l'accident : fissure issue de la soudure raccordant la semelle inférieure de l'entretoise à la semelle inférieure de la membrure formant tirant.

Facteurs probables : soudure à faible volume, à l'intersection à angle vif de deux éléments tendus et soumise à un état de tension double. — Le chanfrein en V, terminé par deux faces verticales à angle vif, constituait une entaille donnant lieu à des pointes de tension et à des amorces de rupture. — Soudures défectueuses, principalement à leurs extrémités. — Température exceptionnellement basse, diminuant la résistance du métal aux ruptures sans déformation.

3. ENTAILLES, DÉFAUTS SUPERFICIELS OU INTERNES ET EN PARTICULIER TOUS LES DÉFAUTS CLASSIQUES DES SOUDURES, SURTOUT À LEURS EXTRÉMITÉS

Dans plusieurs échecs, décrits ci-dessus, il a été signalé que les entailles et les défauts en général créaient des pointes de tension. Comme c'est l'examen radiographique qui a permis de déceler les défauts systématiques des soudures, cette question relève plutôt du chapitre réservé à l'exécution des soudures.

4. CHANGEMENT BRUSQUE DE SECTION

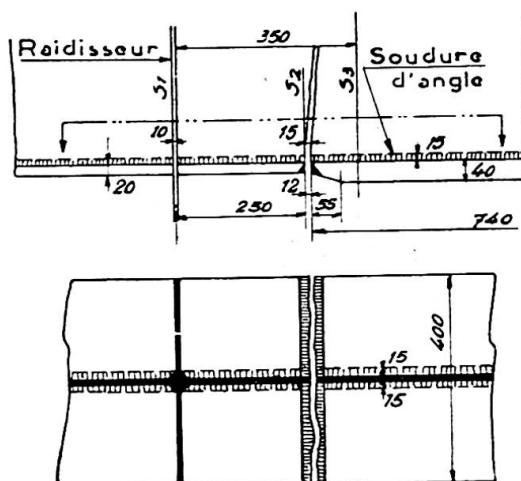
Date de l'accident : juin-juillet 1939.

Lieu de l'accident : sur le pont en service.

Température lors de l'accident : probablement normale.

Métal employé : acier Siemens-Martin (nuance 52-60).

Nature de l'accident : fissure dans la semelle inférieure tendue d'une poutre à âme pleine. Rupture sans déformation. La soudure de la semelle avait été faite avant la soudure d'angle reliant l'âme à la semelle.



Facteurs probables : 1. passage trop brutal d'une épaisseur à l'autre, d'où concentration locale des tensions; 2. fixation des raidisseurs à l'âme et aux semelles ayant provoqué des tensions résiduelles; 3. défaut probable dans les soudures d'angle, soumises à des tensions polyaxées.

Fig. 12. Fissure d'une semelle inférieure tendue d'une poutre à âme pleine.

5. ACCUMULATIONS, INTERSECTIONS ET SURÉPAISSEURS DES SOUDURES

Les accumulations, intersections et surépaisseurs donnent lieu à des tensions résiduelles polyaxées.

L'examen de ce cas fait l'objet du chapitre réservé à *l'exécution des soudures*.

Résumé

Les applications de la soudure ont conduit, en Belgique, à certains échecs, qui se sont révélés dès que les constructions sont devenues plus importantes, nécessitant des épaisseurs plus grandes pour les profils laminés et tôles mis en œuvre. Ces échecs ont donné lieu à des recherches et à des essais, qui ont fait apparaître des particularités erronées dans la conception et l'exécution. Ces recherches ont permis de fixer approximativement les limites d'utilisation des dimensions et des nuances d'acier, en fonction des difficultés constructives propres à chaque construction. La description d'une série d'accidents a pour but de justifier quelques critères constructifs préconisés actuellement en Belgique.

Zusammenfassung

Die Anwendung der Schweißung hat in Belgien zu einigen Rückschlägen geführt, die sich zeigten, als die Tragwerke und damit die Profil- und Blechstärken grösser wurden. Diese Rückschläge veranlassten Untersuchungen und Versuche, die ihrerseits gewisse Fehler in Entwurf und Ausführung aufzuzeigen und eine angenäherte Festlegung der zulässigen Profilstärken und der Materialeigenschaften im Zusammenhang mit den konstruktiven Schwierigkeiten jedes Bauwerkes festzulegen gestatteten. Die Beschreibung einer Reihe von Schadenfällen soll einige heute in Belgien als massgebend angesehene konstruktive Gesichtspunkte begründen.

Summary

The use of welding in Belgium has led to some set-backs, which became apparent as soon as the structures, and consequently the thickness of their sections and plates, became greater. These set-backs caused exami-

nations and tests to be made, which in turn revealed certain mistakes in design and execution and an approximate standard for the permissible dimensions of sections and particularities of materials to be used, in conjunction with the constructive difficulties of each structure. The description of a series of accidents has as its aim the laying down of a number of constructive standards recommended at present in Belgium.

Leere Seite
Blank page
Page vide

Ia2

Les aciers pour constructions soudées

Materialtechnische Grundlagen der Schweißtechnik

Characteristics of materials for welded structures

R. A. NIHOUL

Ingénieur, Directeur du Centre Belgo-Luxembourgeois d'Information de l'Acier, Bruxelles

Notion de soudabilité

On peut s'étonner aujourd'hui, que le développement prodigieux de la soudure depuis quelque trente ans se soit fait sans que le problème de la matière de base n'ait été pratiquement posé pendant de longues années. On s'est contenté pendant longtemps de dire que l'acier devait être soudable et cette affirmation de principe était, pour beaucoup, résolue d'office. Rappelons qu'à notre connaissance aucun règlement ne comportait de prescriptions particulières pour la matière il y a une dizaine d'années, et que très peu en imposent aujourd'hui encore.

Cependant, dès cette époque, des spécialistes s'intéressaient à la notion de soudabilité et le professeur Portevin de Paris en donnait une définition que nous nous plaisons à rappeler, car, dans son aspect sans doute théorique et complexe, elle posait bien le problème et soulignait l'interférence des problèmes constructifs et des problèmes métallurgiques. La soudabilité, disait le professeur Portevin, est l'aptitude des métaux à fournir, en opérant d'après les règles établies de la soudure, un ensemble compact et continu, exempt de défauts physiques et aussi homogène que possible, c'est-à-dire réalisant au mieux l'uniformité des propriétés demandées, pour l'usage auquel est destinée la pièce soudée.

Retenons cependant plutôt dans la présente note, la définition établie tout récemment par le professeur Campus de Liège :

La soudabilité des aciers de construction est l'aptitude à subir sans insécurité les effets du retrait dans les conditions de l'application.

Jusqu'en 1936, les constructeurs ont considéré que les aciers ordinaires de construction répondaient à une telle condition; le problème de la soudabilité était pratiquement ignoré. La soudure se développait avec succès

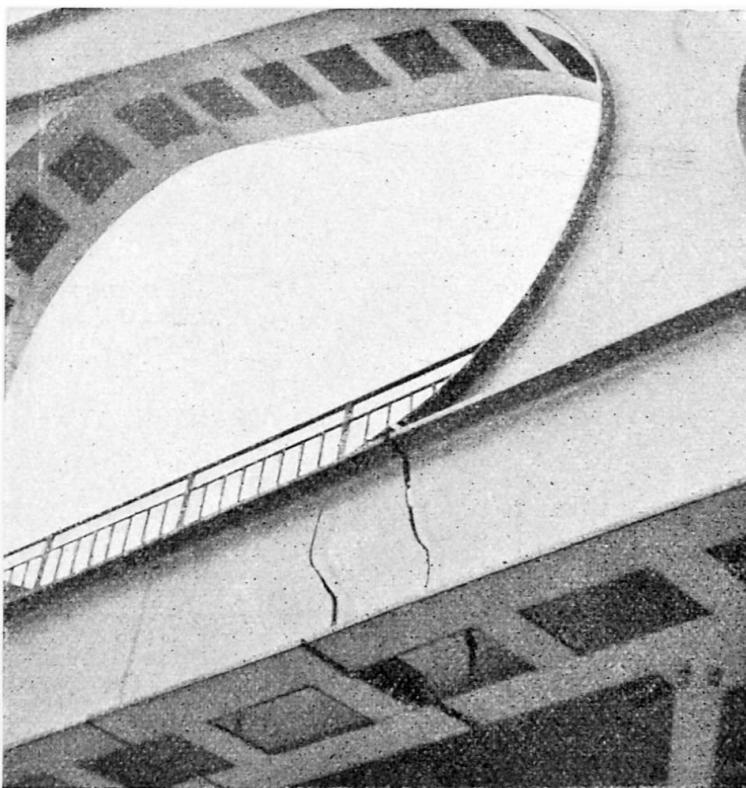


Fig. 1. Fissures produites dans la maîtresse-poutre, du type Vierendeel, du pont de Hermalle au-dessus du canal Albert.

et c'est sans doute en Belgique et en Allemagne que ce développement était le plus important.

Ce n'est pas une coïncidence que de constater, que c'est en Allemagne d'abord, en Belgique ensuite, que de graves accidents mettent un frein à l'enthousiasme des soudeurs. Les premiers accidents se produisent en Alle-



Fig. 2. Fissure dans la tôle de pont d'un cargo américain entièrement soudé du type « Liberty ship ». La rupture sans déformation apparente est à noter.

magne en 1936; en 1938 survient en Belgique le spectaculaire accident du pont de Hasselt et en 1940, d'autres accidents moins graves affectent huit ponts sur les quelque 60 grands ponts soudés. Enfin, à partir de 1942, les constructeurs des Etats-Unis rencontrent des difficultés semblables, en construction navale cette fois; si seulement huit navires sont perdus par rupture totale, plusieurs centaines de Liberty ships, principalement parmi les premiers réalisés, doivent faire l'objet de réparations importantes.

De tous ces accidents on peut faire aujourd'hui une synthèse, car ils présentent tous des caractéristiques communes (fig. 1, 2, 3) et qui, pour un constructeur métallique, sont nouvelles. Les pièces rompues ne sont ni fléchies, ni pliées, ni tordues, ni déformées; les sections de rupture sont brutales, sans traces d'arrachement, sans allongement ni strictions apparentes. Le métal soudé, et souvent le métal de base, loin des soudures, semble avoir perdu toute ductilité.

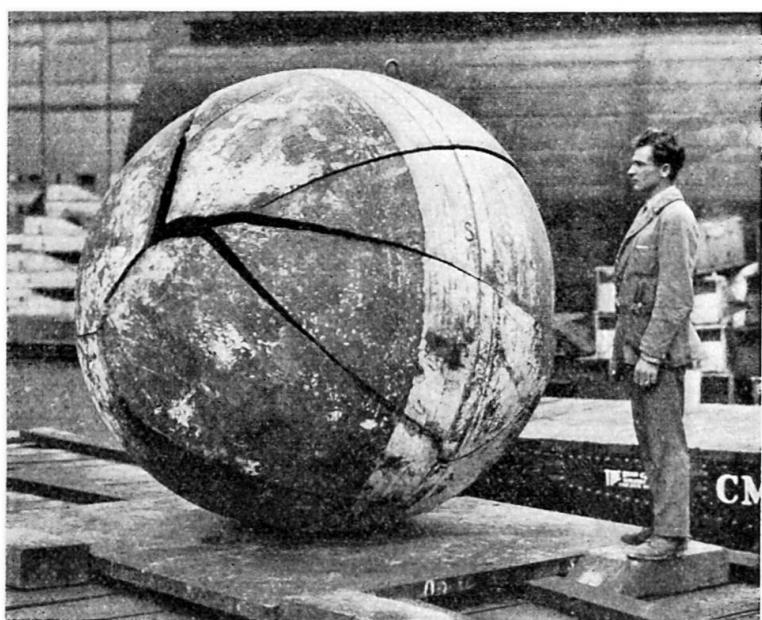


Fig. 3. Eclatement d'une sphère par pression hydraulique, cet essai réalisé à la Smith Corporation (U. S. A.) montre un cas de rupture sans déformation apparente.

Sollicitation des aciers

Il a fallu, à la suite de ces accidents, examiner le problème de résistance des matériaux qui se posait; il a fallu pour cela se demander si l'on ne se trouvait pas en présence de conditions de travail absolument différentes de celles connues jusqu'à ce jour. Il était facile d'incriminer la conception même des assemblages soudés; il était également facile d'incriminer le mode d'exécution, les défauts de montage, une main-d'œuvre insuffisante, mais les praticiens ne pouvaient s'empêcher devant la transformation radicale des conditions de réaction du métal, de trouver ces explications insuffisantes.

Habitués à considérer la construction métallique comme l'un des modes de bâtir le plus sûr, et surtout comme système constructif garanti contre les erreurs normales par cette faculté prodigieuse du métal de s'adapter à la sollicitation grâce au palier de plasticité, les praticiens étaient donc inquiets et avaient l'impression que l'intervention systématique de la soudure dans les ouvrages d'art les mettait en présence d'un système constructif entièrement nouveau.

A ce point de vue, une expérience réalisée aux Etats-Unis par la firme A. O. Smith de Milwaukee est significative et donne une clef du pro-

blème; une sphère de 2 mètres de diamètre, constituée par 2 calottes soudées avec soin, ayant subi, après soudure, des traitements thermiques convenables a été soumise à pression interne jusqu'à rupture (fig. 3). Les ruptures sont sèches comme celles de la fonte. Elles se sont produites en pleine tôle et se sont prolongées à travers toute la sphère, sans déformation apparente : un métal soumis à des efforts triaxés (et encore, dans le cas actuel, l'une des trois tensions est nettement plus petite que les deux autres) se rompt sans déformation apparente. Ce phénomène était connu sans doute, puisque dès le début de ce siècle, sauf erreur, des expérimentateurs allemands le mirent en évidence en soumettant à traction lente des éprouvettes entaillées, mais il n'avait pas retenu l'attention des ingénieurs. C'est là qu'est l'un des nœuds du problème.

Essayons de mettre de l'ordre dans les facteurs intervenant dans une construction soudée. Considérons comme données du problème, le fait que l'acier répond aux exigences normales d'une construction rivée; qu'il présente aux essais habituels la ductilité, l'allongement et la striction convenables. Considérons également, comme données du problème, le fait que les électrodes, avant ou après soudure répondent également aux exigences en la matière. Considérons enfin comme données du problème le fait que les soudeurs mis en présence d'une soudure sur éprouvette libre réalisent un joint ayant au moins la résistance du métal de base. Ce faisant, nous éliminerons évidemment de notre raisonnement les malfaçons éventuelles dans le choix des aciers, les malfaçons éventuelles dans la fourniture des électrodes et les malfaçons dans l'exécution des soudures. Cette élimination est justifiée, car si certains incidents doivent avoir, comme l'une de leurs causes, des faiblesses sur les trois points que nous venons d'évoquer, ceci ne constitue certainement pas une règle; d'autre part, à la lueur de nos connaissances habituelles, aucune de ces faiblesses n'aurait pu justifier les catastrophes et surtout la nature des fissures qui se sont produites.

On en arrive donc à rechercher ailleurs les raisons qui ont entraîné la décohésion du métal. Est-il nécessaire, aujourd'hui, de définir ce qu'on entend par décohésion et ce que les Allemands ont appelé *Trennbruch*? Dutilleul a précisé qu'il entendait par là une rupture par séparation intercristalline, par opposition à une rupture avec glissement selon les plans. La rupture d'un métal, avec déformation importante, se produit selon un certain nombre de plans et dans certaines zones, jusqu'à épuisement de toutes possibilités de déformation, c'est-à-dire de glissement relatif. Une telle rupture provoque une importante déformation permanente, avant que le métal ne cède. Elle provoque également une grande striction. Elle conduit à une cassure non cristalline, telle que nous les connaissons habituellement. Au contraire, les ruptures rencontrées dans les constructions soudées sont des ruptures sans déformation ou pratiquement sans déformation, sans glissements. La cassure présente des facettes planes de décollement correspondant à des ruptures intragranulaires d'aspect cristallin.

Si l'on étudie la structure cristalline de l'acier, on constate que l'existence d'une tension de traction provoque, dans chacun des cristaux une composante normale et une composante tangentielle. Si la composante tangentielle dépasse la résistance spécifique au glissement, ce qui est le cas le plus courant, il y a rupture après grande déformation. Si, au contraire, la composante normale dépasse en premier lieu la résistance spécifique intercristalline il y a rupture sans déformation et dans ce cas, rupture par décohésion.

Pour se trouver dans la première de ces hypothèses, on a le choix entre deux solutions : 1° faire varier le rapport entre les deux tensions et, par conséquent, *rechercher les facteurs d'ordre constructif*, propres à orienter favorablement la sollicitation du métal; 2° faire varier la résistance intercristalline du métal, soit au glissement, soit à la décohésion et, par conséquent, faire varier les *facteurs d'ordre métallurgique*.

Le facteur constructif a été examiné en tout premier lieu. Or, on constate aisément que, lorsqu'une pièce est soumise à deux tensions perpendiculaires, les composantes normales s'additionnent, tandis que les composantes tangentielles se soustraient, et par conséquent, le rapport entre la tension normale et la tension tangentielle augmente; dans les cas limites même, la composante tangentielle sera nulle. *Lorsqu'on se trouve en présence d'un état de tension biaisé ou triaxé, le métal est sollicité d'une façon telle, que la décohésion est facilitée.* Or, pratiquement, en construction rivée, les pièces sont généralement sollicitées d'une façon simple. Il en est tout autrement dans une construction soudée et ce, pour différentes raisons, toutes très distinctes, mais qui conduisent à solliciter la matière de la même façon. En premier lieu, il est difficile d'envisager un assemblage soudé d'une pièce de quelque importance, sans créer organiquement des tensions transversales importantes. Il y a là un défaut, ou, plus exactement, un fait élémentaire de la construction soudée.

Le traitement métallurgique inhérent à la soudure, provoque d'autre part, l'existence de tensions de retrait souvent voisines de la limite élastique du métal, et dont la direction est souvent perpendiculaire aux sollicitations principales.

En outre, la construction soudée se prête à des variations de dimensions brusques. Elle se prête à l'emploi de sections massives dont la flexion provoque des tensions transversales, qu'on ne rencontre pas dans la construction rivée. La construction soudée se prête à des concentrations d'efforts importants dus à des assemblages ou à des nœuds vitaux. Les effets d'entaille ont de leur côté un rôle décisif; une entaille entraîne une distribution locale non uniforme de tensions et une sollicitation localisée, triaxée. La prédisposition de la construction soudée à l'existence d'entailles de faibles dimensions est évidente.

Ajoutons-y le risque de créer des points faibles par traitements métallurgiques inadéquats du métal, le vieillissement de certaines parties du métal par suite du traitement thermique sous tension.

Les charpentes complexes soudées constituent en conséquence un ensemble constructif entraînant dans le métal une sollicitation plus favorable aux ruptures par décohésion que par déformation plastique.

Conditions métallurgiques de soudabilité

Sachant que telle sera la sollicitation du métal, nous sommes amenés à rechercher les conditions métallurgiques pour y faire face. En cherchant les facteurs métallurgiques influençant la décohésion, on peut regrouper certaines constatations connues.

En fonction de la nature du métal, la mise en parallèle des résultats d'essais de traction statique et des essais de résilience, ou des essais de fatigue, montre des divergences notoires. On peut en déduire, par analogie,

certains facteurs de nature à favoriser la résistance à la décohésion du métal. C'est ainsi qu'on est frappé de constater la bonne résistance aux chocs ou à la fatigue des aciers calmés, à grains fins, par opposition aux aciers effervescents à gros grain. D'autre part, les aciers ayant pris la trempe, ayant donc une structure principalement martensitique à gros grain, sont très sensibles à la décohésion. Il en est également ainsi des aciers dont la trempe a conduit à une structure mixte, phénomène qui ne doit pas être exclu en soudure.

On constate également que les aciers vieillis artificiellement notamment par un traitement à 200° par exemple, et ceci à la suite d'un écrouissage à froid, sont propres à avoir des ruptures par décohésion. Tous les ateliers de construction, enfin, ont constaté que des aciers traités d'une façon brutale ou à basse température donnent des ruptures dites de décohésion.

Ces constatations générales permettent de tracer le schéma des facteurs métallurgiques, qui, en provoquant des conditions considérées, peut-être arbitrairement, comme analogues aux conditions thermiques et mécaniques résultant de l'emploi de la soudure, favorisent la rupture par décohésion. Les nuances d'acier correspondantes, sont susceptibles de ne pas donner de bons résultats en construction soudée fortement sollicitée.

Une Commission Technique de spécialistes des Aciers pour constructions soudées créée en Belgique a recherché quelles étaient les conditions de réception qui permettraient de fournir un métal ayant une résistance à la décohésion plus ou moins élevée. Par analogie, on a recherché des métaux n'ayant qu'une faible aptitude à la trempe, une résistance aux effets d'entaille, une résistance aux sollicitations triaxées, une résistance au vieillissement. Tous les essais susceptibles de donner des indications sur ces caractéristiques, ont été systématiquement étudiés et notamment les essais suivants :

Analyse chimique (teneur en soufre, en phosphore, en carbone, en silicium, en gaz);

Essai de résilience (résilience à l'état naturel, résilience après vieillissement, résilience à basse température);

Essai de vieillissement;

Essai de pliage au naturel;

Essai de trempe;

Essai de traction;

Essai de macrographie;

Essai de texture;

Contrôle de la grosseur du grain;

Essais spéciaux Schnadt de résilience sur éprouvette avec noyau;

Micro-essai avec éprouvette Chevenard.

Enfin, une série d'essais dits « essais globaux » parce qu'ils groupent une série de phénomènes, et qu'ils donnent une indication dont le caractère subjectif est discutable, mais dont les analogies avec les sollicitations de la construction soudée sont incontestables, et notamment :

Essai de pliage d'un joint soudé;

Mesure de dureté dans la zone influencée par la soudure;

Essai de pliage avec cordon superficiel (dit essai Kommerell);

Essai de pliage après défoncement et entaille (dit essai Hautmann);

Essai de soudure sous tension (dit essai Swinden & Reeve);

Essai de traction avec cordon superficiel (dit essai Campus);
Essai de traction avec entaille préalable (dit essai Campus).

L'examen méthodique des essais a conduit à en éliminer un nombre important, soit parce que leur valeur sélective n'était pas clairement démontrée, soit parce que leur utilisation, en tant qu'essai de réception de matière, n'était pratiquement pas possible. C'est ainsi, notamment, que quel que soit leur intérêt, la mesure des teneurs en gaz, le contrôle de la grosseur du grain, la macrographie des aciers effervescents n'ont pas paru être des méthodes d'essais à caractère industriel. On a également, renoncé à l'essai de résilience, et à l'essai de résilience sur éprouvette avec noyau, notamment parce que les dispersions étaient élevées, principalement pour les aciers effervescents. Les essais de résilience avec noyau sont, d'autre part, trop récents, pour pouvoir faire l'objet d'une prescription de réception.

La mesure de la trempe, notamment au moyen de l'essai américain Jominy n'a pas été retenue, car il ne semble pas que cet essai présente une efficacité réelle pour les aciers à faible teneur en carbone, comme le sont les aciers de charpente. Les remarquables travaux poursuivis, pendant la guerre, aux Etats-Unis, sur ces essais sont d'ailleurs essentiellement relatifs à des aciers durs ou à des aciers alliés. Il est intéressant de rappeler que l'établissement de courbes Jominy a permis de donner les éléments pratiques des conditions de soudure aux constructeurs mécaniciens, ces éléments ayant comme variables l'intensité du courant électrique à utiliser, le temps et la température de préchauffage, la vitesse de la soudure.

En retenant les autres méthodes d'investigations, la Commission a cherché à définir *les conditions générales de soudabilité métallurgique* limitées au problème de la construction métallique, et aux méthodes de soudure normalement utilisées dans cette industrie, méthodes ne faisant intervenir aucun traitement thermique extérieur préliminaire, simultané ou ultérieur.

Donc, si nous définissons les conditions générales de soudabilité métallurgique, il faut en même temps préciser qu'elles sont valables pour les conditions d'applications que l'on rencontre dans la construction des ponts, des charpentes et chaudironneries plus ou moins complexes. Ce facteur de complexité conduit la Commission à définir la soudabilité pratique, selon différents degrés.

La Commission a estimé, qu'en ce qui concerne *les propriétés chimiques*, la teneur des aciers en certains éléments doit être limitée *du seul point de vue de la soudabilité*. Pour l'ensemble des nuances envisagées, on doit, notamment, considérer les teneurs suivantes comme des plafonds absolus, au-dessus desquels il semble, — dans l'état actuel de nos connaissances, — exister un danger marqué d'effectuer des assemblages par soudure :

Carbone : maximum 0,18 % pour l'acier Thomas.

