

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

Band: 2 (1936)

Rubrik: IIIa. Influence des actions dynamiques sur les constructions soudées
(études expérimentales et résultats pratiques)

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 24.01.2026

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

III

Questions pratiques concernant les constructions soudées.

Praktische Fragen bei geschweißten Stahlkonstruktionen.

Practical questions in connection with welded steel structures.

III a

Influence des actions dynamiques sur les constructions soudées
(études expérimentales et résultats pratiques).

Einfluß dynamischer und häufig wechselnder Lastwirkungen
auf geschweißte Konstruktionen
(Versuchsforschungen und Auswirkung auf die praktische Ausführung).

Influence of dynamic and frequently alternating loading on welded structures
(Research work and its practical application).

Leere Seite
Blank page
Page vide

III a 1

Influence des variations de charge répétées sur les constructions soudées.

Einfluß häufig wechselnder Belastungen auf geschweißte Bauwerke.

The Influence of Frequently Alternating Loading on Welded Structures.

Dr. Ing. O. Kommerell,

Direktor bei der Reichsbahn, im Reichsbahnzentralamt, Berlin.

A. — Introduction.

A l'occasion du Premier Congrès de Paris, en 1932, j'avais eu l'honneur de rapporter sur le sujet suivant¹:

« Calcul et Construction des Charpentes Métalliques Soudées ».

J'avais ainsi exposé les conditions dans lesquelles avait évolué cette question en Allemagne. Les méthodes de calcul ne pouvaient alors s'appuyer que sur des essais purement statiques. Dans mon résumé, je disais ceci:

« Les essais ont montré que les méthodes de calcul mentionnées dans les Règlements Allemands confèrent une sécurité suffisante vis-à-vis des contraintes *statiques*. Des essais ultérieurs devront être poursuivis pour déterminer si la sécurité obtenue est suffisante lorsqu'il s'agit d'effort *dynamiques*. »

On concevait donc nettement, dès cette époque, que seuls des *essais systématiques de résistance à la fatigue*, effectués à l'aide de machines génératrices d'oscillations, ou « pulsateurs », et en employant des « ponts oscillants », pouvaient jeter la lumière sur cette question, encore entièrement obscure. Un comité spécialement constitué, sous la direction du Directeur des Chemins de Fer, Conseiller Privé, Dr. Ing. Schaper, se chargea de l'exécution de ces essais, au prix d'une dépense de l'ordre de 50.000 RM. et put les terminer en 1934.²

J'ai d'ailleurs étudié ces essais d'une manière approfondie, dans le troisième Volume des « Mémoires », sous le titre: „Die Auswertung von Dauerfestigkeits-

¹ Voir la « Publication Préliminaire » à ce Congrès.

² „Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen“, Berlin 1935, V.D.I.-Verlag — et Kommerell: „Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten, mit Beispielen für die Berechnung und bauliche Durchbildung“, 1^{ère} Partie: „Hochbauten“, Berlin 1934 — 2^{ème} Partie: „Vollwandige geschweißte Eisenbahnbrücken“, Berlin 1935, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn.

versuchen mit geschweißten Verbindungen“. A la page 263 de mon Rapport dans le troisième volume des «Mémoires», j'attirais déjà l'attention sur le fait que les conclusions de la réunion de Friedrichshafen comportaient en particulier une majoration des contraintes admissibles dans les assemblages soudés. Les formules de calcul des Règlements définitifs furent également quelque peu modifiées. En ce qui concerne l'interprétation des résultats des essais, je pourrai me contenter des indications publiées dans le troisième volume des «Mémoires»; j'estime par contre qu'il convient de revenir à nouveau, pour les exposer dans leur ensemble, sur les résultats de ces essais eux-mêmes et de montrer quelles conclusions ont pu en être tirées, pour l'établissement des Règlements définitifs.

Les renvois aux figures et tableaux des «Règlements Allemands concernant les Ponts de Chemins de Fer à poutres pleines soudées» sont accompagnés de la lettre «V».

B. — Notions générales.

Les essais de résistance à la fatigue ont pour but la détermination de la résistance d'une barre à l'action de charges fréquemment appliquées. Nous désignerons par :

- σ_u la contrainte inférieure (contrainte préliminaire),
- σ_o la contrainte supérieure (contrainte limite pour $n \cdot 10^6$ oscillations),
- + la traction,
- la compression.