Carbone : maximum 0,20 % pour l'acier Martin calmé.

Phosphore : maximum 0,08 %.

Soufre : maximum 0,06 %.

Phosphore plus Soufre : 0,13 % maximum.

Silicium : maximum 0,25 %.

Manganèse : maximum 1,50 % pour l'acier Martin.

Manganèse : maximum 1,25 % pour l'acier Thomas.

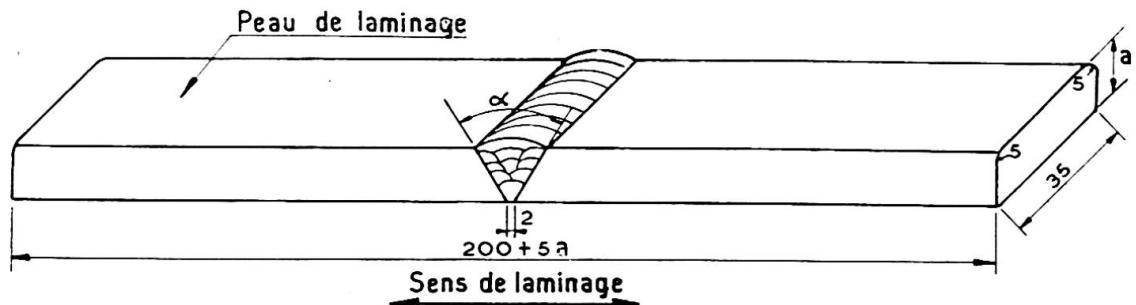


Fig. 4. Forme et dimensions de l'éprouvette de l'essai de pliage d'un joint soudé.

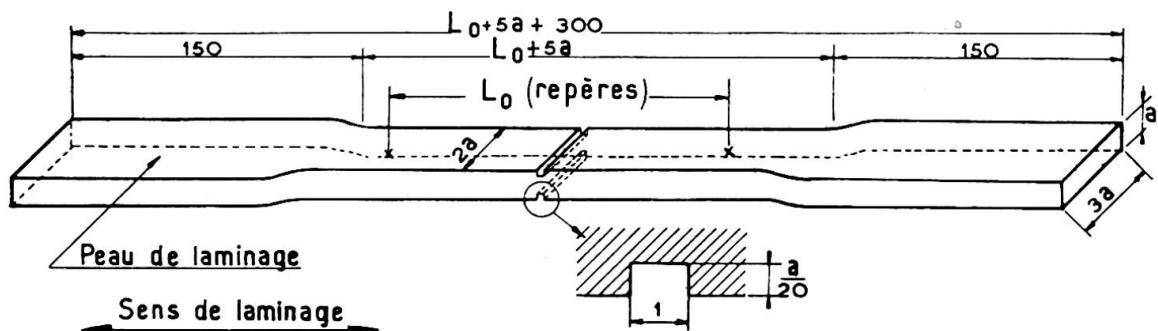


Fig. 5. Forme et dimensions de l'éprouvette de l'essai de traction avec entaille préalable.

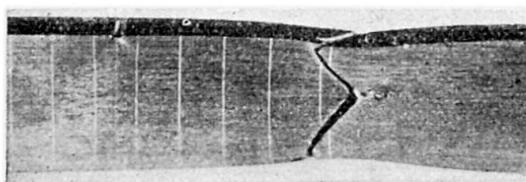


Fig. 6 et 7. Résultats d'essais de traction sur éprouvettes entaillées.

Bon



Ces chiffres s'entendent pour la teneur moyenne relevée sur produits fabriqués.

Du point de vue de la texture, les aciers pour constructions soudées doivent être exempts de défauts macrographiques graves, et notamment de doublures qui sont encore moins admissibles en construction soudée qu'en construction rivée. On cherchera à les déceler par macrographie, découpage au chalumeau ou à la cisaille.

La macrographie sera d'ailleurs exigée pour les tôles et larges plats en acier calmé, à titre de contrôle du calme et de la nature du matériau. De façon à rendre cet essai macrographique objectif, et soumis aussi peu que possible à l'appréciation personnelle du réceptionnaire, un album de macrographies types a été préparé et édité.

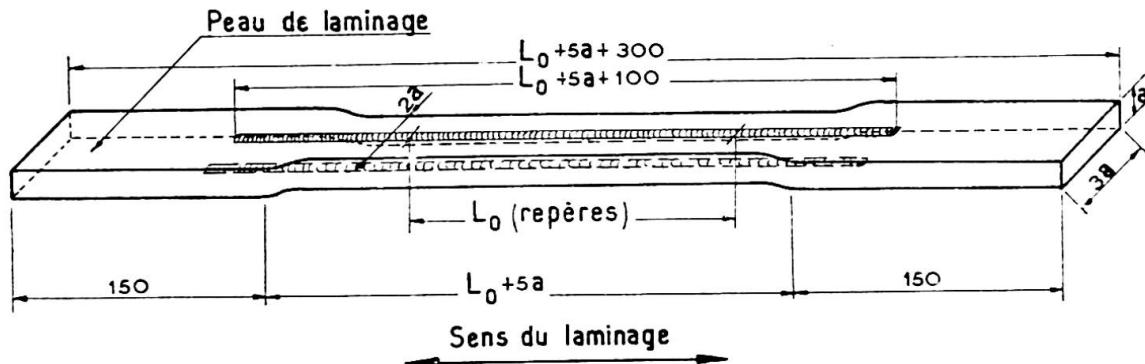


Fig. 8. Forme et dimensions de l'éprouvette de l'essai de traction avec cordons de soudure superficiels longitudinaux.

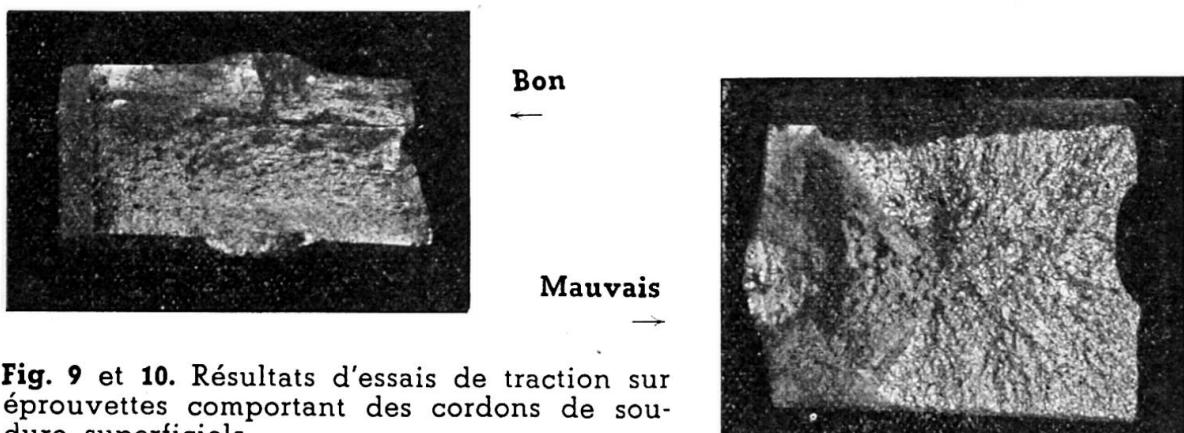


Fig. 9 et 10. Résultats d'essais de traction sur éprouvettes comportant des cordons de soudure superficiels.

En ce qui concerne les essais mécaniques usuels, la Commission insiste pour que ceux-ci aient lieu à une température contrôlée de 15 à 20°. Les spécialistes souhaiteraient d'autre part qu'on puisse imposer des essais en travers pour les produits sidérurgiques autres que les tôles. En l'absence de documentation, ces essais n'ont pas été retenus, mais il a été demandé que des essais systématiques, ayant un caractère indicatif, soient entrepris le plus tôt possible et en premier lieu sur les larges plats.

Outre les essais de pliage habituels, on a retenu le principe d'un essai de pliage après trempe. Ici, aussi, en l'absence de documentation, cet essai n'est pas appliqué à toutes les nuances employées en construction. Son intérêt nous paraît personnellement très discutable car on ne voit pas à quelle préoccupation il peut répondre. Enfin, en ce qui concerne les tensions résiduelles, l'importance que ce facteur présente paraît mériter une étude approfondie dans un proche avenir, en vue d'améliorer les conditions d'exécution des constructions soudées.

Il a été fait alors un choix d'essais spéciaux complémentaires, choix d'autant plus délicat qu'aucun cahier des charges n'a pris position à ce sujet, et que, par conséquent, si dans le domaine scientifique on a proposé et effectué en grande quantité, des essais divers à l'étranger et en Belgique, il était difficile d'affirmer que pour l'un ou l'autre de ces essais, il existait une doctrine d'utilisation basée sur une expérience réelle.

On a retenu les essais suivants qui semblaient le mieux montrer l'aptitude du métal à absorber les fissures éventuelles, à résister à une sollicitation triaxée, enfin, à faire face au vieillissement.

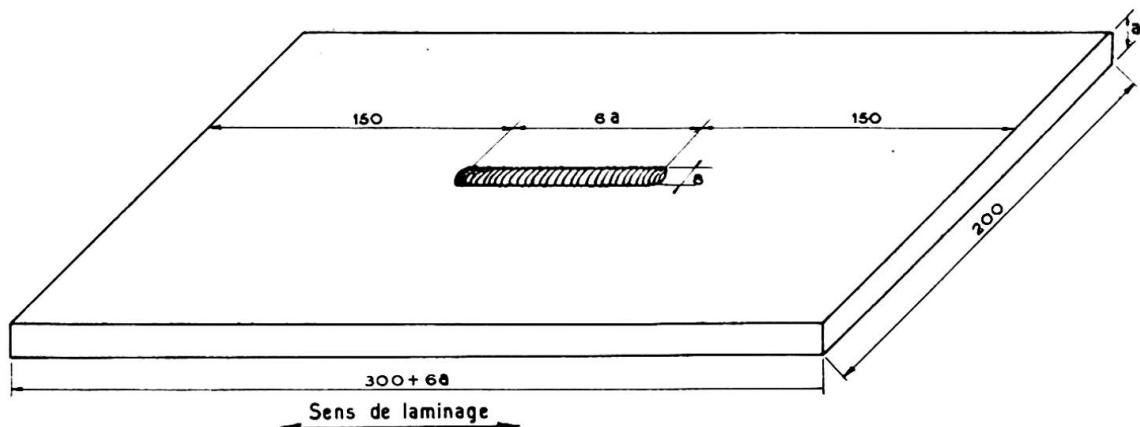
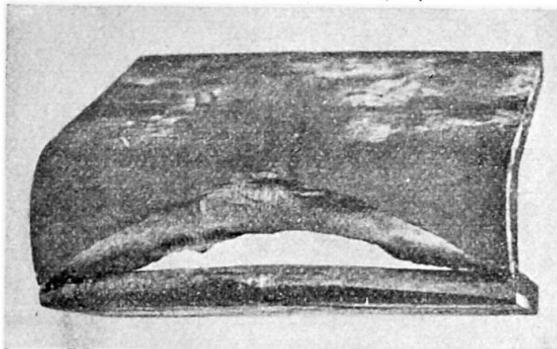


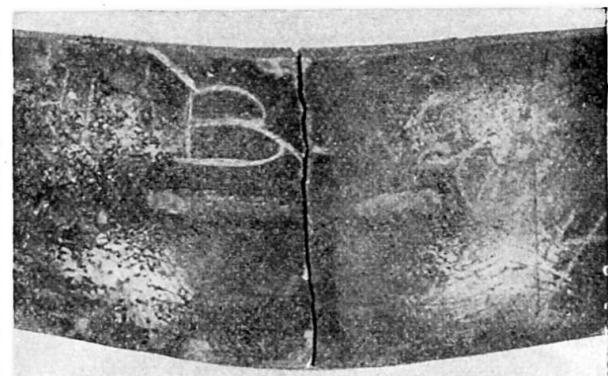
Fig. 11. Forme et dimensions de l'éprouvette de l'essai de pliage avec cordon de soudure déposé dans une rainure longitudinale.

Fig. 12 et 13. Résultats d'essais de pliage d'éprouvettes comportant un cordon de soudure déposé dans une rainure longitudinale.

Bon



Mauvais



1° Essai de pliage d'un joint soudé (fig. 4).

Cet essai classique s'effectue sur l'éprouvette représentée à la figure 4. On peut se demander si cet essai ne présente pas surtout de l'intérêt pour l'agrément des soudeurs et la réception des électrodes.

2° Essai de vieillissement.

Cet essai consiste à comparer les résiliences à l'état de livraison et après vieillissement artificiel, celui-ci étant obtenu par un écrouissage suivi d'un réchauffage.

3° Essai de traction sur éprouvette entaillée ou sur éprouvette comportant des cordons de soudure longitudinaux, préconisé par le professeur Campus (fig. 5 et 8).

L'expérience a montré que l'essai avec entaille, convient aux aciers de nuances douces, tandis que l'essai avec cordons superficiels convient aux aciers de nuances dures.

4° Essai de pliage d'une éprouvette comportant un cordon de soudure déposé dans une rainure longitudinale (essai dit Kommerell, fig. 11) ou essai de pliage d'une éprouvette comportant une rainure et une entaille (essai dit Hautmann, fig. 14).

Ces derniers essais présentent l'inconvénient de ne pas donner des résultats chiffrables, et, par conséquent, de conduire à un jugement sub-

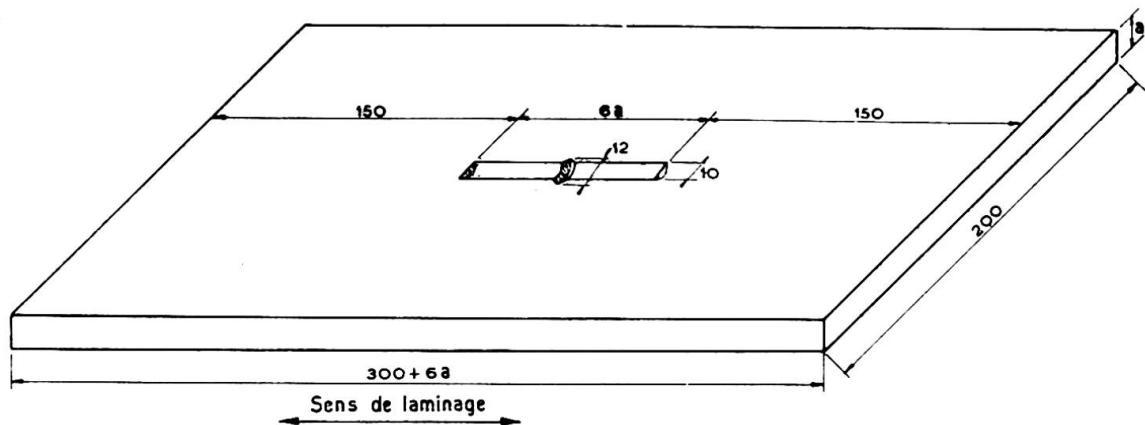
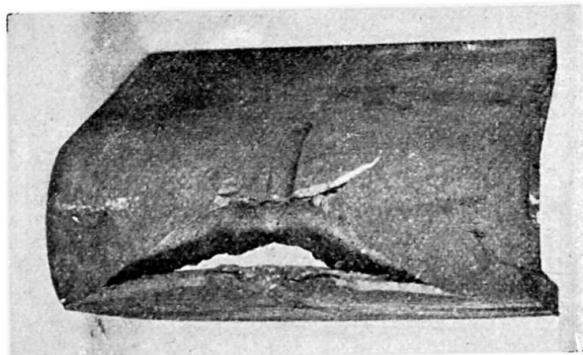
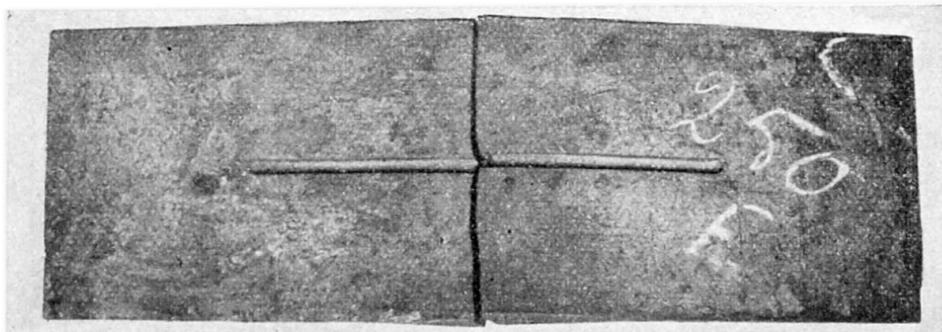


Fig. 14. Forme et dimensions de l'éprouvette de l'essai de pliage avec rainure et entaille.



Bon

Fig. 15 et 16. Résultats d'essais de pliage d'éprouvettes comportant une rainure et une entaille.



Mauvais

jectif de la qualité des aciers. La Commission s'est efforcée de corriger cette situation en joignant à la description des essais, des exemples de bonne et de mauvaise réalisation, mais ainsi que le montrent les diverses figures ci-jointes, la réception reste chose délicate.

Essai de spécification de soudabilité

Tels sont les éléments qui ont servi à la rédaction de conclusions techniques et d'une feuille de qualité des aciers pour construction soudée. Cette feuille de qualité, qui a évidemment un caractère provisoire, conduit à l'utilisation des aciers repris au tableau I qui se rapporte en particulier aux barres laminées et profilées.

Désignation abrégée		A 00	A 37	A 37 SC	A 37 HS	A 42	A 42 SC	A 42 HS	A 45 HS	A 52	A 52 HS
Caractéristiques mécaniques à l'état de livraison, dans le sens du laminage	R (en kg/mm ²)	max 47	37-45	37-45	37-45	42-50	42-50	45-50	45-55	52-62	52-62
	R _e min. (en kg/mm ²) $a \leq 16$ mm	—	24	24	24	26	26	26	30	36	36
	Coefficient de qual. R + 2,5 A	—	100	100	100	100	100	100	102	105	105
	Simple plia- ge à froid	Epaisseur de la cale $a \leq 20$	—	0,5 a	0,5 a	0,5 a	a	a	2 a	2 a	2 a
		α	—	180°	180°	180°	180°	180°	180°	180°	180°
	Pliage après trempe	Tempéra- ture de trempe	—	—	925°	925°	—	—	—	—	—
		Epaisseur de la cale $a \leq 20$	—	—	1,5 a	1,5 a	—	—	—	—	—
		α	—	—	180°	180°	—	—	—	—	—
	Pliage du joint soudé	Epaisseur de la cale	—	—	2 a	2 a	—	2 a	2 a	—	2 a
		α	—	—	180°	180°	—	180°	180°	180°	120°
	Résilience après vieillis.	K _v (kgm/cm ²)	—	—	—	6	—	—	5	4	—
		K _v K _t	—	—	—	0,6	—	—	0,6	0,6	—
Caractéristiques chimiques (maxima)	C %	—	—	0,13	0,15	—	—	0,20	0,18	—	0,20
	P %	—	—	0,08	0,06	—	0,06	0,06	0,06	—	0,05
	S %	—	—	0,06	0,06	—	0,06	0,06	0,06	—	0,05
	P+S %	—	—	0,13	0,11	—	0,11	0,11	0,11	—	0,09
	Si %	—	—	—	0,20	—	0,20	0,20	0,25	—	0,25
	Mn %	—	—	—	—	—	0,70	—	1,20	—	1,50
Autres essais et prescriptions	—	—	—	—	A-C D-E	—	B	B-C D	B-C D	—	B-C D-F

AUTRES ESSAIS ET PRESCRIPTIONS

- A = Pliage en long d'éprouvettes défoncées et entaillées, ou traction en long d'éprouvettes entaillées; prévus seulement lorsque l'épaisseur du produit est égale ou supérieure à 18 mm.
- B = Pliage ou traction en long avec cordon(s) superficiel(s) de soudure; prévus seulement lorsque l'épaisseur du produit est égale ou supérieure à 18 mm.
- C = Macrographie (pour l'appréciation, se rapporter à l'Album de macrographie de la C. M. A., édition 1945).
- D = Normalisation imposée pour les produits d'épaisseur supérieure à 25 mm.
- E = Caractéristiques chimiques complétées par: C + P + S $\leq 0,24\%$.
- F = Caractéristiques chimiques complétées par: Cu : 0,25 % minimum / Cr : 0,10 % environ, éventuellement.

1. L'acier de qualité courante « A 00 » ne peut pas être rouverin. Il doit être ductile à froid, c'est-à-dire que les produits doivent supporter le pliage à 90° sur un mandrin de diamètre égal à quatre fois l'épaisseur. On peut admettre que cet acier présente une limite élastique apparente d'environ 22 kg/mm² pour les épaisseurs inférieures et égales à 16 mm et environ 20 kg/mm² pour les épaisseurs supérieures à 16 mm.

Les barres laminées de diamètre (ou de côté) inférieur à 50 mm et les profilés des programmes normaux de fabrication peuvent être livrés en acier de qualité courante « A 00 ».

2. Sauf spécification spéciale de l'acheteur, le procédé de fabrication est laissé au choix du producteur.

Pour l'acier de qualité courante « A 00 », le procédé de fabrication ne peut jamais être prescrit.

Pour les marques autres que « A 00 », le producteur doit communiquer le procédé de fabrication sur demande de l'acheteur.

Sur demande spéciale de l'acheteur, on peut ajouter 0,25 % min. de Cu aux aciers pour les protéger de la corrosion atmosphérique.

Remarque générale

La garantie de soudabilité peut être exigée suivant les nuances, soit en degré SC (soudabilité courante), soit en degré HS (haute soudabilité).

Les nuances du degré SC ne sont utilisables en construction soudée qu'en deçà d'une certaine limite d'épaisseur et avec toutes les réserves formulées à l'annexe quant à la conception et à l'exécution des ouvrages soudés; cette limite peut atteindre 20 à 25 mm selon les difficultés constructives.

Aciers A 37 et A 42. La soudabilité de ces aciers n'est garantie que lorsqu'ils sont commandés pour répondre en outre aux prescriptions du tableau ci-dessus. Ces aciers sont alors désignés par les appellations A 37 SC ou A 37 HS, A 42 SC ou A 42 HS.

Acier A 45 HS. Cet acier n'est élaboré qu'en nuance HS répondant aux prescriptions du tableau ci-dessus.

Acier A 52. Cet acier n'est pas normalement soudable. Sa haute soudabilité n'est garantie que pour la nuance A 52 HS.

Notations

R : charge spécifique de rupture.

R_e : limite apparente d'élasticité.

a : épaisseur du produit, en mm.

A : allongement % sur éprouvettes $K = \frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 8,16$.

L_0 : longueur initiale entre repères.

S_0 : section initiale de la partie calibrée.

K_r : résilience du métal vieilli.

K_l : résilience du métal à l'état de livraison.

Ce tableau est complété par une annexe donnant quelques règles quant aux conditions d'emploi des aciers d'usage général pour constructions soudées à l'arc électrique. Cette annexe est fondamentale; elle souligne le rôle du constructeur dans la construction soudée; elle fait partie intégrante de la feuille de qualité.

Les facteurs constructifs interviennent directement dans la définition de la soudabilité.

Est considéré comme facteur susceptible de modifier la soudabilité, toute particularité de la conception ou de l'exécution dans la mesure où cette particularité :

1^o Augmente l'importance des tensions résiduelles;

2^o Entraîne un état de tensions se rapprochant de l'état triple isotrope de traction;

3^o Entraîne une diminution de la qualité du métal.

Il est remarquable que dans les trois cas cités, l'épaisseur intervient comme une particularité essentielle. Cela incite, à titre d'approximation et dans un but de simplification, à se servir de l'épaisseur maximum des éléments mis en œuvre pour chiffrer le degré de difficulté constructive. On admet donc, d'une façon approximative, que les aciers de soudabilité courante (acières indexés SC) ne pourront pas être utilisés au delà d'une épaisseur maximum de 20 à 25 mm des éléments assemblés.

Quelques-uns des autres facteurs déterminant la difficulté constructive sont notamment

Pour le cas 1 :

Le degré de raideur des éléments de la construction;

Les intersections des soudures;

L'existence préalable des tensions résiduelles;

L'exécution des soudures sans programme judicieux.

Pour le cas 2 :

L'intersection d'éléments sous tension ou de cordons de soudure;

Les entailles;

Les changements brusques de section.

Pour le cas 3 :

Le cisaillage, le poinçonnage, les cintrages à froid;
 L'utilisation de la construction aux basses températures;
 Les sollicitations par le travers ou suivant l'épaisseur des trempes locales.

Commentaires

L'examen critique de cette spécification conduit à différentes remarques. Du point de vue scientifique, on est frappé de noter combien les constatations et l'interprétation à laquelle elles ont donné lieu en Belgique sont conformes à ce qui a été fait à l'étranger, et, tout spécialement aux Etats-Unis.

Au point de vue pratique, le cahier des charges proposé comporte quelques points faibles, qu'il est essentiel de faire disparaître.

1^o Essais de soudabilité. — Les essais proposés constituent évidemment une solution imparfaite pour la réception des aciers, d'une part parce qu'ils sont coûteux, lents et délicats, d'autre part parce que leur interprétation est toujours fonction de la compétence des agents réceptionnaires.

Pour l'instant, cependant, nous ne connaissons pas de test plus simple; il ne faut pas perdre de vue que l'emploi des essais globaux n'est prévu que pour les aciers de haute soudabilité H. S. dont l'utilisation sera toujours très réduite, et dont l'emploi suppose des précautions importantes.

En tout état de cause, d'ailleurs, on pourrait se demander si cette question ne doit pas faire l'objet d'une nouvelle investigation : nos connaissances en matière d'effets d'entailles notamment, ont rapidement progressé au cours des dernières années, et certains facteurs nouveaux sont intervenus quant au comportement des aciers. Parmi ceux-ci, figure tout spécialement la variation de la résistance aux effets d'entaille des aciers en fonction de la température. Des travaux poursuivis, à l'étranger notamment, montrent que ce facteur pourrait peut-être constituer un test élégant pour déterminer la susceptibilité à la fissuration des aciers utilisés dans nos pays. Des essais seront vraisemblablement entrepris prochainement à ce sujet.

Mais le reproche le plus sérieux qui doit être fait à la spécification proposée, est de *ne pas déterminer nettement et clairement les zones d'application des différents aciers*.

L'originalité du document est d'avoir, pour un type déterminé, par exemple pour l'acier ayant une résistance à la rupture comprise entre 37 et 45 kg/mm², créé *plusieurs nuances à soudabilité*. Ainsi est posé le principe que lorsque ce n'est pas nécessaire, il est inutile d'employer des aciers spécialement élaborés, et par conséquent coûteux. Mais d'autre part, le choix de l'acier ne peut être déterminé a priori, trop de facteurs intervenant pour rendre plus dangereuse la sollicitation d'une construction. Ces facteurs sont, par exemple, la complexité des assemblages, l'importance de la variation des tensions, l'épaisseur des profilés mis en œuvre, les conditions de montage, le matériel dont dispose la firme, l'expérience de ses dessinateurs, de ses chefs d'ateliers, de ses soudeurs. C'est l'ingénieur-constructeur qui doit donc prendre sa responsabilité. Encore faut-il qu'il le fasse à bon escient.

Le grand nombre de constructions soudées réalisées, permet de se baser sur les précédents pour faire un choix judicieux d'un acier présentant la sécurité nécessaire et l'économie souhaitable.

1^o Sans vouloir prendre, dans ce domaine, une position définitive, on constate que l'acier ordinaire, dit A 37 au tableau I, s'adapte aux exigences, même les plus sévères de la construction rivée. Cette affirmation a été rendue encore plus évidente en Belgique, par les études détaillées faites sur les ponts détruits par explosion en 1940 et en 1944. Le même acier A 37 supporte sans difficultés la soudure, lorsque celle-ci a un caractère simple. Nous n'avons pas connaissance d'un seul accident dans la construction du bâtiment, de charpentes industrielles, enfin, de toutes constructions relativement simples et légères en acier A 37.

2^o Pour les constructions où la soudure est employée d'une façon systématique, mais qui ne présentent pas de difficultés constructives exceptionnelles, ni de concentrations de tensions, qui ne mettent pas en œuvre des éléments d'épaisseur tels que les efforts triaxés importants puissent prendre naissance à certains endroits du matériau, l'acier ordinaire, de bonne fabrication convient. Il est utilisé avec succès pour des épaisseurs inférieures à 20, voire même à 25 mm. La nuance de soudabilité courante, dite au tableau I, A 37 SC doit être considérée comme une nuance ordinaire, mais dont la fabrication a été plus étroitement contrôlée que pour les aciers A 37. L'utilisateur a la garantie que la teneur en carbone sera tellement basse que tout danger de trempe est exclu. Enfin, les teneurs en soufre et phosphore, nettement inférieures au plafond de soudabilité fixé, garantissent que la fabrication a été soignée. Il ne nous semble pas qu'il y ait difficulté à utiliser simultanément cet acier A 37 SC et l'acier A 37 HS (haute soudabilité) ce dernier étant limité aux éléments de grande épaisseur (supérieure à 25 mm) fortement sollicités et donnant lieu à d'importantes soudures.

L'emploi de l'acier A 37 SC semble couvrir la très grande majorité des constructions soudées, pour autant que l'étude, l'exécution, le montage et le contrôle de celles-ci soient faits avec soin.

3^o Le problème est cependant différent lorsqu'on se trouve en présence d'une construction soudée importante, telle qu'un grand pont, un ouvrage d'art, ou d'une façon plus générale, de toute construction où il est impossible d'éviter des concentrations d'efforts; où il est nécessaire d'employer régulièrement des éléments d'épaisseur supérieure à 25 mm, où l'on n'a pas l'assurance que des sollicitations triaxées ou des effets d'entailles ne sont pas inhérents à la construction elle-même. Dans ce cas, la tâche de construction doit donc être facilitée par la mise en œuvre d'un acier capable de résister avec certitude aux nouvelles sollicitations qui lui seront imposées. Les aciers calmés, quelle que soit leur méthode d'élaboration, peuvent satisfaire à ces exigences, et l'acier à haute soudabilité dit A 37 HS est un acier de caractéristiques mécaniques ordinaires, mais dont ont été contrôlés le calnage, la susceptibilité au vieillissement, la susceptibilité à l'entaille. Son existence doit permettre d'aborder les problèmes exceptionnels de construction soudée.

Le but de la présente communication est de montrer qu'il est possible, sans rechercher des sécurités exagérées, de mettre à la disposition des constructeurs, des aciers dont la soudabilité est adaptée aux sollicitations des constructions dans lesquelles ils seront mis en œuvre.

Les progrès de la construction soudée, permettent aujourd'hui, de réduire les aléas dus à des facteurs constructifs. Dans la plupart des cas, une bonne technique doit permettre l'emploi d'acières normalement élaborés, mais dans certains cas, le soudeur fera appel à des aciers spécialement élaborés.

Nous souhaitons que la proposition que nous avons commentée, fasse l'objet d'un débat et d'un perfectionnement, lors du Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes de 1948.

Résumé

Examen des ruptures survenues dans les accidents de construction soudée, du point de vue de la matière de base. Discussions sur le comportement de la matière de base et sur l'influence de cette matière dans les accidents.

Etude des facteurs qui interviennent dans la soudabilité des aciers, facteurs constructifs, dus à la construction; facteurs métallurgiques dus à la matière elle-même.

Recherche des méthodes d'essai et de réception, susceptibles de donner des indications sur les facteurs métallurgiques. Comparaison de différents essais préconisés.

Influence des propriétés chimiques au point de vue de la soudabilité. Nature de la texture des matériaux. Valeur des essais mécaniques ordinaires. Zones d'application des essais spéciaux et notamment des essais globaux. Influence du vieillissement sur le métal. Contrôle de la susceptibilité à la fissuration et à la sollicitation triaxée (éprouvettes Campus, Kommerell, Hautmann).

L'étude critique de ces différents points de vue faite par une Commission, groupant des producteurs et des utilisateurs belges, a donné lieu à l'établissement de conclusions relatives aux facteurs métallurgiques influençant la soudure et à l'établissement d'une spécification provisoire sur la soudabilité du métal de base.

La Communication après avoir commenté cette spécification, en souligne les conditions d'application.

Zusammenfassung

Prüfung der Risse beschädigter geschweißter Stahlbauten hinsichtlich des Grundmaterials. Verhalten dieses Grundmaterials und dessen Einfluss auf die Unfälle.

Studium der Faktoren, die die Schweissbarkeit beeinflussen : bau-technische Faktoren (abhängig vom Bau); metallurgische Factoren (abhängig vom Material).

Ermittlung der Versuchs-Methoden und Abnahme-Vorschriften, die Angaben über die metallurgischen Faktoren ermöglichen. Vergleich verschiedener vorgeschlagener Versuche.

Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die Schweissbarkeit. Metallgefüge. Wert der gewöhnlichen mechanische Prüfungen. Grenzen der Anwendung der Spezialprüfungen und insbesondere der « Global »-Versuche. Einfluss des Alterns. Kontrolle der Empfindlichkeit auf Reissen

und auf räumliche Spannungszustände (Campus-, Kommerell- und Hautmann-Proben).

Das kritische Studium dieser verschiedenen Standpunkte durch eine aus belgischen Erzeugern und Verbrauchern zusammengesetzte Kommission führte zu Schlussfolgerungen bezüglich des Einflusses der metallurgischen Faktoren auf das Schweißen und zur Aufstellung einer provisorischen Vorschrift über die Schweißbarkeit des Grundmaterials.

Der Aufsatz kommentiert diese Vorschrift und behandelt besonders ihre Anwendungsbedingungen.

Summary

Fractures due to accidents in welded structures as regards the base metal. Behaviour of the base metal. Influence of this material on welding accidents.

Factors playing a part in the weldability of steel : factors due to the structure; metallurgical factors due to the metal itself.

Research upon testing and reception methods, in view of collecting information on metallurgical factors. Comparison of various proposed tests.

Influence of chemical characteristics on the weldability. Nature of material structure. Value of ordinary mechanical tests. Fields of special tests, especially of « global » tests. Influence of the ageing of the metal. Liability of welding test pieces to cracking and to three axis stresses (Campus, Kommerell and Hautmann test pieces).

The critical study of these points of view by a Committee, composed of Belgian steel manufacturers and users led to conclusions concerning metallurgical factors influencing welding; this Committee set up tentative standards dealing with the weldability of the metal.

This paper comments upon the specification and outlines the conditions for its use.

Ia3

Une réussite dans l'application de la soudure à la construction des grands ouvrages : les ponts de Saint-Cloud et de Neuilly

Eine erfolgreiche Anwendung der Schweißtechnik bei der Errichtung grosser Bauwerke : die Brücken von Saint-Cloud und von Neuilly

The successful use of welding for the construction of large structures : the Saint-Cloud and Neuilly bridges

Service des Ponts et Chaussées du Département de la Seine

L. A. LEVY
Ingénieur en chef
des Ponts et Chaussées
Paris

M. DURAND-DUBIEF
Ingénieur
des Ponts et Chaussées
Paris

G. KIENERT
Ingénieur des Travaux
Publics de l'Etat
Paris

Les ponts de Saint-Cloud et de Neuilly, situés tous deux sur la Seine près de Paris, ont été étudiés et réalisés entre 1937 et 1941 par le Service des Ponts et Chaussées du Département de la Seine pour le compte du Ministère des Travaux Publics du Gouvernement français et du Département de la Seine.

Ces ouvrages comportent d'importantes ossatures en acier à haute résistance entièrement soudé à l'arc électrique, et sont les premières grandes réalisations françaises de ponts métalliques soudés.

Le pont de Saint-Cloud (fig. 1), d'une longueur de 186^m50 et d'une largeur de 30 mètres, comprend sept travées (cinq de 31^m50 de portée et deux de 14^m50) se composant de 13 poutres droites de hauteur constante réunies par des cadres d'entretoisement; ces poutres sont continues sur les 4 premières travées d'une part, et sur les 3 autres d'autre part. L'exécution de la charpente a nécessité la mise en œuvre de 1 700 tonnes d'acier et l'emploi de 1 400 000 électrodes.

Le pont de Neuilly (fig. 3), large de 35 mètres, présente deux arches de 67 mètres et 82 mètres de portée, surbaissées respectivement au dixième et au douzième; chaque arche comprend 12 arcs de section constante avec



Photo H. Baranger.

Fig. 1. Vue générale du pont de Saint-Cloud.

articulation aux naissances, reliés par des butons et supportant le tablier par l'intermédiaire de montants articulés. L'ensemble de la charpente métallique pèse environ 2 200 tonnes; 1 500 000 électrodes ont été employées à son exécution.

La réalisation de ponts de cette importance en acier à haute résistance soudé constitue une entreprise hardie. On s'efforcera, dans la présente communication, de montrer que ces deux ponts ont pu cependant être réalisés en toute sécurité, grâce au soin apporté dans la préparation des projets et aux précautions prises lors de l'exécution. Le lecteur pourra se reporter, pour le détail de la description de ces ouvrages et de leur réalisation, aux monographies publiées par ailleurs.

Le souci dominant a été de tirer parti au maximum des possibilités offertes par la soudure, en choisissant toujours les solutions propres à ce mode d'assemblage. On peut tout d'abord le noter dans la conception des ouvrages.

C'est ainsi que les poutres du pont de Saint-Cloud sont constituées par une âme pleine et des semelles en plats à téton, assemblées par des soudures bout-à-bout du type en X. Ces poutres supportent directement la dalle

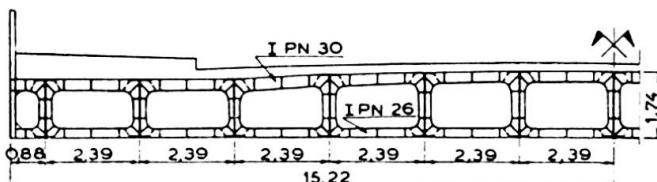


Fig. 2. Demi-coupe en travers du pont de Saint-Cloud, montrant les divers joints d'assemblage, les joints de chantier sont représentés en trait interrompu.

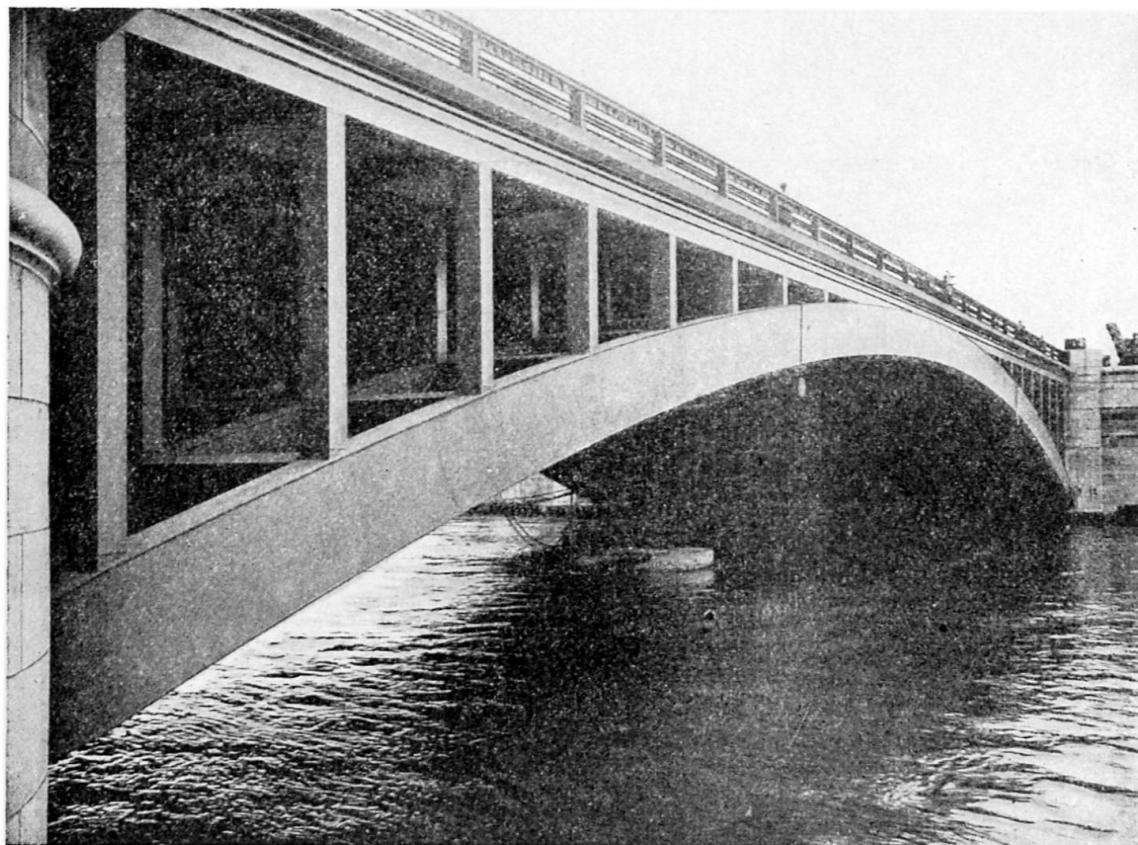
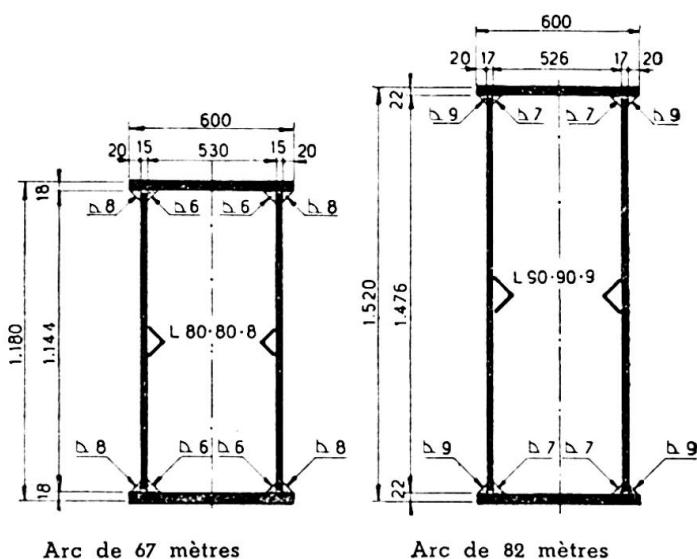


Fig. 3. Vue de l'arche de 82 mètres du pont de Neuilly.

en béton armé de la chaussée et leur hauteur varie d'une poutre à l'autre pour épouser le profil en travers de celle-ci. L'entretoisement est réalisé par des cadres en poutres-échelles de même hauteur que les poutres et dont les membrures inférieures et supérieures sont formées par des poutrelles normales fixées par des soudures bout-à-bout (fig. 2).

Les arcs du pont de Neuilly présentent une section en caisson rectangulaire dont les deux âmes et les deux semelles sont constituées par des tôles et larges plats assemblés par des cordons de soudure d'angle continus (fig. 3). Les butons reliant les arcs entre eux et les montants verticaux articulés sont du même type et n'offrent aucune saillie sur leur surface extérieure, les assemblages étant réalisés par des soudures en chanfrein. Quant au tablier, il est formé par un simple quadrillage d'entretoises et de longerons en poutrelles P N 36.



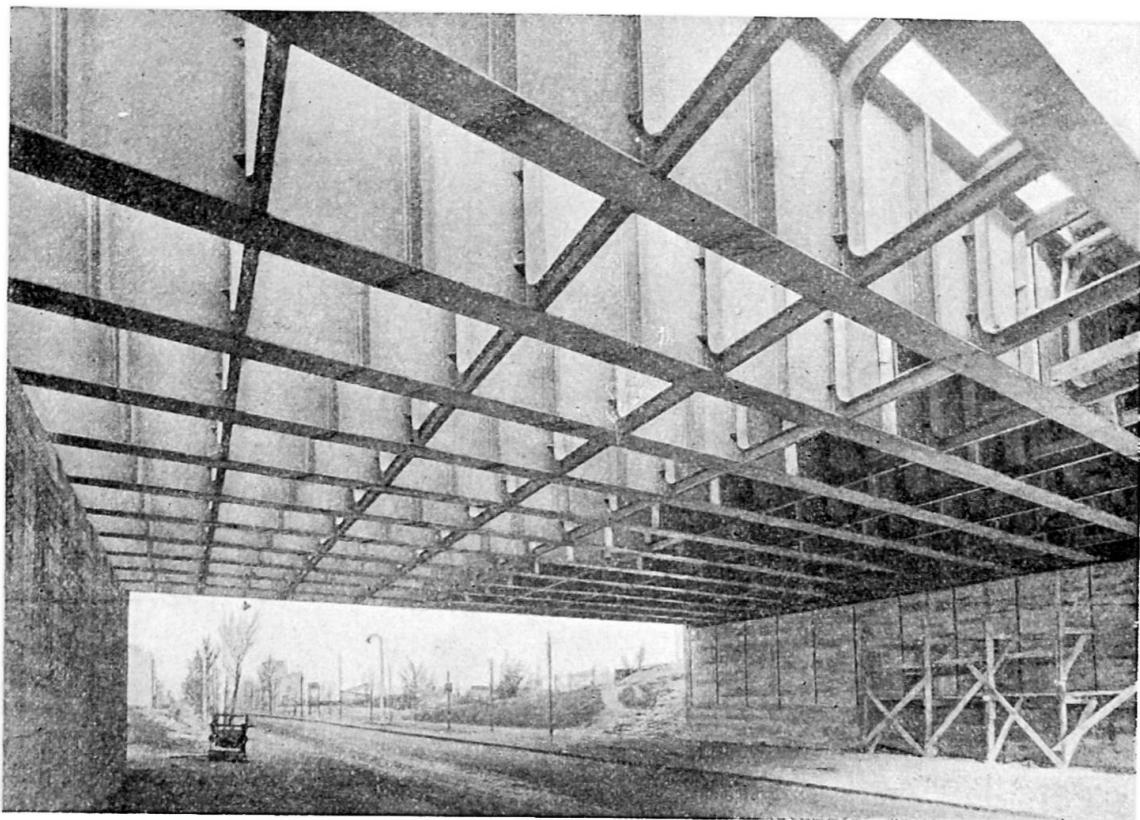


Fig. 5. Pont de la déviation autour de Saint-Denis.

On est donc arrivé à simplifier à l'extrême les éléments constitutifs de la charpente et leurs assemblages mutuels. Il a ainsi été possible d'éviter les accumulations locales de soudures et de réaliser des cordons où l'épanouissement des contraintes provoquées par les opérations de soudage pouvait se faire librement; ceci est de nature à écarter toute crainte d'une rupture inopinée. En outre, on a obtenu pour les ouvrages une grande simplicité de lignes et de formes, d'une valeur esthétique certaine, et qui a permis, pour le pont de Neuilly, l'absence de toute décoration autre que la corniche en tôle pliée au niveau supérieur du pont.

Les dispositions adoptées pour la réalisation des charpentes soudées des ouvrages ont fait l'objet d'études minutieuses et de précautions spéciales.