Si σ_u et σ_o portent le même signe, nous dirons que la charge est *oscillante*; si σ_u et σ_o sont de signes contraires, nous dirons que la charge est *alternée*. Si nous voulons définir en particulier une traction, nous ajouterons l'indice «z»; s'il s'agit d'une compression, nous ajouterons l'indice «d». Par exemple :

- σ_{oz} désignera la limite supérieure de l'effort de traction,
- σ_{ud} désignera la limite inférieure de l'effort de compression.

La représentation symbolique de Weyrauch³ qui permet de représenter clairement les conditions de charge, a été adoptée d'une manière générale en Allemagne.

Sur l'axe des abscisses, on porte la tension inférieure σ_u . Si l'on fait passer par l'origine des coordonnées des droites inclinées à 45°, l'ordonnée du point A par exemple est elle aussi égale à la contrainte inférieure σ_u . Les ordonnées sont portées vers le haut lorsqu'il s'agit d'une traction (+) et vers le bas lorsqu'il s'agit d'une compression (—). L'ordonnée du point B représente la tension supérieure σ_o pour $n \cdot 10^6$ oscillations (fig. 1).

Comme toutes les barres d'essai n'arrivent pas à la rupture pour le même nombre d'oscillations, on a recours à la courbe dite de Wöhler pour savoir quelle serait la grandeur de la contrainte limite supérieure σ_o si la barre essayée avait supporté $2 \cdot 10^6$ variations de la charge. Pour l'interprétation des résultats des essais effectués par le Comité Spécial (Kuratorium), toutes les valeurs d'essai

³ Weyrauch: „Die Festigkeitseigenschaften und Methoden der Dimensionenberechnung von Eisen- und Stahlkonstruktionen“. Tableau IV, fig. 66. Leipzig 1889. Edition Teubner.

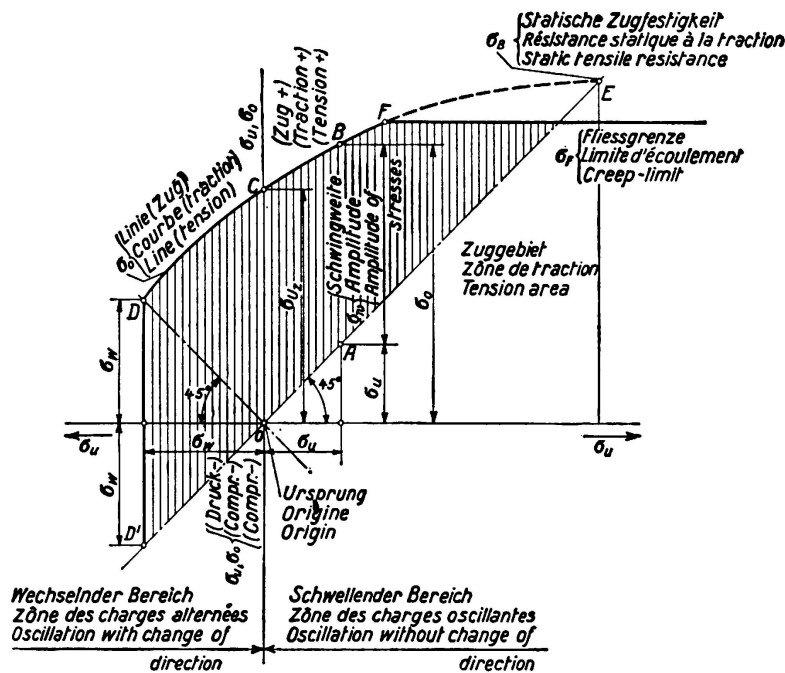


Fig. 1.

Courbe de résistance à la fatigue dans le cas de la traction (courbe de σ_0).

ont été ramenées à ce nombre d'oscillations; c'est donc ce nombre que nous adopterons également pour les discussions ultérieures. Pour $2 \cdot 10^6$ alternances, on a pour la tension supérieure: $\sigma_0 = \sigma_D =$ résistance à la fatigue.

L'intervalle entre la courbe des σ_0 et la droite σ_u inclinée à 45° représente

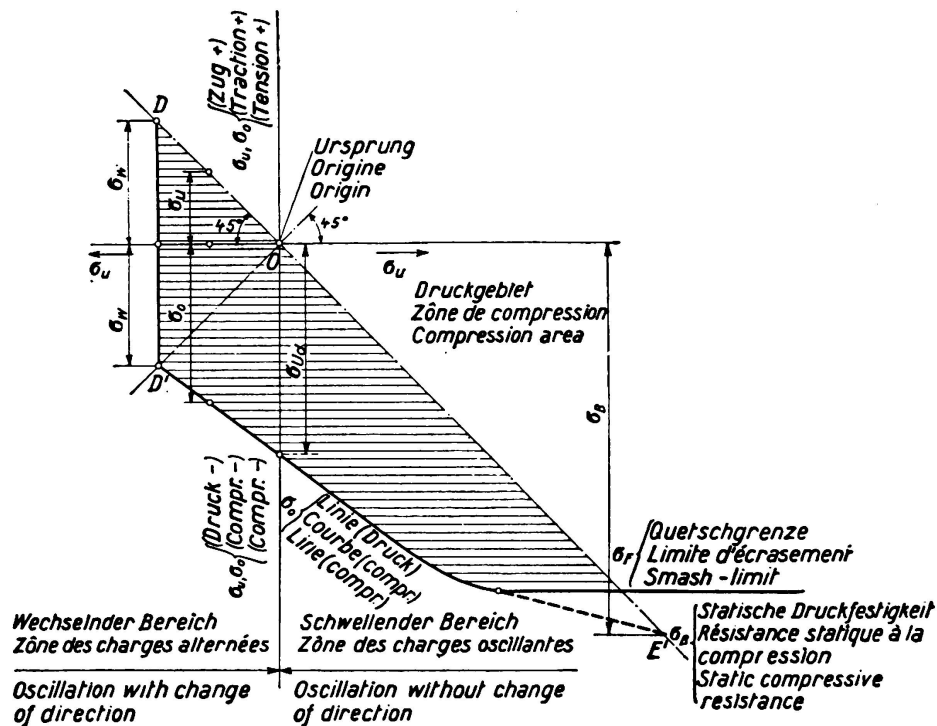


Fig. 2.

Courbe de résistance à la fatigue dans le cas de la compression (courbe de σ_0).

d'une manière très nette la valeur extrêmement intéressante que constitue l'amplitude d'oscillation de la charge σ_w . Si $\sigma_u = 0$ (origine), on a $\sigma_o = \sigma_U =$ résistance aux efforts répétés non alternés. Si la contrainte de compression σ_u est égale à la contrainte de traction σ_o , on considérera la résistance aux efforts répétés alternés σ_w . Si les plus fortes contraintes sont des tractions, on obtient la zone de fatigue représentée par des hachures verticales sur la figure 1. Si les plus fortes tensions sont des compressions, on obtient la zone de fatigue représentée par des hachures horizontales sur la figure 2.

A droite de l'axe des ordonnées, on n'a à considérer que des efforts de même sens; il s'agit d'une fatigue par charges oscillantes. A gauche de l'axe des ordonnées, les contraintes σ_u et σ_o sont de sens opposés; il s'agit ici de charges alternées.

Les valeurs des tensions σ_o ne peuvent être utilisées dans le domaine de la traction (figure 1) que jusqu'à la limite d'écoulement σ_P et dans le domaine de la compression (figure 2) que jusqu'à la limite de résistance à l'écrasement σ_{-F} . Les valeurs de σ_F pour la limite d'écoulement et pour la limite de résistance à l'écrasement peuvent être considérées comme étant équivalentes. Actuellement, seul le domaine des charges oscillantes (de traction) peut être considéré comme ayant été bien étudié. Des essais qui ont été effectués, il résulte que l'on peut, avec une exactitude suffisante, considérer la courbe de σ_o dans le domaine de la traction, comme constituée en pratique par une droite inclinée suivant l'angle α . L'angle α est ici inférieur à 45° et il diffère d'ailleurs suivant le mode d'assemblage (soudures bout à bout ou soudures d'angle). Il en résulte que dans le domaine de la traction (figure 1), l'amplitude des oscillations des contraintes diminue légèrement lorsque l'on se rapproche de plus en plus de la limite d'écoulement. Des quelques essais qui ont été effectués jusqu'à maintenant dans le domaine des charges alternées, pour des valeurs égales de traction et de compression (Graf), ont montré que l'on calculait plutôt trop défavorablement en prolongeant la droite σ_o jusqu'à la résistance à la fatigue par efforts alternés σ_w . Les valeurs de σ_w ont donc été, dans le rapport du Comité d'étude, simplement déduites des valeurs de σ_U en faisant intervenir l'angle α . On a ainsi:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_U - \sigma_w}{\sigma_w} \quad \text{et:} \quad \sigma_w = \frac{\sigma_U}{1 + \operatorname{tg} \alpha}. \quad (1)$$