On s'est attaché tout d'abord à réduire au maximum le nombre et l'importance des soudures effectuées sur le chantier, en faisant réaliser en atelier d'importants tronçons dont les dimensions étaient limitées seulement par les possibilités de transport. Pour inciter les constructeurs à agir dans ce sens, le Cahier des Charges de chaque entreprise spécifiait d'ailleurs que l'Administration ne paierait pas les soudures de chantier, qui seraient considérées comme comprises dans les frais généraux de l'entrepreneur. En atelier, en effet, des dispositifs simples permettent de présenter les pièces de façon que la quasi-totalité des soudures (et en tout cas tous les joints importants) soit exécutée à plat, et de très bons résultats peuvent être obtenus avec des ouvriers de qualification professionnelle courante. L'expérience a, au contraire, confirmé que seuls des soudeurs hautement qualifiés (main-d'œuvre rare et coûteuse) étaient capables d'exécuter correctement

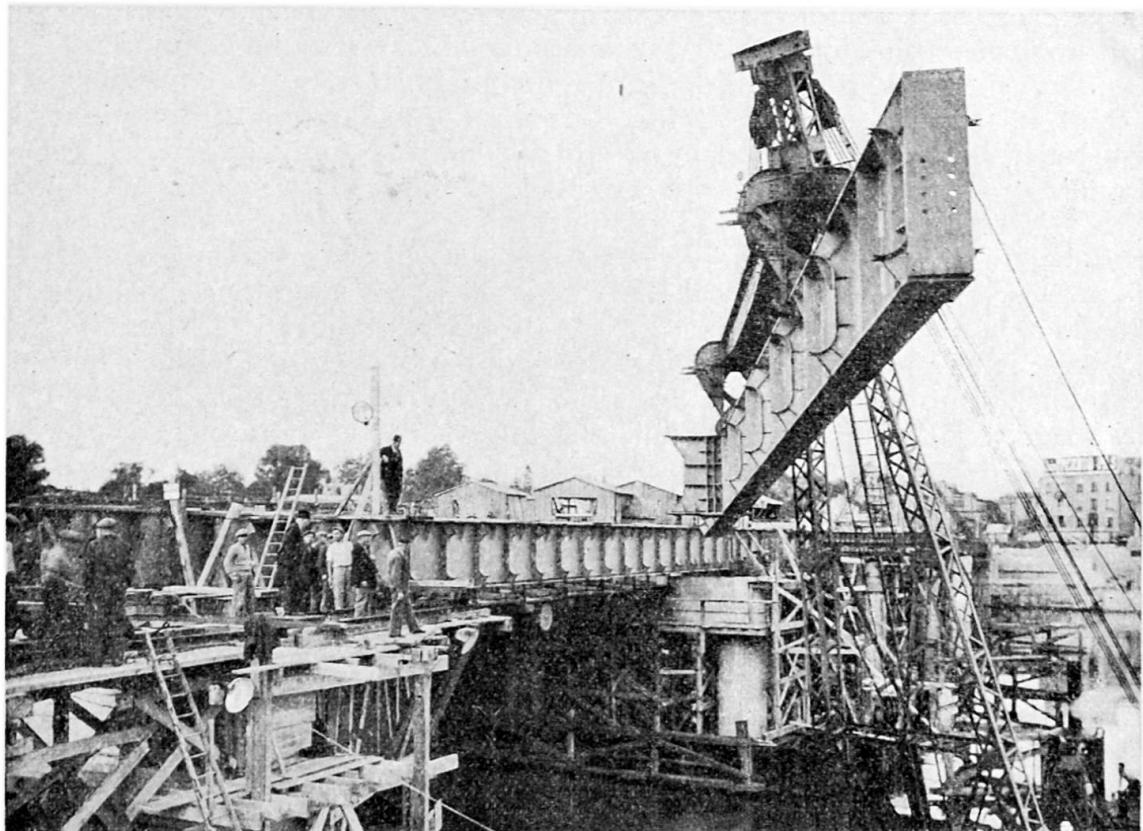


Photo H. Baranger.

Fig. 6. Mise en place des éléments de poutres du pont de Saint-Cloud.

les soudures de chantier, notamment celles au plafond et en corniche montante.

Par ailleurs, la crainte d'introduire dans les pièces des tensions internes importantes et de provoquer des déformations d'ensemble difficilement corrigables a conduit les constructeurs à éviter tout bridage et à travailler sur des éléments libres de toute contrainte, en suivant et en compensant au fur et à mesure les déformations par un processus approprié d'exécution des soudures. Pour la même raison, l'ordre d'exécution des cordons de soudure sur le chantier a été choisi de telle sorte que le retrait dû aux opérations de soudage puisse se faire aussi librement que possible.

L'application de ces principes a été expérimentée et mise au point au cours de la construction d'un pont à poutres droites de 22^m50 de portée, de type analogue aux travées du pont de Saint-Cloud et situé sur une déviation de route à Saint-Denis (fig. 5). Les poutres de cet ouvrage ont été entièrement construites en atelier et les soudures de chantier ont été ainsi réduites aux seules soudures de jonction des membrures supérieures et inférieures des cadres d'entretoisement. Les études, essais et tâtonnements effectués à cette occasion ont permis d'apprécier exactement les difficultés et d'éviter des fausses manœuvres dans la réalisation ultérieure des grands ouvrages.

Les travaux d'atelier du pont de Saint-Cloud ont comporté l'exécution de tronçons de poutres de grande longueur (30 m environ), avec leurs raidisseurs et leurs amorces d'entretoises. Pour permettre l'exécution des joints en soudure à plat, les pièces étaient, dans l'atelier d'un des construc-

teurs, disposées tantôt sur des bancs horizontaux parfaitement nivelés, tantôt sur des tréteaux inclinés, permettant de les présenter dans la position désirée grâce à des manipulations convenables. L'autre constructeur a atteint le même résultat à l'aide d'un bâti tournant de la longueur des tronçons. Les tronçons de poutre ainsi constitués ont été amenés à pied d'œuvre par voie d'eau et mis en place à l'aide d'engins de levage ⁽¹⁾ (fig. 6). Dans ces conditions, les soudures à faire sur le chantier ont été limitées aux joints entre poutres principales et aux cordons bout-à-bout fixant les membrures haute et basse des entretoises sur leurs amorces en attente. On a d'ailleurs pris soin de disposer les joints de chantier des poutres au voisinage des foyers des poutres continues, donc dans les sections où les fatigues sont les plus faibles. D'autre part, les soudures des cadres d'entretoisement ont été effectuées en commençant à une extrémité de la charpente et dans l'intervalle médian, puis en progressant symétriquement et en éventail par rapport à la poutre centrale.

Pour le pont de Neuilly, les tronçons d'arc exécutés entièrement en atelier avaient une longueur de 22 mètres pour l'arche de 67 mètres (3 tronçons pour un arc) et de 16 mètres pour l'arche de 82 mètres (5 tronçons pour un arc) (fig. 7). La réalisation sans bridage de tronçons d'arc rigoureusement conformes aux dimensions du projet a pu être obtenue en construisant un plan de référence parfait de la longueur totale de l'arc et en respectant rigoureusement un processus minutieux d'exécution des divers cordons de soudure (la fig. 8 en donne un exemple). Le montage sur place a été effectué, par groupe de 4 arcs, à l'aide d'un pont de service métallique de 93 mètres de longueur à deux travées solidaires. La soudure des joints de chantier a été exécutée symétriquement par rapport à la clef, par quatre soudeurs (deux par joint) travaillant simultanément. Par mesure de sécurité, l'arc est renforcé intérieurement, au droit de ces joints, par un manchon soudé sur l'un des tronçons, et sur lequel le tronçon voisin vient s'emboîter, l'emboîtement étant facilité par la forme oblique du joint.

Un soin tout particulier fut exigé également pour l'élaboration du métal de base, qui est de l'acier à haute résistance au chrome-cuivre (Ac 54) du Règlement français. La résistance exigée ne put d'ailleurs être obtenue qu'en se tenant très près du pourcentage maximum accepté pour la teneur en carbone; cette teneur a parfois atteint 0,210 % et même 0,215 dans les pièces de forte épaisseur. Il a d'autre part été constaté que les diagrammes traction-allongement des éprouvettes prélevées dans ces pièces ne présentaient pratiquement pas de palier à la limite des domaines élastique et plastique; or ce palier, comme on le sait, permet l'écoulement des tensions internes provoquées par la soudure et est ainsi un élément important dans la recherche d'un métal éminemment soudable. Les essais effectués ont d'ailleurs montré que l'acier des pièces de faible épaisseur était beaucoup plus satisfaisant à cet égard.

Il apparaît ainsi que l'emploi de l'acier de la nuance française Ac 54 dans la construction d'ouvrages soudés nécessite certaines précautions ⁽²⁾.

Il faut également mentionner à ce propos qu'après divers tâtonnements

⁽¹⁾ La mise en place par lancement avait été proscrite pour éviter des fatigues anormales dans les soudures.

⁽²⁾ L'acier 54 au chrome-cuivre est d'ailleurs encore plus difficile à river qu'à souder; le Service constructeur a pu s'en rendre compte à l'occasion de l'exécution d'un autre ouvrage.

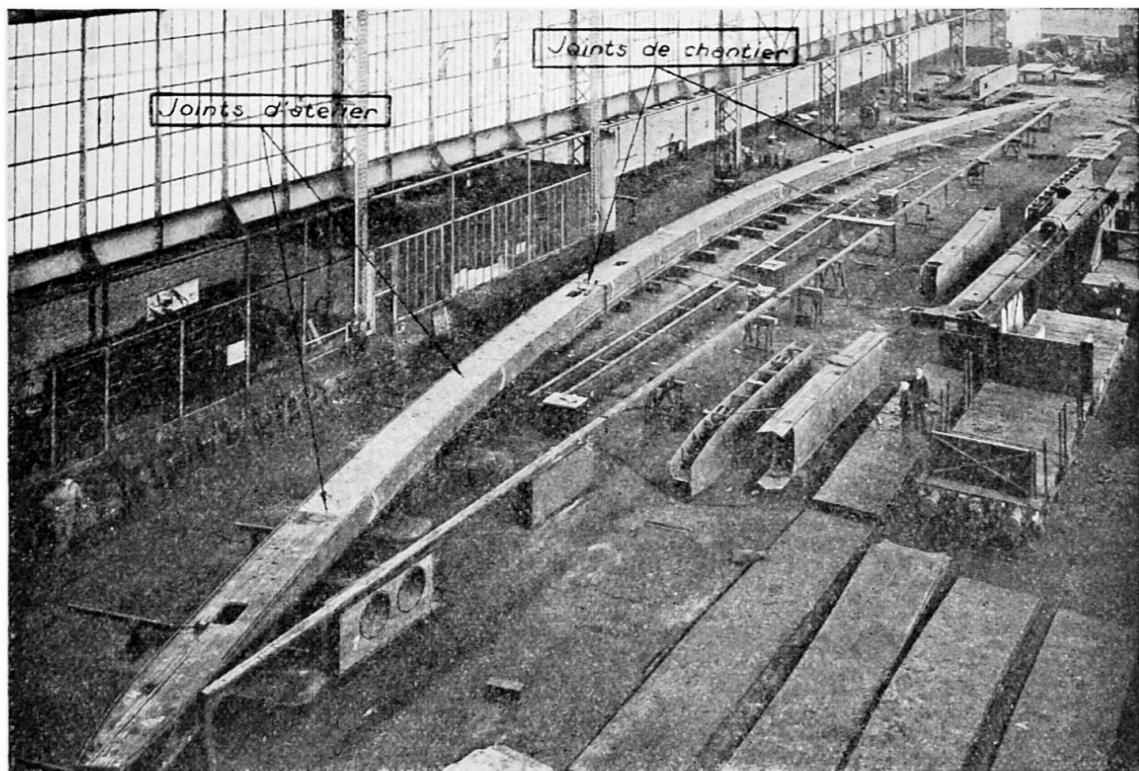
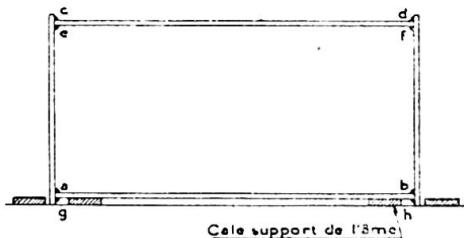


Fig. 7. Construction en atelier d'un arc de 67 mètres du pont de Neuilly.

Fig. 8. Schéma du processus de soudure en atelier d'un tronçon d'arc du pont de Neuilly.

1. Soudure en première passe des cordons a et b, à l'aide de 4 soudeurs (2 par cordon) partant du milieu du tronçon et allant vers chaque extrémité.
2. Retournement du tronçon et soudure en première passe des cordons e et f dans les mêmes conditions que ci-dessus.
3. Soudure en première passe des cordons g et h, à 4 soudeurs.
4. Deuxième retournement du tronçon et soudure en première passe des cordons c et d, à 4 soudeurs.
5. Soudure en deuxième passe des cordons a et b, c et d par 2 soudeurs dans l'arc et 2 soudeurs à l'extérieur.
6. Troisième retournement du tronçon et soudure en deuxième passe des cordons e et f, g et h (voir 5).



on s'est orienté vers l'utilisation d'électrodes dont l'acier présente la plus grande « élasticité » compatible avec la résistance demandée; il apparaît en effet que c'est là la qualité essentielle à rechercher du métal d'addition, et les résultats obtenus dans ce sens ont été très satisfaisants puisque, alors que le Règlement impose pour le métal d'addition un allongement de rupture supérieur à 18 %, les chiffres des essais sur prélèvements ont varié entre 21,50 et 22,50. D'autre part, et toujours pour la même raison, on a utilisé presque uniquement des électrodes de faible diamètre : sur un total de 2 960 000 électrodes, il y a eu 30 % d'électrodes de 3,25 mm, 40 % de 4 mm et 27 % de 5 mm.

Le souci d'avoir le maximum de garantie sur la qualité des joints soudés a conduit à exercer un contrôle sévère et constant sur l'exécution de ceux-ci.

Ce contrôle a porté tout d'abord sur la valeur des ouvriers soudeurs. En dehors des examens d'agrément prévus par le Règlement, chaque

soudeur était tenu de faire figurer au poinçon, à l'origine et à la fin de chaque cordon exécuté par ses soins, la lettre repère qui lui était affectée; d'autre part, les soudeurs travaillaient constamment sous la direction d'un contremaître-soudeur de l'entreprise et sous la surveillance de techniciens de l'Administration spécialistes de la soudure, effectuant un contrôle visuel journalier, complété de temps en temps par un contrôle plus poussé aux points douteux (fraisage ou radios). Cette méthode s'est révélée très efficace, tant par le profitable esprit d'émulation qu'elle crée chez les ouvriers, que par la possibilité qu'elle donne de connaître très rapidement la valeur de chaque soudeur, et ainsi de sélectionner les meilleurs pour les soudures les plus difficiles et les soudures de chantier; c'est ainsi que tous les joints de chantier des poutres principales du pont de Saint-Cloud ont été exécutés par quelques soudeurs soigneusement sélectionnés et spécialement entraînés à cet effet.

Il a été fait également un très large emploi du contrôle radiographique, tant en atelier que sur le chantier (2 400 m de films pour le seul pont de Saint-Cloud). Il est intéressant de noter que ce contrôle a rendu de grands services dans la mise au point de la technique d'exécution des joints, en permettant de suivre l'influence des divers facteurs d'exécution (ouverture de l'angle des chanfreins, écartement des pièces, diamètre des électrodes, reprises à l'envers, etc.) et de modifier ceux-ci jusqu'à disparition complète des défauts constatés. Il a ainsi été possible, notamment, d'éliminer complètement un défaut systématique apparu dans le joint âme-profilé à téton des poutres du pont de Saint-Cloud, en prenant des dispositions particulières pour la présentation des éléments à assembler et l'exécution de la reprise à l'envers.

Ainsi, malgré les graves écueils que présentait à l'époque l'exécution de grands ponts en acier à haute résistance soudé, et grâce au soin et aux précautions apportés dans la conception des ouvrages et dans leur réalisation, les ponts de Saint-Cloud et de Neuilly constituent des réussites certaines à l'actif de la soudure. Leur exemple doit inciter les constructeurs à utiliser de plus en plus ce nouveau mode d'assemblage, dont l'emploi rationnel apporte un grand progrès dans la technique de la construction métallique : réduction des poids et construction très homogène, cette dernière qualité se révélant dans l'aspect même des ouvrages.

La brièveté voulue de cette communication ne nous a pas permis d'approfondir les questions suivantes qui, pour le progrès de la technique de la construction soudée, mériteraient certainement de plus longs développements :

1. Recherche d'un acier à haute résistance éminemment soudable;
2. Avantages et inconvénients de l'emploi des plats à téton;
3. Difficultés de laminage des profils en Acier 54 (risques de pailles et feuillures);
4. Fabrication et recette des électrodes;
5. Joints soudés à l'atelier et au chantier;
6. Contrôle des soudeurs et des soudures.
7. Influence de divers facteurs sur la résistance des joints soudés (correction des déformations par martelage; meulage des cordons de soudure; température au moment de la soudure).

Résumé

Les ponts de Saint-Cloud et de Neuilly sur la Seine, construits entre 1937 et 1941, en acier à haute résistance entièrement soudé à l'arc électrique, sont les premières grandes réalisations françaises de ponts métalliques soudés. Le premier, d'une longueur totale de 186^m50, est un ouvrage à poutres continues sous chaussée de hauteur constante. Le second présente deux arches, de 82 et 67 mètres de portée, à arcs multiples du type à caisson et articulés aux naissances.

La présente communication montre le soin et les précautions apportés dans la conception et l'exécution de ces ouvrages. Des précisions sont fournies à ce sujet sur les points suivants :

1. Simplification des éléments constitutifs de la charpente;
2. Dispositions prises pour la réalisation en atelier et sur le chantier;
3. Elaboration du métal de base et choix des électrodes;
4. Contrôle des soudeurs et des soudures.

En définitive, les ponts de Saint-Cloud et de Neuilly constituent des réussites certaines à l'actif de la technique de la soudure et doivent inciter au développement de celle-ci.

Zusammenfassung

Die Brücken von Saint-Cloud und von Neuilly über die Seine, erbaut zwischen 1937 und 1941 in hochwertigem Baustahl und vollständig mit Lichtbogen geschweisst, sind die ersten grossen Verwirklichungen geschweißter Stahlbrücken in Frankreich. Die erste mit einer Gesamtlänge von 186^m5 ist ein durchlaufender Balkenträger von konstanter Höhe mit obenliegender Fahrbahn. Die zweite umfasst zwei Brückenbögen von 82 und 67 m Spannweite aus zahlreichen gelenkig gelagerten Bogenträgern mit Kastenquerschnitt.

Der vorliegende Aufsatz zeigt die Sorgfalt und Vorsicht, die beim Entwurf und bei der Ausführung dieser Bauwerke aufgewendet wurden. Folgende Punkte sind dabei ausführlicher behandelt worden :

1. Vereinfachung der Bauelemente der Tragkonstruktion;
2. Hinsichtlich der Erstellung in der Werkstatt und auf dem Bauplatz getroffene Anordnungen;
3. Bearbeitung des Grundmaterials und Wahl der Elektroden;
4. Kontrolle der Schweisser und der Schweißung.

Die Brücken von Saint-Cloud und von Neuilly stellen bemerkenswerte Erfolge der Schweißtechnik dar und dürften einen Beitrag zu deren Entwicklung leisten.

Summary

The Saint-Cloud and Neuilly bridges over the Seine, built between 1937 and 1941 of high tensile steel entirely welded by electric arc, are the

first big French instances of welded steel bridges. The former, with a total length of 186^m50 (615 ft), a structure with continuous roadway-bearing girders of a constant height. The latter has two arches with spans of 82 m (269 ft) and 67 m (220 ft) respectively, multiple arc of the trough type and with abutment hinges.

The present communication shows the care and precautions taken in the planning and execution of these structures. Specific information is supplied on this subject as regards the following points :

1. Simplification of the individual parts of the framework;
2. Arrangements made for construction in the workshops & site of work;
3. Elaboration of the basic metal and selection of electrodes;
4. Control of welders and welding materials.

Thus it can be stated that the Saint-Cloud and Neuilly bridges are definite successes in the realm of welding technique and should encourage development of the latter.

Ia4

La soudure à l'arc dans la construction métallique en Suède

Die Lichtbogenschweissung im Stahlbau in Schweden

Arc welding in steel structures in Sweden

CARL T. INGWALL

Civilingenieur, Norrköping

Der heutige Entwicklungsstand der schwedischen Schweißtechnik dürfte vielleicht am besten aus einem Bericht über einige hierzulande während der letzten Jahre ausgeführte Brückenkonstruktionen hervorgehen.

1. Eisenbahnbrücke über einen grösseren Fluss mit Stahlüberbau in vollständig geschweisster Ausführung

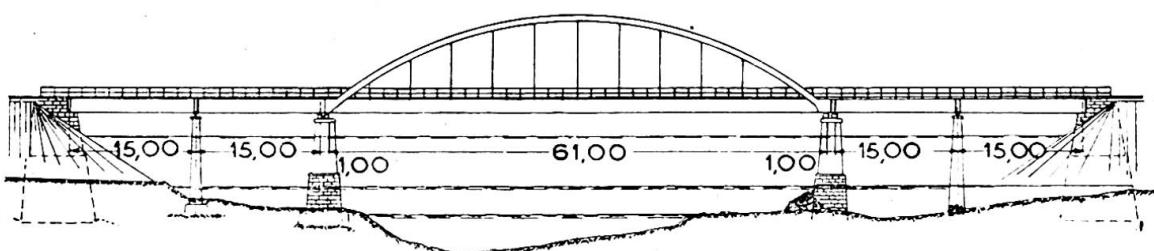


Abb. 1. Ansicht der Brücke in vollständig geschweisster Ausführung.

Diese Brücke, die früher aus drei Blechbalken mit Stützweiten von $30 + 61 + 30$ Metern bestand, wurde bei der ersten Umbauetappe mit neuen Uferpfeilern in der Mitte der alten Seitenöffnungen versehen, wodurch die Stützweiten $15 + 15 + 61 + 15 + 15$ Meter wurden. (Abb. 1.)

Man dimensionierte die neue Brücke sowohl für eine Eisenbahnbelastung mit Achsindrücken von 20 Tonnen (Abb. 2), als auch für eine aus drei Achsindrücken von 25 Tonnen mit gegenseitigem Abstand von 1^m50 bestehende Lastgruppe. Der dynamische Einfluss der Eisenbahn-

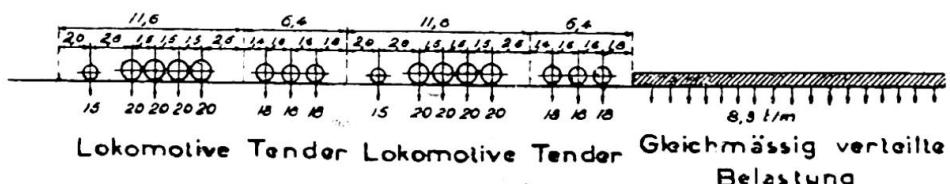


Abb. 2. Belastungsbedingungen der Eisenbahnbrücke.

belastung und der Lastgruppe wurde unter Annahme einer Geschwindigkeit von 100 km/Stunde berechnet.

Die erwähnte Lastgruppe von 3 Achsenträgern zu 25 Tonnen ist mit Rücksicht auf schwere Spezialwagen angenommen worden, damit die Sekundärkonstruktion (Längs- und Querträger) und ihre Anschlüsse die erforderlichen Festigkeiten erhielten. Die Seitenöffnungen bestehen aus geschweißten, über die neuen Uferpfeiler durchgehenden Vollwandträgern mit den Geleisen auf Holzschwellen und den Quer- und Längsträgern so angeordnet, dass die Unterkante der Schwellen in gleicher Höhe mit der Oberkante der Hauptträger ist. Damit wird der spätere Austausch der Schwellen erleichtert.

Da die Seitenöffnungen von geringerem Interesse sind, wird im folgenden nur die Bogenkonstruktion behandelt.

Die Hauptöffnung besteht aus durch Vollwandträger verstiften Stabbögen mit Hängestangen aus Rundstahl (Langer'scher Balken). Die Brücke ist in Baustahl St.44 ausgeführt und ganz geschweißt.

Die Lieferungsvorschriften verlangten die Einhaltung der folgenden Analysenforderungen :

$$\begin{aligned} C &\text{ max. } 0,20 \% ; \\ P &\text{ max. } 0,06 \% ; \\ S &\text{ max. } 0,06 \% ; \\ P + S &\text{ max. } 0,10 \% . \end{aligned}$$

Die Versteifungsträger sind wie die Hauptträger der Seitenöffnungen als I-förmige Träger mit einer Höhe von 2 000 mm und einer Gurtbreite von 400 mm ausgebildet. Die Gurdicke beträgt 32 mm und ist somit ziemlich mässig.

Das Geleise wird auch in der Hauptöffnung von Längs- und Querträgern getragen, welche auf gleiche Weise wie in den Seitenöffnungen angeordnet sind und welche dieselben Hauptmasse haben. Die Längsträger sind auf die Querträger aufgelegt und als durchgehende Balken ausgebildet (Abb. 3).

Die Gurte bestehen aus sogenannten Nasenprofilen und die Verbindung zwischen Gurt und Steg ist als Stumpfnaht ausgebildet. Bei der Herstellung der Versteifungsträger in der Werkstatt schnitt man zuerst Gurtplatten, bezw. Stegbleche zur erforderlichen Länge.

Die X-Nähte zwischen Stegblech und Gurtplatten wurden danach bei wagrecht liegendem Träger teil geschweißt (Abb. 4). Stegbleche und Gurtplatten befestigte man zuerst auf einer Seite mit etwa 100 mm langen Hilfsnähten im Abstand von 700 mm. Dann wurde der Träger gewendet und die Naht auf der anderen Seite von 4 Schweißern gleichzeitig und symmetrisch von der Mitte aus nach den Enden hin verschweißt (Schweißnaht auf dem Bilde mit 1 bezeichnet). Darauf hat man den Träger wieder

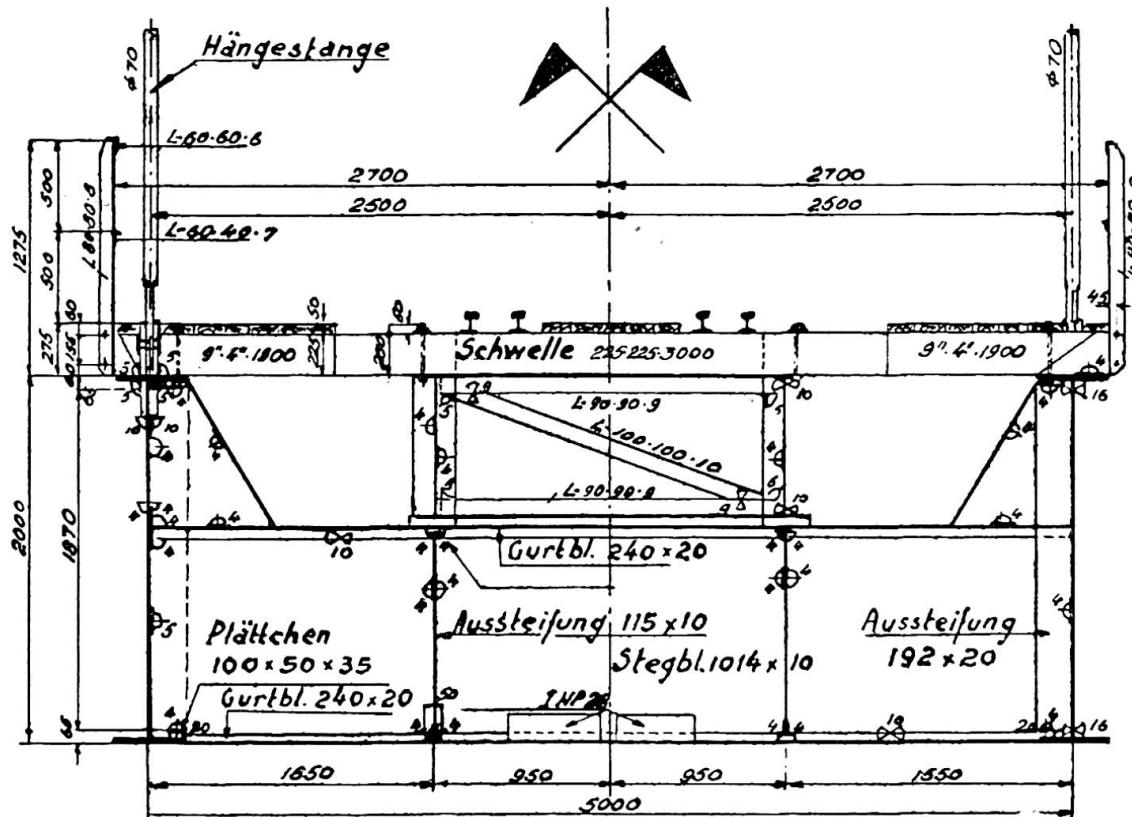


Abb. 3. Querschnitt.

gewendet und die Wurzelseite der fertig geschweißten Hälfte der X-Naht ausgekreuzt. Dabei wurden auch die Hilfsnähte entfernt. Zum Schluss verschweißte man noch die andere Hälfte der Naht (auf dem Bilde mit 3 bezeichnet).

Während dem Zusammenschweissen eines der Teile des Versteifungsträgers wurden Dehnungsmessungen ausgeführt, hauptsächlich um festzustellen ob es möglich sei, unter den bei der praktischen Arbeit in der Werkstätte waltenden Verhältnissen die beim Ausführen der Halsschweißnähte im Trägermaterial entstehenden Spannungen zu bestimmen. Die mit Huggenberger-Tensometer ausgeführten Messungen wurden jedoch durch die übrigen, in der Werkstatt gleichzeitig vor sich gehenden Arbeiten gestört. Beim Schweißen der ersten Seite der Halsnaht entstanden keine nennenswerten Dehnungen und somit auch keine Spannungen an den Messstellen. Beim Schweißen der anderen Seite wurden dagegen, und zwar weil die schon ausgeführte Schweißnaht die Schrumpfung verhinderte, grössere Dehnungen gemessen, entsprechend Spannungen bis etwa 550 kg/cm^2 .

Die Bogen (Abb. 5) werden aus Gründen der Knicksicherheit durch zwei Stegbleche $600 \times 15 \text{ mm}$, die oben mit einer Gurtplatte $660 \times 20 \text{ mm}$ verbunden sind, gebildet. Als untere Gurtung sind zwei

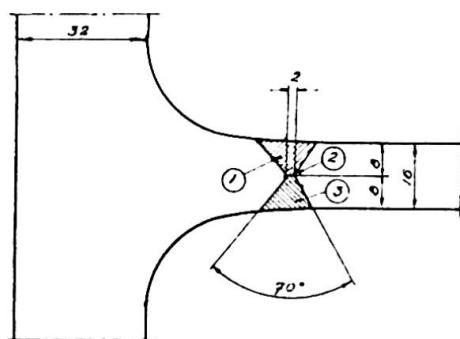


Abb. 4. Raupenfolge in einer X-Naht zwischen Stegblech und Gurtplatte.

Vierkanteisen 80×80 mm angeordnet, welche wegen ihrer bedeutenden Dicke im Walzwerk zum Ausgleich möglicher Walzspannungen normali-

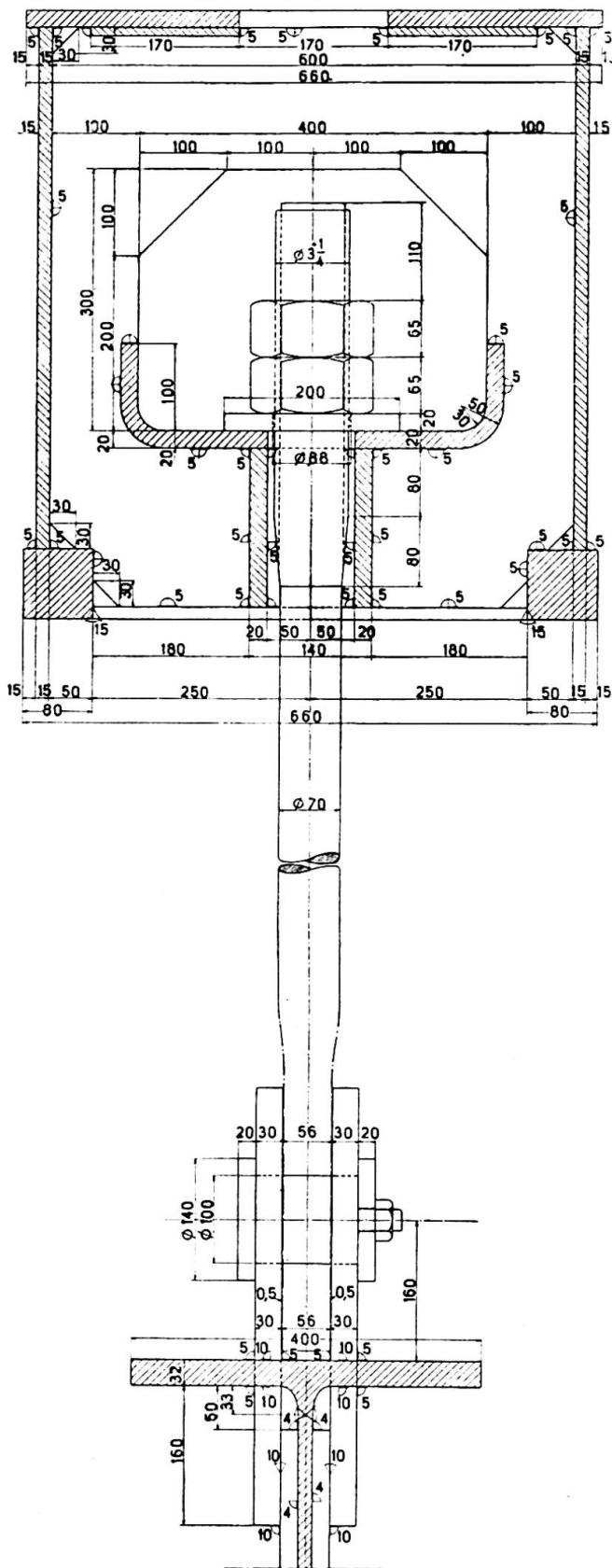


Abb. 5. Hängestangenanschluss.

glicher Walzspannungen normalisiert wurden. Mit Rücksicht auf das Aussehen sind die Bogen kontinuierlich gekrümmmt. Die Querverbände zwischen den Bogen bestehen nur aus biegungsfesten Transversalen, die mit jenen zusammen ein Rahmenwerk bilden (Abb. 6), welches als oberer Windverband wirkt.

Bei der Herstellung der Bogenteile in der Werkstatt wurden die Stegbleche und die Gurte zuerst einzeln gestossen. Um das grosse Schweissvolumen des Stosses eines Vierkanteisens, das sich bei der Ausführung als X-Stumpfnaht ergeben hätte, zu vermeiden, hat man die Stossstelle in der in Abb. 7 dargestellten Art und Weise ausgebildet.

Als die verschiedenen Elemente in der erforderlichen Länge fertiggestellt waren, wurden sie zusammengelegt und zusammengeschweisst.

Die Auflagerung der Brücke, d.h. der Anschluss des Bogens an den Versteifungsträger, ist in der Werkstatt in einem Stück hergestellt worden (Abb. 8). Gewisse Schwierigkeiten sind beim Zusammenschweissen dieses Teiles insofern entstanden, als die Anschlüsse zwischen Stegblech und wagrechten Blechen beim Schweissen der äusseren Bleche die Tendenz hatten, zu reißen. Man entschloss sich deshalb diese Auflagerteile, insgesamt vier Stück, nach der Herstellung auf 600° C zu erwärmen, um die Schweißspannungen auszugleichen.

Die Form und Ausbildung der Hängestangen aus 70 ϕ Rundstahl und ihrer Anschlüsse geht aus Abb. 5 hervor. Die Hängestangen wurden wegen der Schwierigkeit, die Spannungen in jedem einzelnen Punkte be-

rechnungsmässig festzustellen und wegen der Massabweichungen und Exzentrizitäten, die beim Schmieden und Gewindestechen entstehen können, als unsichere Bau-Elemente behandelt. Deshalb wurde eine Hängestange mit den dazu gehörenden Anschlüssen in natürlicher Grösse hergestellt und unter Messung der Spannungszunahme in den verschiedenen Querschnitten bis zum Bruch belastet. Das Resultat zeigte eine regelmässige Steigerung der Spannungen bei steigender Last und zufriedenstellende Festigkeit der Konstruktion. Der

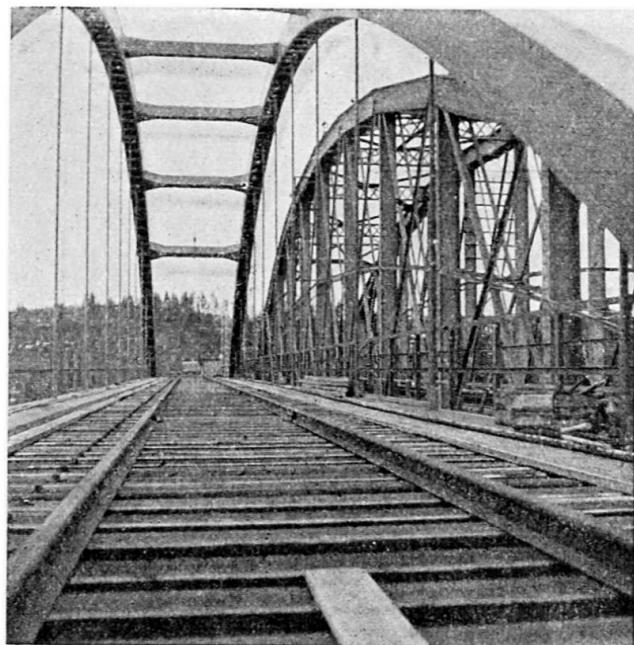


Abb. 6. Oberer Windverband zwischen den Bogen.

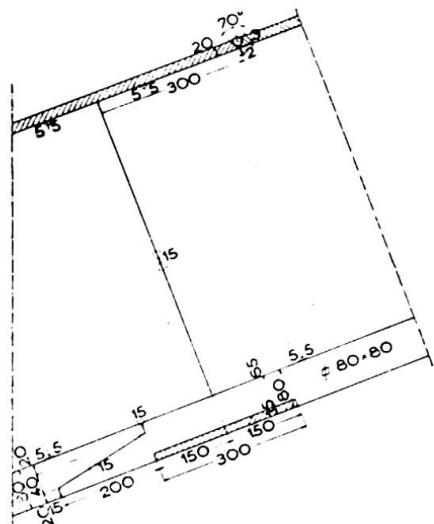


Abb. 7. Stosstelle, die ein zu grosses Schweißvolumen vermeidet.

Bruch entstand im oberen, mit Gewinden versehenen Teil der Hängestange bei einer Belastung von 200 Tonnen, was als ein befriedigendes Resultat angesehen werden muss. Die berechnete maximale Belastung der Stangen beträgt 45 Tonnen. Bei der Belastungsprobe wies der geschweißte Anschluss der Hängestange keinerlei Anzeichen des Fließens oder der Formänderung auf.

Bei der Montage wurden zuerst die Versteifungsträger verlegt und zusammenge schweisst. Gleichzeitig wurden die Querträger und Längsträger an Ort und Stelle gebracht. Danach hat man die Bogen und ihren Quer

verband auf Gerüsten montiert und zusammengeschweisst. Zuletzt wurden die Hängestangen eingebaut.

Die Ausführung der Montage stösse in Versteifungsträger und Bogen geht aus Abb. 9 her vor. Diese Stösse (auf dem Bil de mit M bezeichnet) wurden ihrer grossen Bedeutung wegen mit besonderer Sorgfalt ausgeführt.

Abb. 10 zeigt die Schweißnaht des Stosses des Obergurts

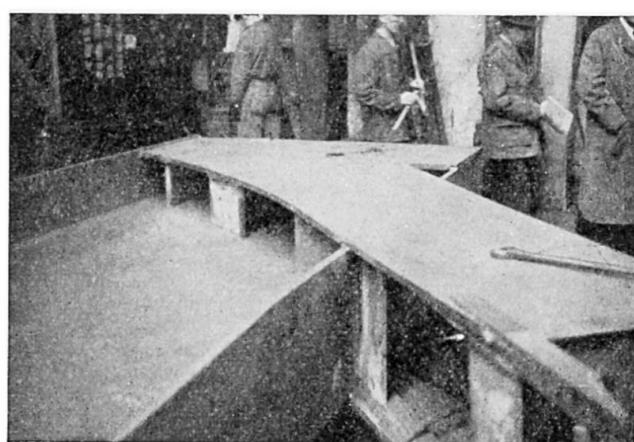


Abb. 8. Anschluss des Bogens an den Versteifungsträger.

des Versteifungsträgers, welche als U-Naht ausgeführt worden ist. Auch die Naht des unteren Gurtes ist U-förmig ausgebildet, unter Vermeidung von Ueberkopfschweissung. Einzig die Schweissung der Wurzelraupen der Gurt-nähte nach dem Auskreuzen wurde als Ueberkopfschweissung ausgeführt. Die Naht des Stegstosses ist als X-Naht ausgebildet.

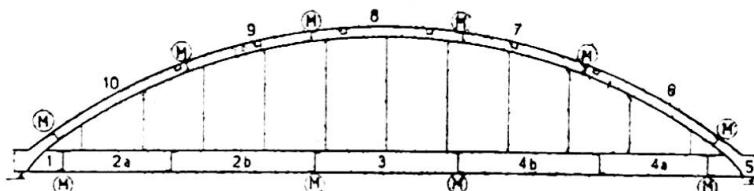


Abb. 9. Lage der Montagestöße, mit M bezeichnet.

Im Detail wurden die Montagestöße des Versteifungsträgers folgendermassen ausgeführt : Zuerst hat man die zu stossenden Trägerteile mit Hilfsblechen (Abb. 11) aneinander befestigt, mit einem Zwischenraum der Stossflächen von 2 mm, entsprechend den bei der Abkühlung nach dem Schweissen entstehenden Schrumpfungen. In der Verlängerung der beiden Enden der unter 45° zur Längsrichtung des Trägers geneigten Schweisstellen der Gurtstösse wurden Hilfsbleche angeschweisst, damit bis in die äussersten Fasern der Gurte vollwertige Nähte erhalten werden konnten (Abb. 12). Nach beendigtem Schweissen wurden diese Hilfsbleche weggemeisselt und die Gurtnähte geschliffen.

Abb. 13 dient zur Erläuterung der Reihenfolge der Arbeiten beim Schweissen des Stosses. Zuerst legte man zwei bis drei Schweissraupen als Heftnähte in Ober- und Untergurt (1). Dann wurden Stegblech und Gurte gleichzeitig von drei Schweissern bearbeitet. Im mittleren Drittel

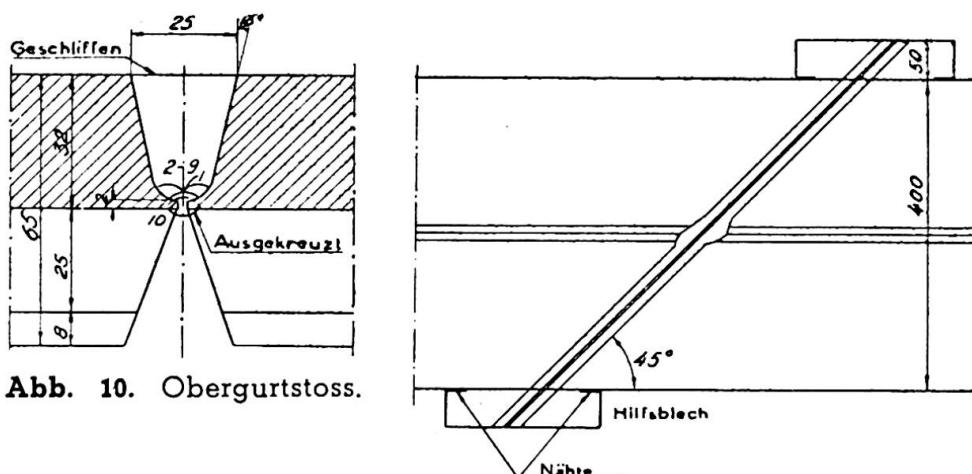


Abb. 10. Obergurtstoss.

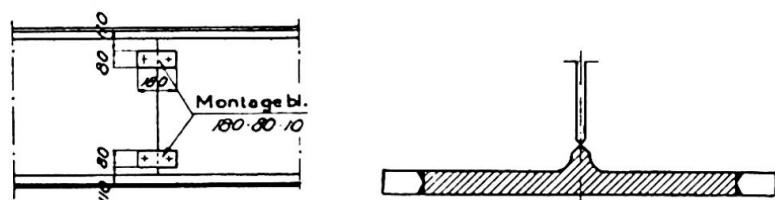


Abb. 11.
Montagestoss.



Abb. 12. Montagestoss.

des Stegbleches wurde eine Raupe von etwa 1/3 des endgültigen Volumens der V-Naht (2) gezogen, worauf die Montagebleche entfernt wurden. Dann schweisse man das untere und darauf das obere Drittel des Stegstosses in gleicher Stärke. Nach dem Auskreuzen der Wurzelseite wurden die Schweißraupen auf der anderen Seite des Stegstosses in derselben Stärke und Reihenfolge gezogen. Darauf wurde die Naht auf der zuerst geschweisssten und schliesslich auf der Gegenseite ganz gefüllt. Das Schweißen des Stegstosses führte man stets von unten nach oben durch.

Die Arbeiten 1-9 führte man abgesehen vom erwähnten Wegmeisseln der Hilfsbleche ohne Unterbruch durch. Nach der Fertigstellung der Stöße im Steg und in den Gurten wurde die noch ungeschweissste Stelle am Hals bearbeitet, in der auf der Abbildung bezeichneten Reihenfolge und Richtung. In diesem Falle waren keine besonderen Spannvorrichtungen zur Erleichterung der Schrumpfungen erforderlich. Der Träger ruhte nämlich während dem Schweißen auf Rollen in festen, geschmierten Lagerschalen. Der Widerstand gegen die Bewegung des Trägers bei der Schrumpfung war somit ziemlich gering. Es würde zu weit führen, auch über die Reihenfolge des Schweißens bei den Bogenstößen und Längsträgerstößen zu berichten, welche im Prinzip mit derjenigen des Versteifungsträgers übereinstimmt. Auch für diese Stöße und für den Anschluss der Querträger an die Hauptträger waren im voraus sorgfältige Pläne ausgearbeitet worden.

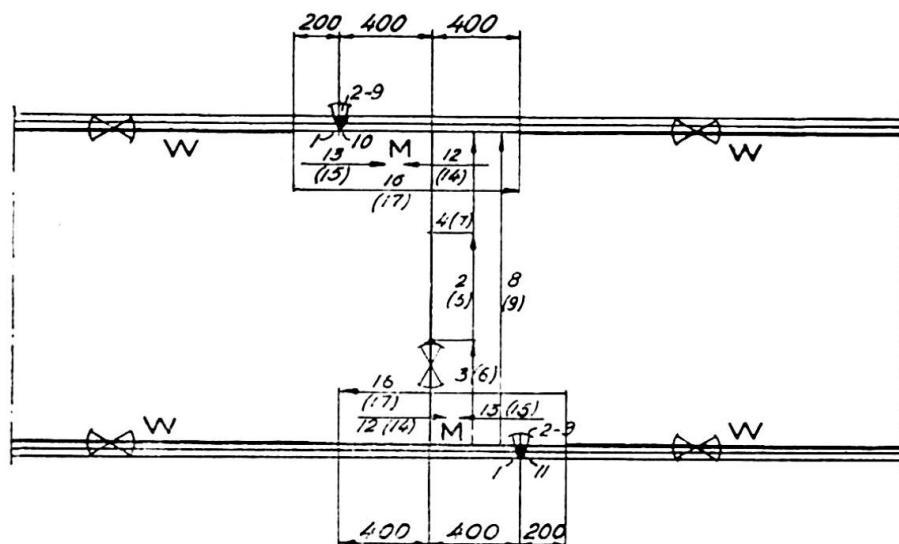
Die Ausführung der Schweißungen in der Werkstatt und auf dem Montageplatz wurde, soweit es das zur Verfügung stehende Personal erlaubte, so sorgfältig wie möglich kontrolliert. Röntgenphotographien waren dabei natürlich ein wertvolles Hilfsmittel. Die Kostenfrage setzte der Röntgenprüfung eine Grenze. Es wurden jedoch alle Querverbindungen und die unteren Hals-Schweissnähte der Versteifungsträger auf diese Weise geprüft. Im Zusammenhang mit der Frage der Zweckmässigkeit der gewählten konstruktiven Lösung wäre natürlich auch eine lückenlose Röntgenprüfung der oberen Hals-Schweissnähte sehr erwünscht gewesen. Da aber die geprüften unteren Schweißstellen gute Ergebnisse zeigten, glaubte man auf die umfassende Prüfung verzichten zu können. Die Schweißstellen in den Bogen, die nur auf Druck arbeiten, sind mit Ausnahme der Querstöße nicht mit Röntgenstrahlen geprüft worden.

Abb. 13.

Reihenfolge der Arbeiten beim Schweißen der Montagesstöße.

M : Montageschweißung.

W : Werkstatt-schweißung.



Das beschriebene Bauwerk, die erste grössere vollständig geschweißte Eisenbahnbrücke Schwedens wurde im Jahre 1942 gebaut und ist seit Jahresbeginn 1943 einwandfrei im Gebrauch.

2. Viadukt für ein Güterzugsgeleise über einen Bahnhof



Abb. 14. Ansicht einer Eisenbahnbrücke mit konstantem Krümmungshalbmesser.

Das Erweiterungsprojekt der Bahnhofsanlagen einer grösseren schwedischen Hafenstadt umfasst auch ein neues direktes Geleise für Güterzüge nach einem Rangierbahnhof, das über einen etwa 250 m langen Viadukt und Damm führt. Die Anwendung der einen oder anderen Bauweise war von den Verhältnissen im Baugrund abhängig. Der Viadukt überbrückt u.a. zwei Eisenbahnlinien, von denen eine elektrifiziert ist.

Die Fundamente bestehen aus Eisenbeton und sind in der üblichen Art und Weise ausgeführt worden. Die Zwischenstützen der durchgehenden Ueberbauten sind als Stahlpfeiler auf Fundamenten aus armiertem Beton ausgebildet.