Dans le domaine de la compression, on peut admettre avec une exactitude suffisante que l'amplitude des oscillations σ_w a partout la même valeur, donc que l'on a: $\sigma_w = 2\sigma_w$. Ceci équivaut à admettre $\alpha = 45^\circ$. On admet donc que dans le domaine de la compression, la résistance aux efforts répétés non alternés $\sigma_{Ud} = \sigma_w = 2\sigma_w$.

Ainsi qu'il a été indiqué, on se limite, pour les essais de résistance à la fatigue à un nombre d'oscillations de la charge $N = 2 \cdot 10^6$. Afin de se faire une idée approximative de ce que ce nombre de variations représente dans le cas d'un pont de chemin de fer, nous supposons par exemple qu'il, s'agisse d'une voie unique sur laquelle circulent 25 trains par jour. Nous n'aurons à considérer ici dans le trafic sur ce pont que les plus fortes tensions qu'un élément de l'ouvrage ait à supporter à chaque passage d'un train; ceci correspond, en général, à une

seule position du train, soit la plus défavorable. Pour produire $2 \cdot 10^6$ alternances, il faudra donc :

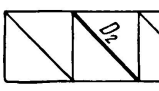
$$\frac{2\,000\,000}{25 \cdot 365} = \text{environ } 220 \text{ ans.}$$

Il faut toutefois tenir compte de ce fait que dans le service normal, les ponts sont d'une manière générale parcourus par des trains plus légers qu'il n'est admis pour les calculs de résistance au moment de l'établissement du projet. Comme d'autre part, la durée en service d'un tel pont est, pour d'autres raisons, notablement plus faible (usure par la rouille, élévation importante de la charge roulante), on se placera donc, en général, dans une position de sécurité, en se contentant d'obtenir du pont, qu'il supporte, pour la condition de charge la plus défavorable, ces $2 \cdot 10^6$ oscillations.

Au cours des travaux préparatoires à l'édition des nouveaux «Principes pour le calcul des ponts métalliques de chemin de fer» (B. E.), en 1934, a été également discutée la question de savoir s'il ne serait pas opportun d'élever les contraintes admissibles, pour les ponts à double voie, par rapport aux ponts à simple voie; en effet, les hypothèses de charge prévues dans les calculs de résistance pour les ponts à double voie ne se produisent en fait que rarement dans l'exploitation, de telle sorte que la résistance à la fatigue se rapproche notablement vers le haut de la courbe de *Wöhler*, par suite du nombre plus réduit des cycles de variation de charge. Afin de mettre en évidence l'ordre de grandeur de la différence $\Delta\sigma$ que présentent les contraintes aux différentes charges par rapport aux valeurs déterminées dans les calculs de résistance, on a étudié les cinq cas de charge faisant l'objet du tableau I et déterminé les contraintes correspondantes.

On est ainsi arrivé à ce résultat que dans les nouveaux ponts de chemin de fer, aucune différence ne devait être faite entre les ponts à une seule voie et les ponts à deux voies. Cette question joue un rôle très important lorsqu'il s'agit du renforcement d'un pont de chemin de fer. Des conclusions semblables peuvent également être établies en ce qui concerne les ponts-routes.