Der Viadukt liegt in einer Kurve von 240 m Radius. Sein Stahlüberbau besteht aus drei durchlaufenden Vollwandträgern über je drei Oeffnungen und fünf durchlaufenden Vollwandträgern über je zwei Oeffnungen und ist für Lokomotiven mit 25 Tonnen Achsendruck berechnet und mit Haupt-, Längs- und Querträgern ausgebildet worden. Wegen des Aussehens sind die Hauptträger in Anpassung an die Geleisekurve auf die ganze Länge des Viadukts mit konstanter Krümmung ausgeführt worden (Abb. 14). Die Längsträger sind von Querträger zu Querträger geradlinig ausgebildet. Die Schwellen liegen direkt auf den Längsträgern. Die Ueberhöhung der Schienen wird durch Unterlageklötzchen zwischen Schwelle und Schiene gewährleistet.

Bei der Berechnung der Hauptträger hat man die durch die Krümmung der Träger in der Horizontalebene verursachten zusätzlichen Spannungen berücksichtigt.

Das Krümmen der Gurtbleche der Hauptträger wurde vor dem Zusammenschweissen von Stegblech und Gurt ausgeführt und geschah in der folgenden Weise: Man legte den Gurt auf eine Spanrichtplatte aus gegossenen, perforierten Eisenplatten flach auf und spannte ihn mit Dornen fest, welche in je 2-3 Metern Abstand in Löcher in den Platten eingetrieben wurden. Dann bog man das Werkstück mittelst einer beweglichen 50 Tonnen-Presse durch, die zwischen die Dornen gesetzt und ebenfalls

mit diesen befestigt wurde. Die Krümmung des Gurts wurde während der Bearbeitung durch die Presse mit einer Holzschablone kontrolliert. Um eine Beschädigung der Gurtkanten durch die Dorne zu vermeiden, wurden zwischen diese und den Gurt Keile eingetrieben. Auf diese Weise wurde Stück für Stück kalt abgebogen. Die grösste Dimension eines Gurts betrug 400×43 mm.

Wie aus Abb. 15 hervorgeht waren die Gurte als Nasenprofile ausgebildet. In Uebereinstimmung mit den massgebenden Vorschriften wurden sämtliche Gurtstösse in 45° zur Hauptkraftrichtung ausgeführt, weshalb die Schweissnaht als dem Grundmaterial gleichwertig betrachtet werden kann. Abb. 16 zeigt den Anschluss des sekundären Längsträgers an den Querträger und des Querträgers an den Hauptträger. Zur Gewährleistung der Kontinuität der sekundären Längsträger über den Querträgern sind die Obergurte der Längsträger mit einer Lasche verbunden worden, welche durch einen Schlitz im Querträger geführt worden ist. Dies geschah, um im Steg des Querträgers eine Kraftüberleitung senkrecht zur Walzrichtung zu vermeiden, da man dabei Gefahr läuft, dass « pipes » und Doppelwalzungen vorkommen. In Bezug auf den Anschluss des Querträgers an den Hauptträger ist zu bemerken, dass das Schweißen senkrecht zur Hauptkraftrichtung des Trägers vermieden worden ist und dass die Hals-Schweissnähte zwischen den Steg- und Gurtblechen des Hauptträgers nicht durch die Kehlnähte der Versteifungsbleche gestört werden.

Der Stahlüberbau ist vollständig geschweisst mit Ausnahme der Anschlüsse des Windverbandes zwischen den Untergurten der Hauptträger, wo Nieten zur Verwendung kamen.

Die Zwischenstützen bestehen aus zylindrischen Stahlsäulen, die beidseits mit Lagern versehen sind. Diese können nach oben und nach unten

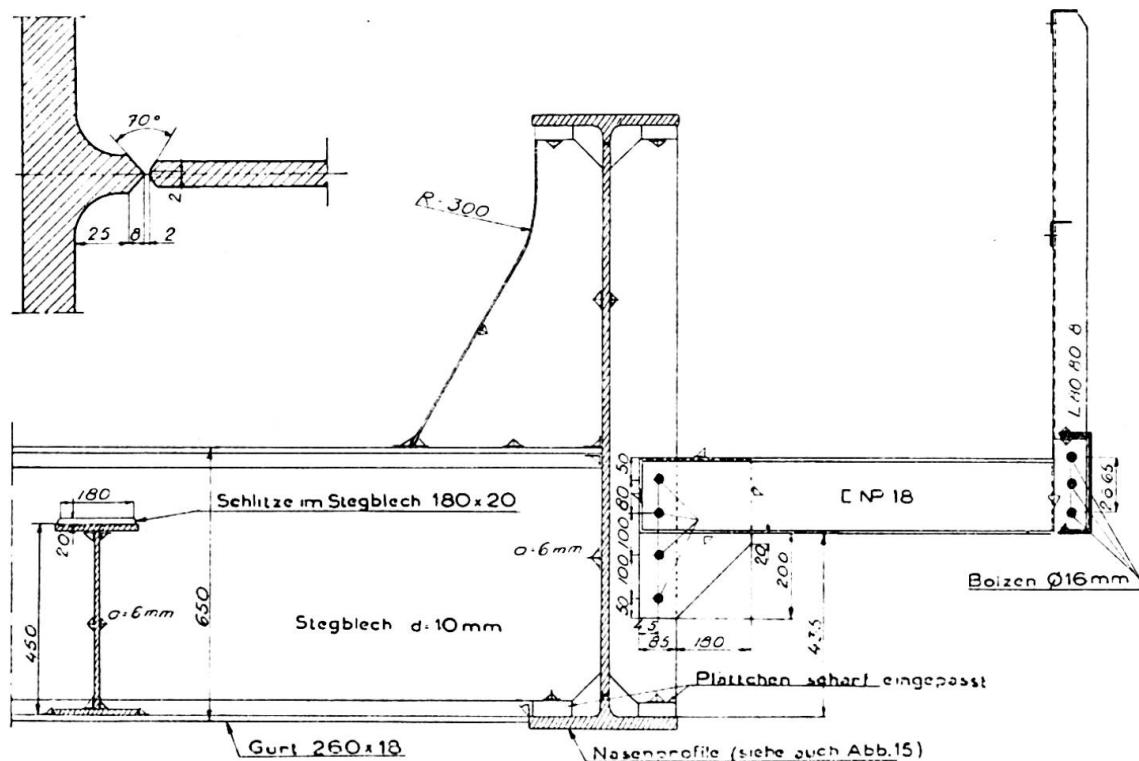


Abb. 15 und 16. Hauptträger und Anschluss der Querträger.

gerichtete Vertikalkräfte aufnehmen und ermöglichen gleichzeitig Bewegungen in der Horizontalebene. Sowohl die beweglichen als auch die festen End-Auflager sind zur Aufnahme nach oben gerichteter Kräfte ausgebildet. (Bei einer bestimmten Lage der Verkehrslast könnte sich sonst ein Brückenteil heben.) Jeder Träger wurde in der Werkslatt von Hand geschweisst und als ganzes Stück nach dem Bauplatz transportiert, wo der Zusammenbau der verschiedenen Brückenteile stattfand. Das gesamte Stahlgewicht, einschliesslich der Pfeiler, beträgt 330 Tonnen.

Die Brücke wurde im Jahre 1947 fertiggestellt.

3. Ortsbewegliche Kriegsbrücken

QUERSCHNITT

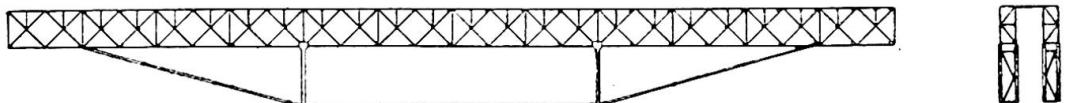


Abb. 17. Ansicht und Querschnitt der Brücke.

Für die schwedische Armee wurden während des letzten Krieges ortsbewegliche Kriegsbrücken hergestellt (Abb. 17). Diese Brücken bestehen aus vollständig geschweissten Elementen aus Rohren (Abb. 19), welche durch Kupplungsvorrichtungen (Abb. 20) in den gewünschten Längen zusammengebaut werden können. Bei grösseren Spannweiten und höheren Belastungen kann ein Zugband an die Untergurte der Brücke angebracht werden. Die Elemente messen 3 000 mm in der Länge, 1 500 mm in der Höhe und 600 mm in der Breite. Die Untergurte bestehen aus 80 mm — Rohren von 6 mm Blechstärke; die Rohre der Vertikalen und Diagonalen haben einen Durchmesser von 57 mm und eine Blechstärke von 3 mm,

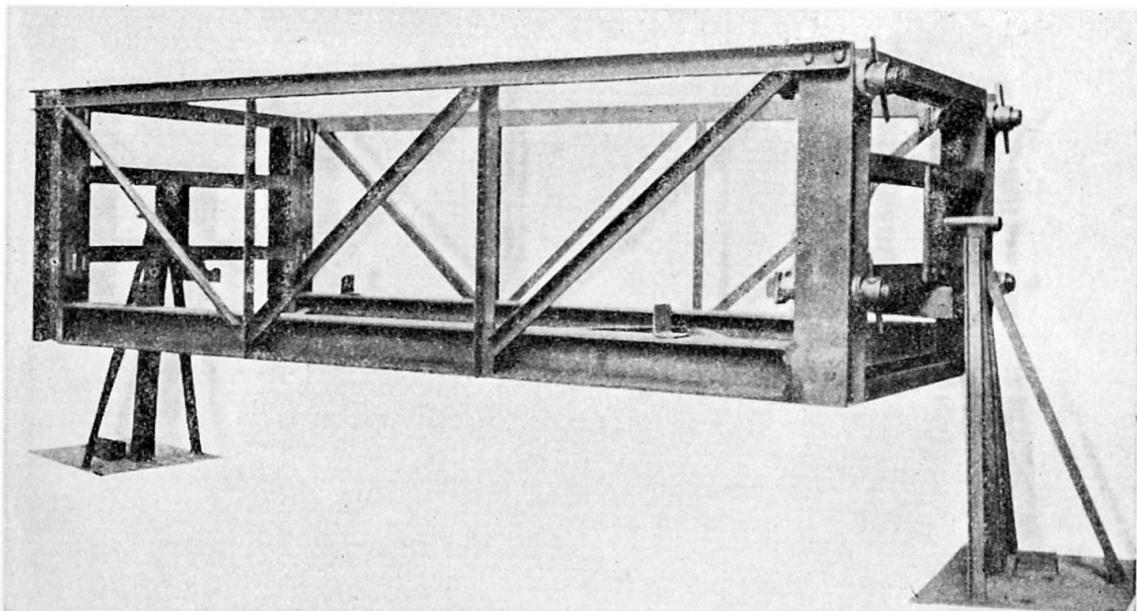


Abb. 18. Schweissvorrichtung.

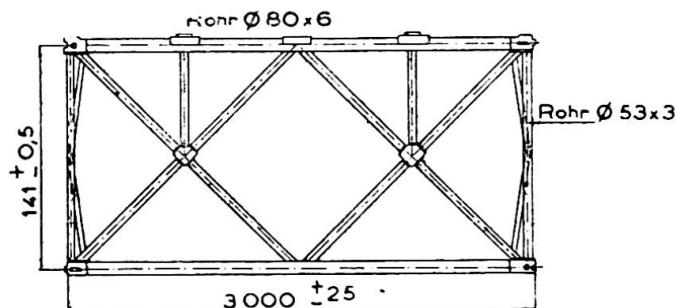


Abb. 19 (links). Aus Rohren zusammengestelltes Element.

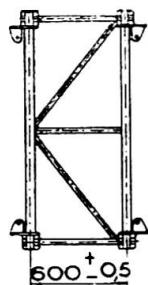
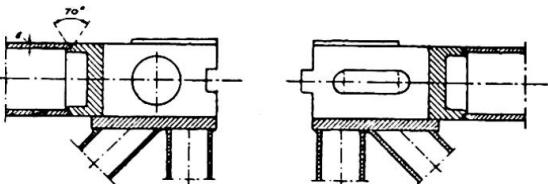
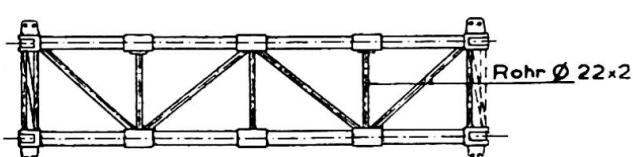


Abb. 20 (unten). Kupplungsstück.



diejenigen der querlaufenden wagrechten Streben und der Enddreiecke einen Durchmesser von 22 mm. Was die Schweißtechnik anbelangt, so sind die vorgeschriebenen, ausserordentlich engen Toleranzen von grösstem Interesse. Beispielsweise war die Toleranz des Höhenmasses sowie des Breitenmasses der Elemente $\pm 0,5$ mm. Die Länge der Elementen durfte mit $\pm 2,5$ mm variieren. Für die Gurdstab längen in ein und demselben Element war aber nur eine maximale Abweichung von $\pm 1,0$ mm zulässig. Mit Hilfe von Einspannvorrichtungen (Abb. 18) und durch Anwendung einer geeigneten Schweißfolge ist es den Herstellern gelungen, diese Toleranzforderungen, die durch spezielle Messvorrichtungen (Abb. 21) kontrolliert wurden, nachzukommen. Die wichtigsten Nähte wurden als Stumpfnähte ausgeführt. Die 70°-Stumpfnäht zwischen den Kupplungsköpfen und den Gurtstäben ist auf einer Unterlage geschweisst, die durch Abarbeiten des Kupplungskopfes bis auf den Innendurchmesser des Rohres geschaffen wurde. Eine nachträgliche Wurzelschweissung war hier nämlich unmöglich. Ebenso sind die Diagonalen mittelst einer 70°-Stumpfnäht an die

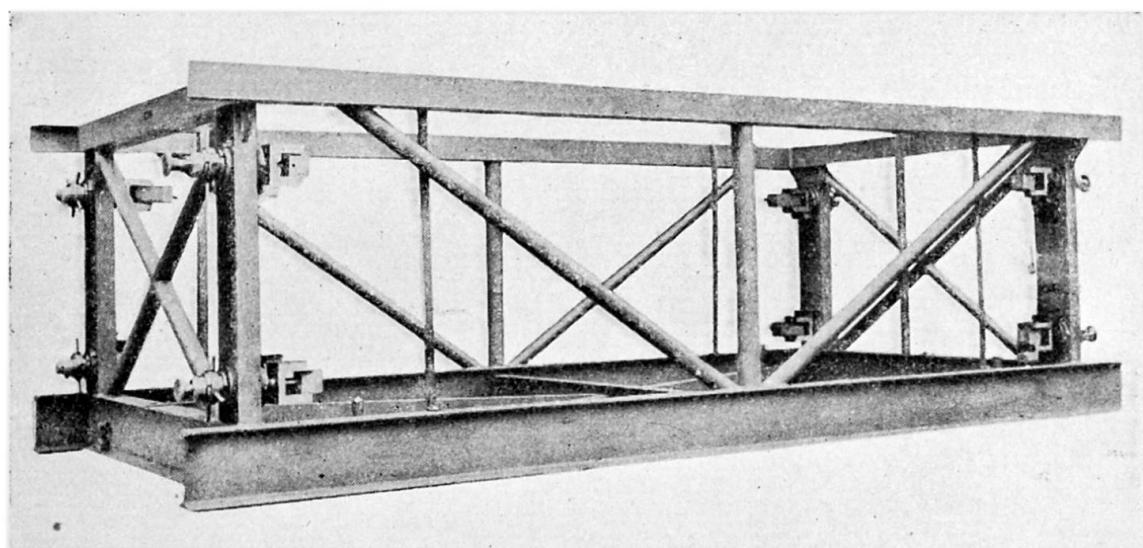


Abb. 21. Messvorrichtung zur Kontrolle der Toleranzforderung.

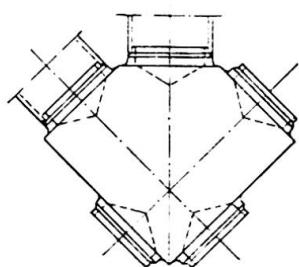


Abb. 22. Ausbildung des mittleren Knotenpunktes.

Knotenpunkte geschweisst (Abb. 22) Ihr anderes Ende, bei welchem die Schweißlänge grösser ist, ist dagegen mittelst einer Kehlnaht ($a=3,5$ mm) mit den Gurtstäben verbunden. Alle Diagonalen aus 22 mm-Rohren sind mit einer Kehlnaht ($a=2,5-3$ mm) angeschweisst. Schliesslich sei erwähnt, dass an jeden Obergurt drei Fahrbahnträger angeschweisst sind.

Der Werkstoff ist St. 52 mit folgender Zusammensetzung und Festigkeit :

Grundwerkstoff	Festigkeitsprobe			Zusammensetzung				
	Untere Streckgrenze	Bruchgrenze	Dehnung (10 D)	C	Mn	Si	P	S
	kg/mm ²	kg/mm ²	%	%	%	%	%	%
Rohrmaterial. . .	45,0	58,7	25,7	0,17	1,33	0,33	0,017	0,015
Kupplungsköpfe . .	36,0	53,8	22,9	0,15	1,28	0,34	0,022	0,016

Abb. 23 zeigt die Versuchsmontage einer Brücke von 36 m Spannweite.

Als Schlussbemerkung kann hervorgehoben werden, dass es sich als möglich erwiesen hat, Konstruktionen mit sehr engen Toleranzen von \pm einige Zehntelmillimeter zu schweissen und dass Arbeitsverfahren auch wirtschaftlich vorteilhaft ist, wenn eine genügende Anzahl Werkstücke vorliegt. Sich über die Dauerhaftigkeit der Schweißung auszusprechen, ist vielleicht noch zu früh, da die erwähnten Brücken erst wenige Jahre in Betrieb stehen. Er lässt sich jedoch sagen, dass man vom Gesichtspunkt der Herstellung aus keine Bedenken zu tragen braucht, Fachwerkkonstruk-

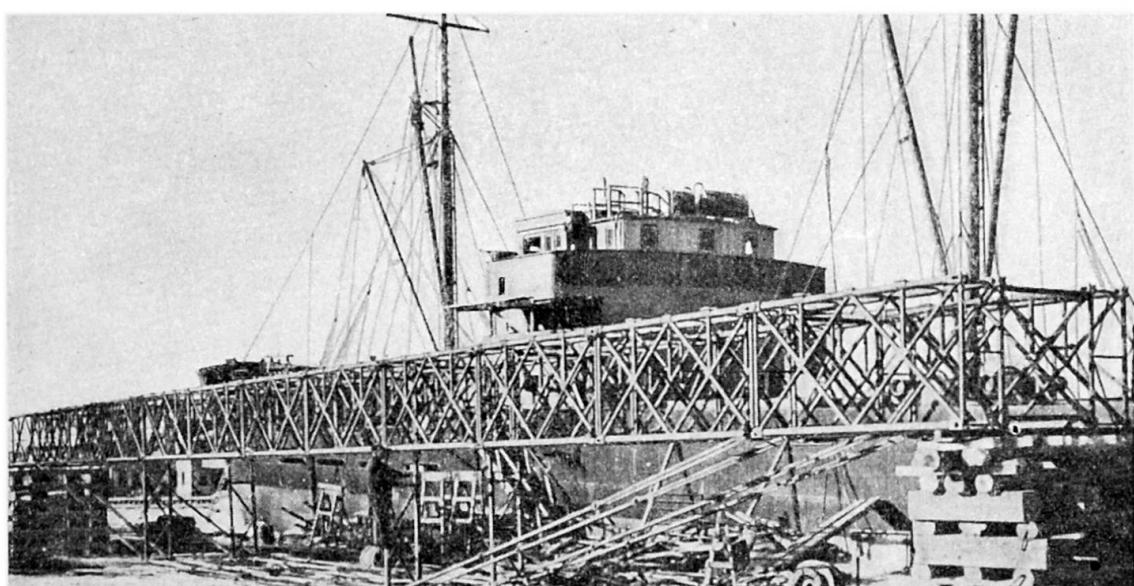


Abb. 23. Versuchsmontage einer Brücke von 36 m Spannweite.

Abb. 24. Hauptträger durch Schweißung entzweigeschnittener breitflanschige I-Profile und gewalzte Blechen zusammengefügt.

tionen aus St. 52 zu schweissen, vorausgesetzt dass die Wahl des Grundmaterials, der Elektroden und des Schweißverfahrens richtig getroffen wird. Wenn es sich zeigt, dass die Nähte während des Zeitraums einiger Jahre den sicherlich sehr hohen Beanspruchungen widerstehen können, denen sie im erwähnten Falle ausgesetzt sind, so würde dies auf die Möglichkeit hinweisen, dass das Schweißen dynamisch beanspruchter Fachwerkkonstruktionen in nicht allzu ferner Zeit zulässig sein wird — auch bei Verwendung von St. 52.

4. Provisorische Straßenbrücke in Stockholm

Um dem sich stets steigenden Verkehr in der schwedischen Hauptstadt zu entsprechen, hat man in Erwartung einer grösseren Stadtplanregelung in Jahre 1946 eine provisorische Straßenbrücke über den Stockholmer Strom gebaut. Dieser Verkehrsweg wurde als durchgehende Vollwandträgerbrücke mit 10 Zwischenpfeilern ausgeführt. Die Stützweiten betragen $10^m 40$ bis $13^m 12$. Die Träger sind aus entzweigeschnittenen breitflanschigen I-Profilen und gewalzten Blechen durch Stumpfschweißung zusammengefügt worden (Abb. 24). Das Interessanteste bei diesem Brückenbau ist eben diese Schweißung, da sie ohne vorheriges Abschrägen der 12 mm starken Stegbleche ausgeführt wurde. Dieses Verfahren wurde durch eine im Laboratorium der Elektriska Sverksningsaktiebolaget, Gotenburg, entwickelte Tiefeinbrandelektrode (OK Rapid) ermöglicht. Bei Verwendung dieses Elektrodentyps ist es auch möglich, 16 mm Bleche ohne vorheriges Abschrägen zusammenzufügen und zwar durch eine einzige Raupe von jeder Blechseite her. Abb. 25 zeigt eine durchschnittene und geätzte I-Schweißnaht in einem 16 mm-Blech.

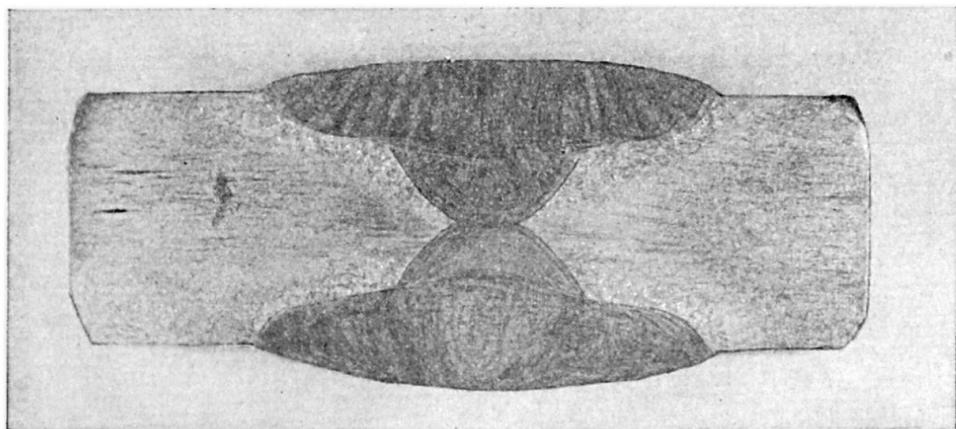
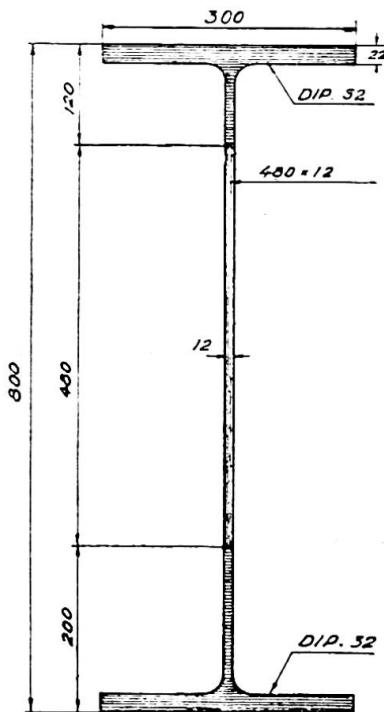


Abb. 25.
Makroschliff
einer
I - Schweiß-
naht in einem
16 mm Blech,
mit OK Rapid
geschweisst.

Diese Brücke war das erste grössere Bauwerk, wo der neue Elektroden-typ zur Verwendung kam. Eine umfassende Röntgenkontrolle war vorgeschrieben worden. Das Resultat dieser Kontrolle war sehr zufrieden-stellend, indem die durchschnittliche Note der Röntgenzeugnisse zwischen 4 und 5 lag. (Die Beurteilung geschieht nach einer fünfgradigen Skala, in welcher die Ziffer 5 den Höchstwert bezeichnet.)

Da die Bogenspannung bei der OK Rapid zweimal höher ist als bei gewöhnlichen Elektroden, wird der Energiebedarf der Schweißstelle der Zweifache, weshalb Scheissaggregate von sehr hoher Kapazität oder zwei parallelgeschaltete Aggregate gebräuchlicher Grösse erforderlich sind. Die OK Rapid ist von den verschiedenen Klassifizierungsgesellschaften für das Schweißen von Blechen bis zu 16 mm Stärke im Schiffbau geprüft und gutgeheissen worden.

Résumé

Le développement actuel de la technique de la soudure en Suède nous est présenté sous forme de rapports sur quelques ponts de construction récente.

En premier lieu, nous avons la description d'un pont-rails métallique sur un fleuve important et dont la superstructure (un arc raidi par des poutres continues à âme pleine) fut entièrement soudée. Des renseignements détaillés sont présentés sur les éléments de la construction, notamment l'exécution des soudures, ainsi que leur préparation en atelier et au chantier. Les mesures de dilatation faites pendant la soudure donnent des indications quant aux tensions subies par le matériau de base, tandis que les contrôles nombreux des cordons de soudure au moyen de rayons X permirent d'obtenir des appréciations concluantes quant à la qualité de la soudure.

Dans le deuxième exemple, un viaduc de chemin de fer courbe, ayant des poutres continues à âme pleine, l'auteur nous fournit des détails de constructions soudées, et donne le règlement pour le cintrage des tôles de semelles; il développe également la question des supports intermédiaires.

Quant aux nouveaux ponts suédois militaires, construits au moyen d'éléments en tubes d'acier entièrement soudés, il y a lieu de signaler les tolérances très restreintes atteintes pour la construction. Cet exemple de construction en treillis, en acier St 52, nous permet de conclure quant à l'économie de ce genre de construction; d'ici quelques années, on pourra juger de sa durabilité, compte tenu des sollicitations dynamiques.

Pour la construction d'un pont de route temporaire à Stockholm, cité en dernier lieu par l'auteur, on fit usage d'une nouvelle électrode à grande pénétration. Elle permet l'assemblage, sans préusinage, de tôles d'une épaisseur jusqu'à 16 mm.

Zusammenfassung

Der heutige Entwicklungsstand der Schweißtechnik in Schweden wird an Hand von Berichten über einige neueste Brückenkonstruktionen dargestellt.

Zuerst wird eine Eisenbahnbrücke über einen grösseren Fluss beschrieben, deren Stahlüberbau — ein verstieifter Stabbogen und durchlaufende Vollwandträger — vollständig geschweisst ausgeführt wurde. Eingehend sind die Elemente des Bauwerks, besonders aber die konstruktive Ausbildung der Schweißstellen und ihre Bearbeitung in der Werkstatt und auf dem Bauplatz dargestellt. Während dem Schweißen ausgeführte Dehnungsmessungen erlauben Hinweise auf die Spannungen in Trägermaterial und umfangreiche Kontrollen von Nähten mit Röntgenstrahlen ergaben sichere Aufschlüsse über die Güte der Schweißarbeiten.

An Hand des zweiten Beispiels, eines aus durchlaufenden, stetig gekrümmten Vollwandträgern bestehenden Eisenbahnviadukts werden neben Einzelheiten über geschweisste Konstruktionen eine Anordnung zum Krümmen von Gurtblechen und die Frage der Ausbildung der Zwischenstützen erläutert.

Bei den neuen schwedischen Kriegsbrücken mit vollständig geschweißten Elementen aus Stahlrohren sind die bei der Herstellung eingehaltenen ausserordentlich geringen Toleranzen bemerkenswert. Als geschweisste, in St. 52 ausgeführte Fachwerkkonstruktion erlaubt dieses Beispiel Schlüsse über die Wirtschaftlichkeit dieser Bauweise, deren Dauerhaftigkeit gegenüber dynamischen Beanspruchungen sich in einigen Jahren auch beurteilen lassen wird.

Beim Bau der zuletzt beschriebenen provisorischen Straßenbrücke in Stockholm kam eine neue Tiefbrandelektrode zur Verwendung, die das Zusammenfügen von Blechen bis zu 16 mm Stärke ohne vorheriges Abschrägen ermöglicht.

Summary

The present-day state of development of welding technique in Sweden is depicted by means of reports on some of the most recent bridge constructional work.

First we have a description of a railway bridge over a fair sized river, the steel superstructure of which — a stiffened tied arch and continuous plate girders — was entirely welded. The structural components, and in particular the constructive development of the welded spots and their preparation in the workshops and on the site of works, are described in detail. Recordings of expansion during welding provide pointers as to stresses in the material of the girders and extensive controls of seams by means of Röntgen rays provided reliable estimates as to good workmanship in the welding.

From the second example, a railway viaduct built of continuous curved plate girders, we have, in addition to details of welded structures, instructions for the bending of junction plates and the question of the development of intermediary supports.

In the case of the new war-time Swedish bridges, the steel tube elements of which are entirely welded, the extremely small tolerances which were adhered to in the construction are noteworthy. As an example of welded framework constructed in Steel St. 52, this bridge enables us to form

conclusions as to the economy of this type of construction, the durability of which in view of dynamic stresses we shall also be able to judge in a few years time.

For the construction of the lastly described temporary road bridge in Stockholm a new electrode with deep penetration was used. This enables the welding of plates up to 16 mm thickness to be done without pre-machining.

Ia5

L'emploi de la soudure dans la reconstruction du pont d'Oissel sur la Seine

Die Anwendung der Schweißtechnik bei der Wiederherstellung der Oissel-Brücke über die Seine

Welding applied to the Reconstruction of the Oissel Bridge over the Seine

R. VALLETTE & A. GOELZER
Paris

Etat de l'ouvrage et recherche d'une solution

La réfection du pont en fer d'Oissel de la S. N. C. F. (région Ouest) sur la ligne Paris-Le Havre se présentait d'une manière tout à fait particulière. Les figures 1 et 2 donnent une idée exacte de l'état dans lequel se trouvait le viaduc d'Oissel après la Libération. L'ouvrage ne s'était pas effondré, mais il présentait de grosses et nombreuses déteriorations dispersées, et en particulier, dans certaines zones, de véritables brèches dans le tablier.

Grâce aux mesures prises par la S. N. C. F., l'ouvrage fut consolidé en temps utile : des palées en bois furent battues dans le lit de la Seine pour créer de nouveaux appuis dans le voisinage des brèches du tablier et pour permettre l'exécution des réparations ultérieures dans de bonnes conditions.

La réfection par rivure, obligeant à rechercher les joints normaux d'assemblage, aurait conduit à remplacer des tronçons successifs importants et finalement des parties complètes du pont. Or, il y avait intérêt à limiter les remplacements, tant par suite de la pénurie d'acier que pour permettre de constituer le passage en situation provisoire, en utilisant la plus grande partie de l'ouvrage.

La Société d'Etudes pour la Construction et la Réparation des ouvrages métalliques (S. E. C. R. O. M.) ayant offert, au début de la Reconstruction, d'étudier des solutions soudées dans des cas semblables, un échange de vue eut lieu entre les Services Techniques de la S. N. C. F. et cette Société. Ces solutions permettaient, en l'espèce, de limiter le remplacement à des

éléments réduits et même, souvent, aux seules pièces avariées sans désorganiser la partie porteuse du pont provisoire.

Adoption d'une réparation par soudure

Si les Services techniques de la S. N. C. F. n'avaient pas eu de bases particulières, une telle application n'aurait pu être admise ni même envisagée. Elle serait en effet condamnée, dans l'état actuel de la technique, par les prescriptions concernant la soudure.

Les travaux étaient, en effet, à exécuter entièrement sur chantier et sur métal non ductile, le fer puddlé des vieux ponts français ayant, en moyenne, un allongement de 11 % dans le sens du laminage et nul en travers⁽¹⁾. Le métal est feuilletté et les feuillets se détachent facilement.

Il faut noter également que cet ouvrage en fer puddlé est important, qu'il donne passage à une ligne à grand trafic et que les destructions étaient notables, comme nous l'avons précisé plus haut; la prudence s'imposait.

La S. N. C. F. avait acquis l'expérience de ces sortes de travaux (qui avaient également eu des applications pour des pont-routes) entre autres :

1^o Essais systématiques faits en 1933 par la S. N. C. F. sur des soudures effectuées sur des poutres à caisson de petits tabliers en fer puddlé, soudures qui sollicitaient le fer en travers du laminage;

2^o Application de telles soudures faite à 25 petits tabliers de la ligne de Chartres à Bordeaux;

3^o Renforcement par la S. N. C. F. de ponts en fer par addition d'éléments soudés. Pont de l'Authion — Pont de Bezons — Ponts sur l'Ill à Strasbourg⁽²⁾;



Fig. 1. Vue d'enfilade du pont d'Oissel après sa destruction.

(1) R. VALLETTE, *Etude sur les vieux tabliers en fer du réseau de l'Etat français*. 1936. (4^e volume des Mémoires de l'Association Internationale des Ponts et Charpentes.)

(2) H. LANG, *Renforcement de tabliers métalliques à proximité de Strasbourg* (*Science et Industrie*, 1937).

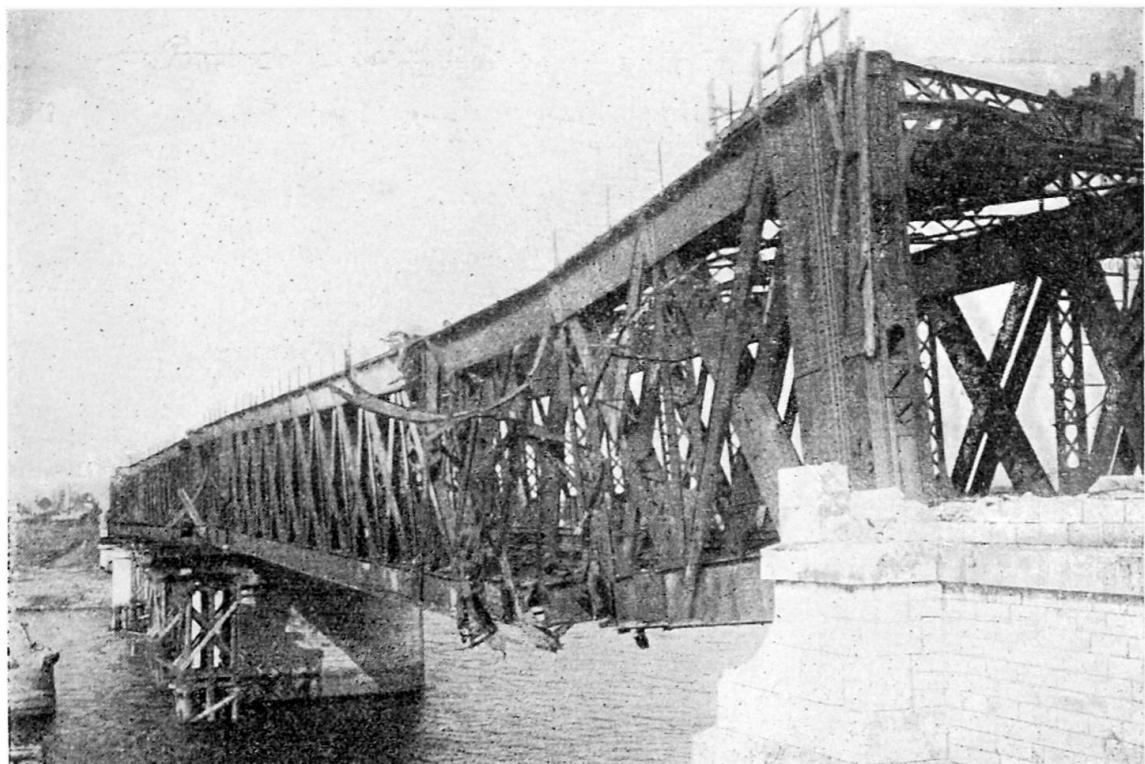


Fig. 2. Pont d'Oissel après destruction (octobre 1944).

4° Renforcement du pont tournant de Brest sur la Penfeld par le Service des Ponts et Chaussées du Finistère ⁽³⁾.

La constante réussite de ces applications, après mise au point de la technique de la soudure acier sur fer puddlé par des spécialistes sur chaque cas d'espèce, apportait un élément de confiance.

C'est dans ces conditions que la réparation par soudure du pont d'Oissel fut décidée, sous réserve d'une mise au point par la Soudure Auto-gène Française, chargée des travaux de soudure, et par la S. E. C. R. O. M.

Les Services techniques intéressés de la S. N. C. F. avaient défini les conditions à observer dans la conduite des études pour obtenir le maximum de sécurité. En particulier, il fut prescrit d'employer des soudures à libre dilatation; c'est pourquoi l'attache des tronçons de membrures a été étudiée par soudure à une des extrémités d'un tronçon et par rivure à l'autre extrémité, afin d'être certain d'éviter tout effet d'un retrait possible de la soudure. De plus, pour les joints soudés bout-à-bout, on s'attacha à décaler les joints d'âme et de semelles.

Le Service du contrôle de la S. N. C. F. définit aussi avec précision la conduite de l'exécution, qui consistait d'abord dans l'interprétation des résultats du pliage sur éprouvettes soudées, ensuite dans les modalités de la surveillance des travaux, les épreuves des soudeurs, etc. D'ailleurs, nous noterons que le test de pliage, caractéristique en l'espèce, sert actuellement de base à l'Ecole de soudure de la S. N. C. F., sous une forme sensible,

⁽³⁾ A. GOELZER, *Renforcement de Ponts métalliques par soudure à l'arc électrique*, 1936.
(4^e Vol. des Mémoires de l'Association Internationale des Ponts et Charpentes.)

M. LEBRUN et A. GOELZER, *Application de la soudure auto-gène au renforcement des ponts métalliques*, 1941. (Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France.)

mise au point par la Direction de cette Ecole, à la qualification des soudeurs et à leur classement suivant le diamètre de fissuration.

Nous allons maintenant parler de la soudure acier sur fer puddlé, qui est l'objet principal de cette communication, et qui a été étudiée minutieusement en fonction de la nature du métal du viaduc d'Oissel.

Examen du métal de base sur éprouvettes prélevées dans le métal de l'ouvrage

Le métal de base est du fer puddlé à structure lamellaire. Ce métal se compose, en effet, de lamelles de fer pur entre lesquelles des scories se trouvent réparties plus ou moins irrégulièrement.

Il n'est pas inutile, à ce sujet, de rappeler quel était le mode de fabrication du fer puddlé. Le fer était fabriqué dans des fours à puddler ou des foyers d'affinage par décarburation de la fonte à une température inférieure à la température de fusion du fer. La plus grande partie des corps étrangers était oxydée avec une certaine quantité de fer et formait la scorie fondue. Cette scorie était expulsée par cinglage de la loupe de métal pâteux, épurée par martelage ou compression. Dans cette fabrication, le fer retenait une petite partie du carbone et il contenait, de plus, une fraction des éléments étrangers de la fonte : silicium, manganèse, soufre, phosphore.

Voici des indications qui étaient données à l'époque concernant la composition et la résistance de trois qualités de fer puddlé :

Qualité	Composition					Qualités mécaniques					
	C	Si	Mn	S	P	Tôles : 5 à 20 mm				Profils	
						Sens	Limité d'élasticité	Limité de rupture	Allongement de rupture	Limité de rupture	Allongement de rupture
Commun n°2	0,08	0,21	0,08	0,04	0,30	Long	20	32	6	—	—
Ordin. n°3	0,08	0,20	0,09	0,026	0,22	Travers	17	29	3,5	34	8
Ordin. n°3	0,08	0,20	0,09	0,026	0,22	Long	21	33	9	—	—
Fort n°4	0,11	0,20	0,10	0,015	0,16	Travers	18	30	5	35	12
Fort n°4	0,11	0,20	0,10	0,015	0,16	Long	21,5	33,5	13	—	—
Fort n°4	0,11	0,20	0,10	0,015	0,16	Travers	19	31	8	36	15

Tableau extrait de RESAL, *Résistance des Matériaux*, 1898.

Il est important, dans chaque cas, de procéder à des analyses chimiques sur divers prélèvements pour avoir une idée de la qualité générale du métal de base et sur son degré d'homogénéité. L'analyse avait donné les résultats suivants :

C : 0,048 % — Si : 0,18 % — Mn : 0,08 % — P : 0,38 % — S : 0,04 %

On remarque la teneur élevée en phosphore très supérieure à celle des aciers courants.

Il faut cependant noter que le phosphore ne se trouve pas réparti uniformément dans la masse, mais concentré dans les scories interposées

entre les lamelles de fer pur. Ce fait explique les résultats satisfaisants que nous avons généralement obtenus pour la soudure sur fer puddlé, le fer pur se soudant parfaitement bien.

Comme nous allons le voir, la difficulté ne vient donc pas de la composition chimique, mais bien de la structure lamellaire.

Comme nous l'avons dit, l'expérience acquise dans de nombreux travaux précédents a montré que l'essai caractéristique donnant une garantie certaine est l'essai de pliage. Ce fait est naturel, puisque cet essai permet de mettre en évidence le plus ou moins bon accrochage de la soudure sur les lamelles de fer.

Préparation des éprouvettes

La figure ci-contre indique la préparation qui comportait le chanfreinage à 35° sur deux plats, l'un en acier, l'autre en fer puddlé, de longueur 120 mm, largeur 40 mm et épaisseur 10 mm. Les essais ont été faits en courant alternatif (poste type Cirkal) avec des électrodes C. 40 et L. 40.

Le principe général du mode opératoire pour les soudures d'acier en fer puddlé a été déjà indiqué par M. Lebrun dans un mémoire de la Société des Ingénieurs Civils en 1941. Rappelons que « l'alliage du fer puddlé et de la soudure est relativement fragile au refroidissement entre 600° et 400° C.

» Le fer puddlé avoisinant cet alliage passe, dans cette période de refroidissement, de l'état lamellaire à l'état nodulaire et devient ainsi fragile.

» Cependant, il ne se produit pas d'arrachement des lamelles quand la tension de retrait du cordon de soudure s'exerce dans le sens des lamelles du fer. »

C'est pourquoi le principe de l'opération est le suivant : on procède à un rechargeage préalable sur une longueur de 20 mm environ à la surface du fer contre le chanfrein. Le cordon de soudure ne s'effectue qu'après refroidissement complet de ce premier dépôt de métal : on se trouve alors dans les meilleures conditions possibles. En effet, le rechargeage protège le fer sous-jacent et l'empêche d'atteindre la température critique; de plus, la soudure exerce une grande partie de son retrait sur la première couche déposée dans le sens des lamelles.

Ces principes étant posés, il n'est pas possible de donner, pour le détail, des règles générales. Nous allons exposer exactement, à titre d'exemple précis, ce qui s'est passé pour les essais du viaduc d'Oissel.

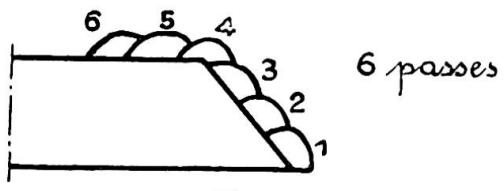


Fig. 4.

Premiers essais préliminaires

Dans les premiers essais, le rechargeage a été exécuté complètement par

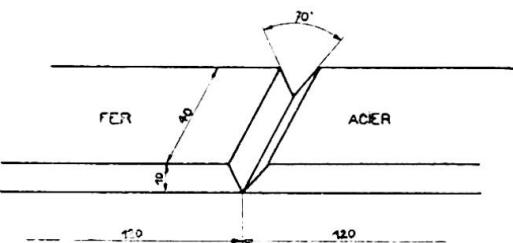


Fig. 3. Forme et dimensions de l'éprouvette de pliage.

passes transversales alternativement de gauche à droite et de droite à gauche suivant la figure 4.

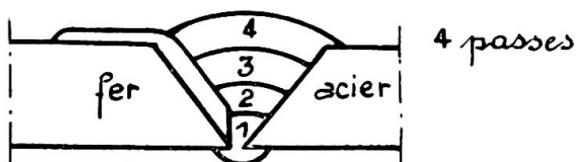


Fig. 5.

Chaque passe chevauchait la précédente, elle était piquée et brossée soigneusement avant l'exécution de la suivante.

Le joint entre la partie fer ainsi préparée et la partie acier était réalisé par 4 passes larges superposées (fig. 5).

On exécutait enfin une reprise à l'envers R.

Le détail des opérations et les résultats des essais de pliage sont consignés dans le tableau suivant :

Type d'électrodes	Diamètres des Electrodes	Passes	Intensité du courant de soudure	Résultat des essais de pliage
C.40	3,25	1 à 6	110 A	{ Angle de pliage : 30° Cassure dans la soudure-éprouvette C ¹ effort : 2 300 kg
	3,25	1 à 4	110 A	{ Angle de pliage : 47° Cassure de la jonction côté fer — éprouvette C ²
L. 40	3,25	1 à 6	110 A	{ Angle de pliage : 30° Cassure à la jonction côté fer — Eff. 2 000 kg
	3,25	1	120 A	
	3,25	2 à 4	110 A	

Or, les essais de pliage sur éprouvettes non soudées donnent un angle de 30° avant l'apparition des premières criques.

Au pont de Brest, également en fer puddlé, dont le renforcement a été effectué de 1934 à 1936, les essais de pliage sur éprouvettes soudées acier sur fer avaient donné 31° et 41°. Malgré ces résultats, la soudure avait donné toute satisfaction aux essais et en service. A la Libération, le pont a été détruit et on a pu constater, lors du relevage des tronçons de poutres tombés dans la Penfeld, que les soudures d'attache des fers de renforcement avaient parfaitement tenu.

Au viaduc d'Oissel, on a cherché à améliorer les essais de pliage et on y est parvenu de la manière suivante :

Deuxièmes essais préliminaires

Après divers tâtonnements, on a finalement opéré ainsi qu'il suit :

1° Comme dans les premiers essais, on a exécuté 3 passes transversales se chevauchant (fig. 6). Mais le glacis supérieur sur la partie fer

a été réalisé par un mouvement de va-et-vient de l'électrode dans le sens longitudinal.

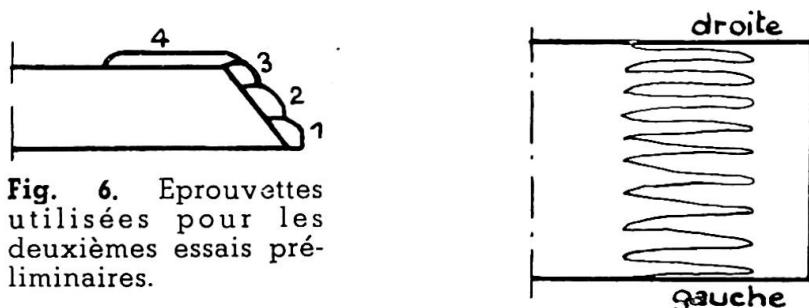


Fig. 6. Eprouvettes utilisées pour les deuxièmes essais préliminaires.

Le dépôt ainsi obtenu évite toute amorce de cisaillement transversal sur la première couche de fer;

2° On a laissé refroidir les passes 1, 2, 3, 4 sur le fer pendant un quart d'heure;

3° La soudure de la partie fer sur la partie acier a été exécutée comme dans les premiers essais, par des passes larges superposées.

Le métal remplissant le chanfrein ainsi obtenu est un métal affiné à grain fin dans les passes 1, 2, 3; il offre une grande ductilité, est très sain, et les tensions résiduelles sont faibles, ce qui est important pour des réparations de pièces existantes souvent bridées.

Naturellement, chaque passe de soudure était soigneusement piquée et brossée avant l'exécution de la passe suivante.

Le tableau suivant indique les résultats obtenus avec quelques variantes :

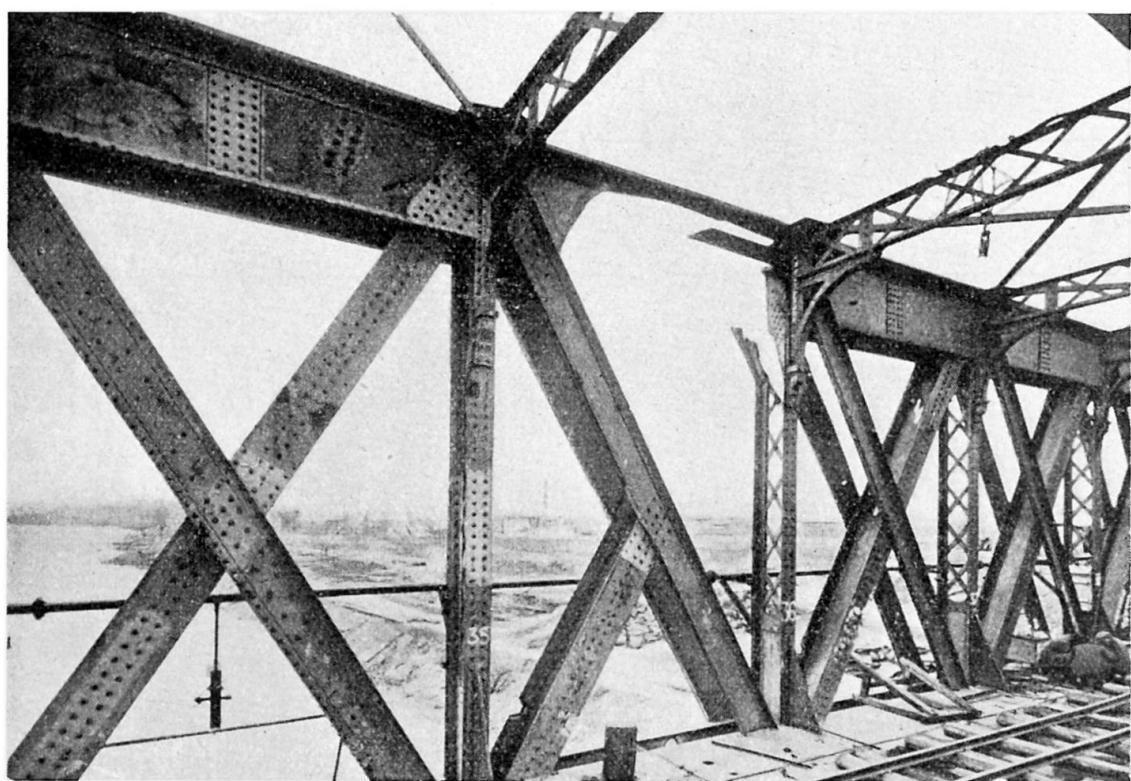


Fig. 7. Etat du panneau comportant les montants 35 et 36 avant réparation.

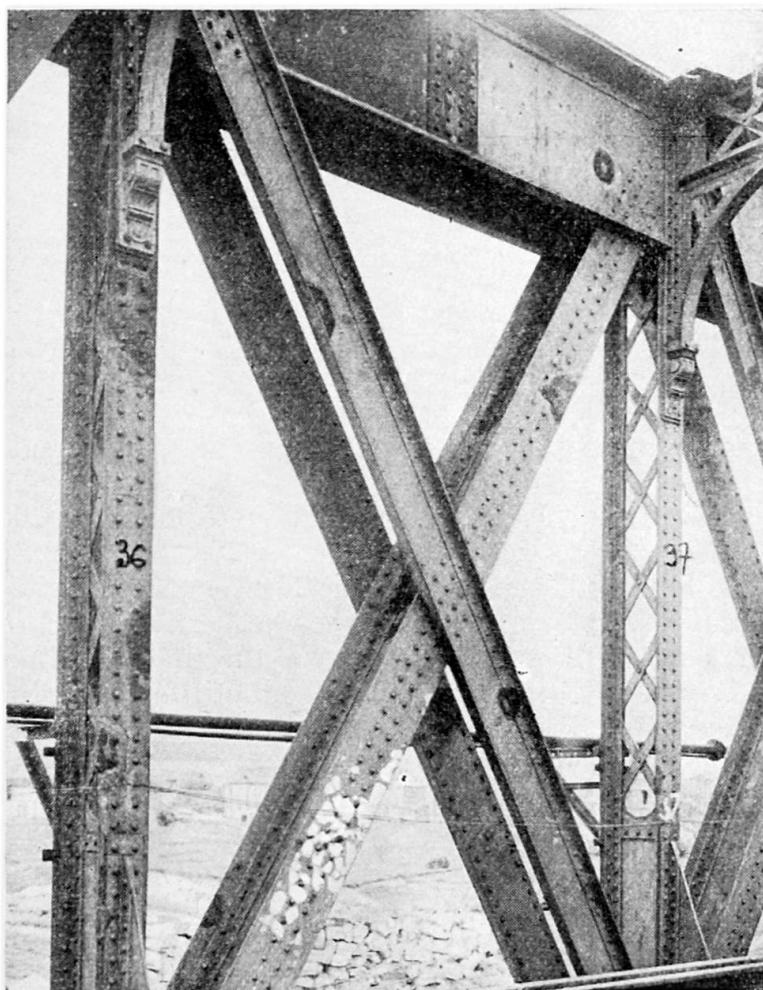


Fig. 8. Vue du panneau comportant les montants 36 et 37.

Types d'électrodes	Diamètres des électrodes	Passes	Intensité indiquée au poste	Intensité moyenne à la pièce	Résultats des essais de pliage
C. 40	3,25	1 de g. à dr. 2 de dr. à g. 3 de dr. à g. 4 de dr. à g.	110 110 110 110	95 95 95 95	Angle de pliage: 57° Cassure dans la soudure Eff. 2 250 kg
C. 40	3,25 4 4 3,25	1 2 3 4	120 160 160 140 130	100 145 145 130 115	Angle de pliage: 78° Cassure dans la soudure Eff. 3 200 kg
I.. 40		1 de g. à dr. 2 de dr. à g. 3 de dr. à g. 4 de dr. à g.	115 115 115 45	95-100 95-100 95-100 95-100	Angle de pliage: 76° Cassure dans la soudure Eff. 2 600 kg

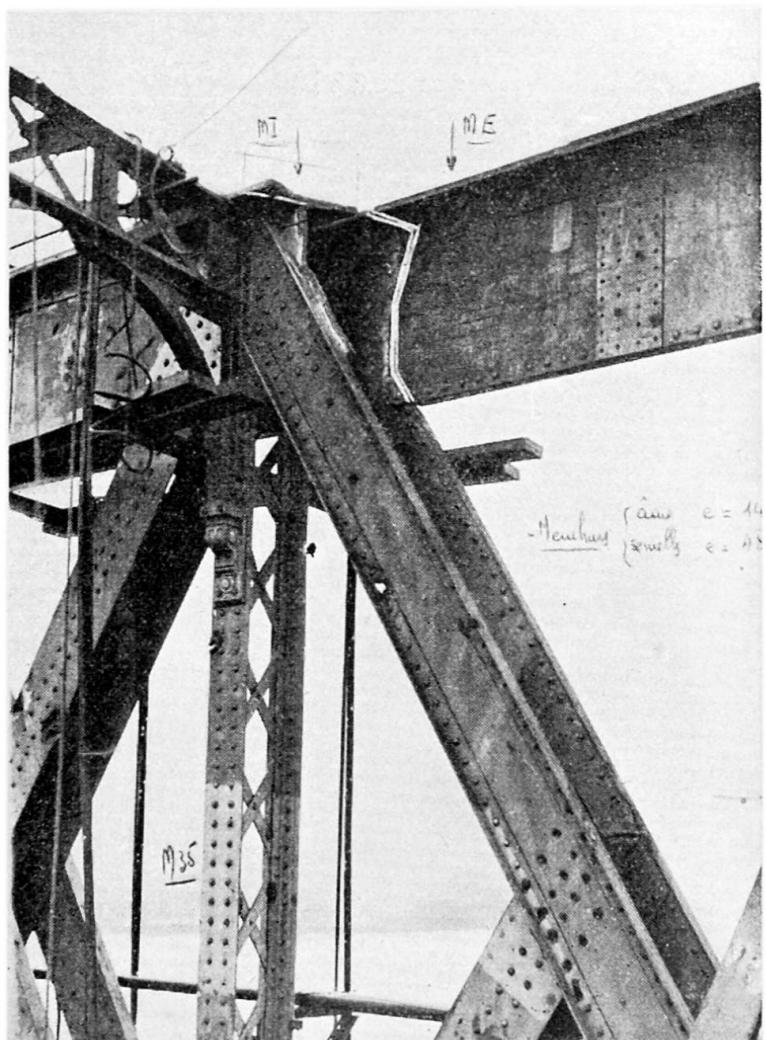


Fig. 9. Membrure supérieure du panneau 35-36 en cours de réparation.

Conclusion

On voit que, dans la deuxième série d'essais préliminaires, l'angle de pliage a atteint des valeurs très satisfaisantes 57° , 76° et 78° , nettement supérieures à celles qui avaient été obtenues jusqu'à maintenant. Il a donc été décidé d'adopter le mode opératoire suivi lors de ces essais. Le contrôle a été très strict, afin d'obtenir que les soudeurs suivent exactement les règles indiquées.

Enfin, conformément aux instructions sur la soudure, les soudeurs ont passé des examens d'agrément et de temps en temps des épreuves destinées à montrer que leur qualité restait constante.

Il ne faut d'ailleurs pas se dissimuler que de tels travaux nécessitent l'emploi d'un personnel très exercé, aussi bien en ce qui concerne les ingénieurs dirigeant le travail que du côté des soudeurs eux-mêmes. On a heureusement pu, pour ce chantier, disposer d'une équipe de soudeurs rompus à toutes sortes de travaux délicats et variés, susceptibles de s'adapter rapidement aux règles spéciales imposées.

Il serait sans intérêt de décrire en détail toutes les nombreuses réparations effectuées. Nous nous contenterons de décrire les deux sortes de réparations-types les plus importantes.

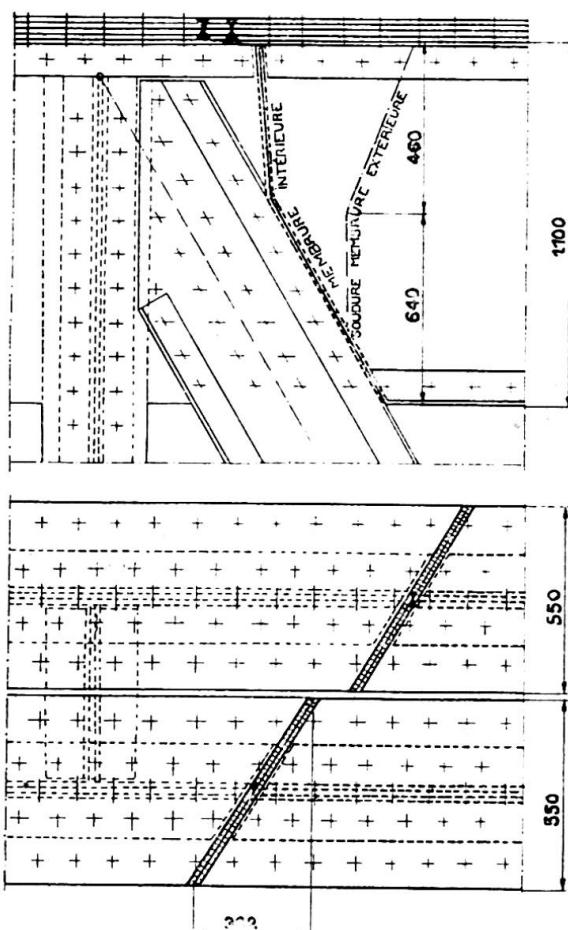


Fig. 10. Extrémité supérieure du montant 35.



Fig. 11. Coupe des cordons de soudure pour l'âme dans la partie courante.

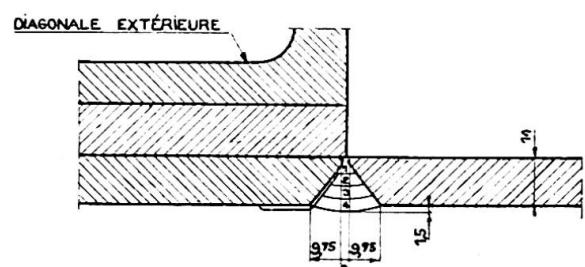


Fig. 12. Coupe des cordons de soudure de la partie contre la diagonale tendue.

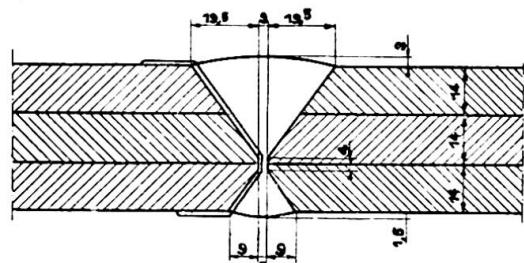


Fig. 13. Coupe des cordons de soudure de la partie au droit des cornières.

Etude des réparations-types

Nous avons choisi une zone de la poutre amont côté Rouen entre les montants 35 et 36. On voit, sur la figure 7, l'état de ce panneau avant réparation.

La poutre principale comporte deux demi-poutres extérieure et intérieure jumelées, les membrures formant ainsi caisson ouvert. Les diagonales tendues sont doubles et les diagonales comprimées à âme pleine passent entre les deux demi-diagonales tendues.

Les travaux à effectuer comprennent :

1° La reconstruction du tronçon de membrure supérieure, entre les montants 35-36;

2° Le remplacement complet de la portion supérieure de diagonale comprimée (ext. et int.) entre la base du montant 35 et le sommet du montant 36;

3° Les deux demi-diagonales partant du sommet du montant 35 étaient conservées, mais à redresser après dérivelage et démontage.

Enfin, dans le panneau voisin 36-37 (fig. 8), la partie extérieure de la diagonale tendue partant du sommet du montant 36 était à remplacer, la partie intérieure était conservée.

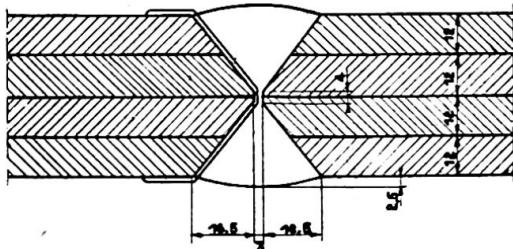


Fig. 14. Coupe des cordons de soudure pour les semelles, dans la partie courante.

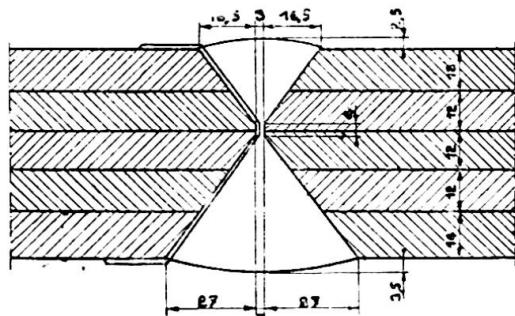


Fig. 15. Coupe des cordons de soudure pour les semelles à travers les cornières.

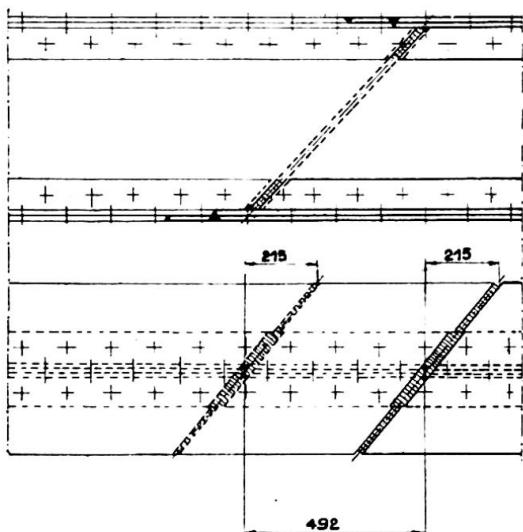


Fig. 16 (à gauche). Joint d'aboutement avec la partie inférieure.

Membrure supérieure. — Le joint de droite du tronçon neuf rivé a été effectué par rivure dans le panneau 36-37, comme on le voit sur la figure 8.

Joint soudé. — La figure 9 montre ce joint en cours d'exécution, la soudure étant déjà exécutée sur la demi-membrure extérieure. On aperçoit la préparation du joint de la demi-membrure intérieure; les joints d'âme se trouvent décalés par rapport aux joints de semelles. Les tracés de ces divers joints ont été minutieusement étudiés, suivant les possibilités, dictées notamment par la position des rivets.

Pour ne pas laisser l'exécution livrée au hasard, il a été nécessaire de représenter les joints avec beaucoup de détails en raison des variations d'épaisseur entre des âmes, cornières et semelles, et des difficultés d'exécution des soudures acier sur fer puddlé.

La figure 10 représente l'ensemble du joint soudé; les soudures d'âme et de semelles sont obliques, afin d'avoir le maximum de sécurité dans le cas du fer puddlé. Les figures 11, 12 et 13 indiquent respectivement la coupe exacte des cordons de soudure pour l'âme dans la partie courante, la partie contre diagonale tendue, la partie au droit des cornières.

Les figures 14 et 15 donnent la coupe des cordons de soudure pour les semelles, dans la partie courante et à travers les cornières.

Diagonale comprimée. — Par suite de l'état de cette pièce, on l'a coupée en dessous de son croisement avec la diagonale tendue, après déri-

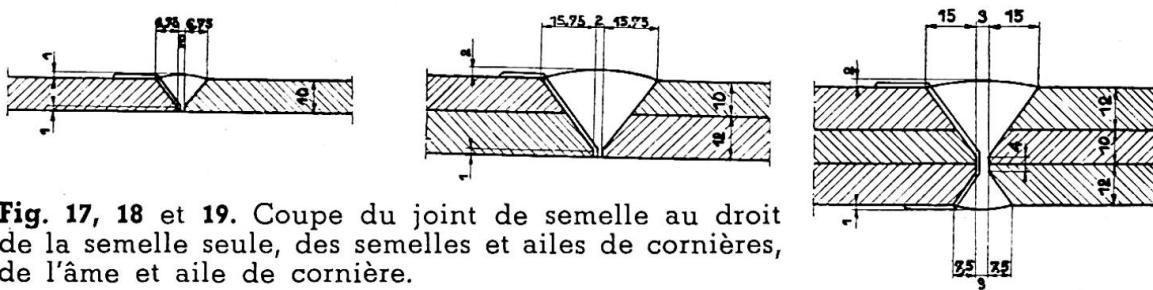


Fig. 17, 18 et 19. Coupe du joint de semelle au droit de la semelle seule, des semelles et ailes de cornières, de l'âme et aile de cornière.

vetage du nœud de croisement (fig. 7). La portion nouvelle a été rivée à nouveau au nœud supérieur du montant 36 sur membrure et le nœud de croisement a été reconstitué également par rivure. Seul, le joint d'aboulement avec la partie inférieure a été soudé conformément à la figure 16.

Les figures 17 et 18 indiquent la coupe du joint de semelle au droit de la semelle seule et au droit des semelles et ailes de cornières. Sur la figure 19, on voit la coupe du joint au droit de l'âme et aile de cornière.

Résultats et conclusions

Toutes les réparations ont pu être effectuées sans incidents, grâce aux dispositions minutieuses prises suivant le programme établi par la S. N. C. F. en accord avec la Société de Commentry-Oissel, qui procédait à la reconstitution de toutes les pièces rivées à remplacer et avec la Soudure Autogène Française qui exécutait les joints soudés ainsi que les diverses réparations locales, telles que : trous à boucher, redressage de pièces, etc.

Les essais officiels du pont ont été effectués le 15 juin 1947 et ont donné toute satisfaction. Sur la figure 20, on voit les deux trains d'épreuve marchant de front et en vitesse pour réaliser le cas de surcharge le plus défavorable.

Résumé

La présente communication a pour but de donner des détails précis sur la technique particulière de la soudure à l'arc électrique appliquée à la réparation d'un grand pont sous voie ferrée en fer puddlé.

L'emploi, même limité, de la soudure permet de réduire les opérations de démontage. La soudure acier sur fer puddlé nécessite, dans chaque cas, des études préliminaires pour fixer au mieux le mode opératoire.

Pendant le cours du travail, un contrôle permanent doit être organisé pour que l'exécution des soudures ne s'écarte pas des règles ainsi déterminées préalablement.

L'établissement des dessins d'exécution demande un soin tout particulier par suite des joints spéciaux acier sur fer puddlé et de la présence de pièces constitutives rivées d'épaisseurs diverses.

Deux joints-types sont décrits en détail; l'un, sur la membrure supérieure, l'autre sur une diagonale comprimée.

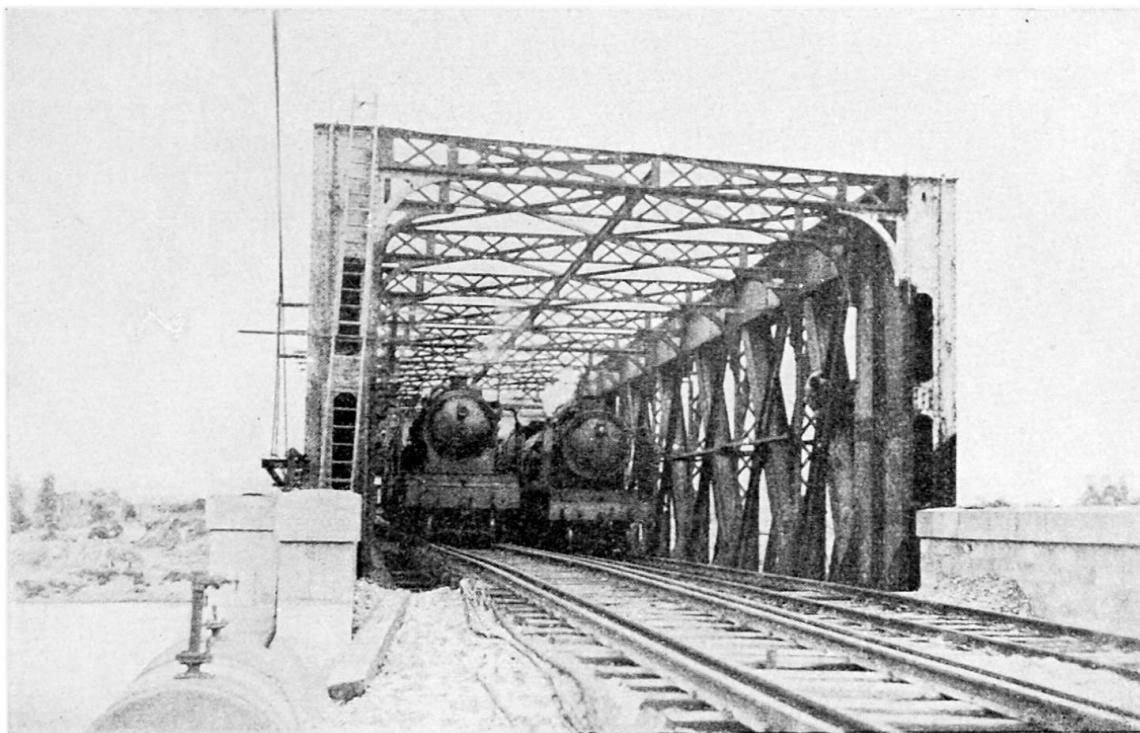


Fig. 20. Essais de mise en charge du pont d'Oissel, après sa remise en état.

Zusammenfassung

Der vorliegende Aufsatz vermittelt genaue Einzelheiten über die besondere Anwendungsweise der Lichtbogenschweissung, die sich bei der Wiederherstellung einer grossen Eisenbahnbrücke aus Schweißeisen ergab.

Die, wenn auch begrenzte Verwendung der Schweissung erlaubte die Einschränkung der Abbruch-Arbeiten. Die Verbindung Stahl mit Schweißeisen machte in jedem einzelnen Falle Voruntersuchungen zur Festlegung des günstigsten Schweissvorganges nötig. Damit die fertigen Schweissnähte den so vorgängig ermittelten Ausbildungsformen entsprachen, war während ihrer Ausführung eine ständige Kontrolle anzuordnen. Die Herstellung der Ausführungszeichnungen verlangte aussergewöhnliche Sorgfalt wegen der besonderen Nähte zwischen Stahl und Schweißeisen und den vorhandenen genieteten Bauteilen verschiedener Stärke.

Zwei Naht-Ausbildungen sind ausführlich beschrieben: die eine im Obergurt, die andere in einer Druck-Diagonalen.

Summary

The present paper gives precise details of the particular method of using arc welding for repairing a large puddled iron railway bridge.

Even a restricted use of welding simplifies the dismantling work. The combining of steel with puddled iron necessitated in each particular instance tests beforehand to ascertain the most suitable method of welding.

In order that the seams should correspond to the constructional details thus pre-ascertained, permanent inspection was necessary during the work. The preparing of the execution-plans required exceptional care on account of the particular seams between steel and puddled iron and the presence of individual riveted constructive elements of varying strength.

Two types of seams are described in detail : one in the upper boom, the other in a diagonal strut.