Tableau I

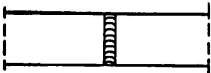
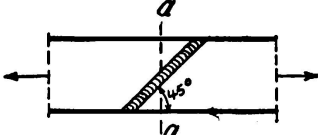
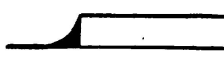
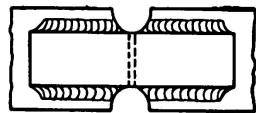
1	2	3	4	5	6	7
Portée l mètres	Partie de l'ouvrage 	Contrainte maximum sur ponts à deux voies en acier St. 37				
		Une voie à pleine charge, l'autre non chargée I kg/cm ²	Une voie à pleine charge, l'autre chargée à 3,6 t/m II kg/cm ²	Une voie à pleine charge, l'autre chargée à 8,0 t/m III kg/cm ²	Une voie à pleine charge, l'autre chargée à 2 loco. IV kg/cm ²	Les deux voies à pleine charge comme dans les calculs de résistance V kg/cm ²
70	Membr. infér.	1080 $\Delta\sigma = 320$	1185 $\Delta\sigma = 215$	1310 $\Delta\sigma = 90$	1315 $\Delta\sigma = 85$	1400
	Contrefiche tendue D ₂	1065 $\Delta\sigma = 335$	1160 $\Delta\sigma = 240$	1290 $\Delta\sigma = 110$	1310 $\Delta\sigma = 90$	1400
100	Membr. infér.	1100 $\Delta\sigma = 300$	1200 $\Delta\sigma = 200$	1330 $\Delta\sigma = 70$	1270 $\Delta\sigma = 130$	1400
	Contrefiche tendue D ₂	1085 $\Delta\sigma = 315$	1185 $\Delta\sigma = 215$	1300 $\Delta\sigma = 100$	1290 $\Delta\sigma = 110$	1400

C. — Résultats principaux du rapport du comité d'étude (Essais de résistance à la fatigue).⁴

1° — Valeurs de la résistance à la fatigue.

Les valeurs de la résistance à la fatigue déduites des résultats des essais, soit σ_D , sont indiquées dans le tableau 2 ci-après.

Tableau 2 (pour l'acier St. 37)

1	2	3	4	5	6
n°	Nature du cordon de soudure	Résistance à la fatigue par efforts alternés σ_w ramenée à $2 \cdot 10^6$ alternances en kg/mm ²	Résistance à la fatigue par efforts non alternés Tract. σ_{Uz} Compr. σ_{Ud} ramenée à $2 \cdot 10^6$ alternances en kg/mm ²		Tableau du Rapport du Comité d'Etude
1	 Bout à bout avec reprise à l'envers	11	18	—22	n° 5** ligne 2
2	Comme ci-dessus, sans reprise	8	13	—16	n° 5** ligne 1
3	 Comme en 1, mais orienté à 45°	13	22	—26	n° 3** ligne 3
4	 Frontal léger avec raccord progressif	5,4	10,3	—10,8	n° 13** ligne 2
5	Frontal plein sans usinage	3,4	6,5	—6,8	n° 13** ligne 3
6	 Latéral léger fraisé aux extrémités	6,3	12,0	—12,6	n° 13** ligne 6
7	Latéral plein non fraisé	4,2	8	—8,4	n° 13** ligne 5

⁴ Voir Kommerell: „Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten“, 4^{ème} édition, 1^{ère} Partie: Hochbauten; 2^{ème} Partie: Vollwändige Eisenbahnbrücken.

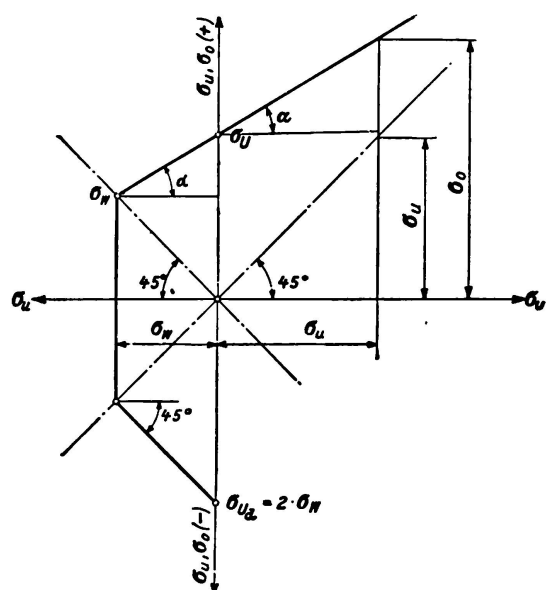


Fig. 3.

2° — Remarques générales au sujet de ces résultats — Lignes de force.

Les premiers essais avec machines de pulsation donnèrent, par rapport aux résistances statiques (charge de rupture $\sigma_B = 40 \text{ kg/mm}^2$), des valeurs étonnamment basses pour la résistance à la fatigue, particulièrement dans le cas des cordons de soudure d'angle (résistance aux efforts répétés non alternés $\sigma_U = 8 \text{ kg/mm}^2$). Ce résultat dépend, ainsi qu'on en eut la confirmation ultérieure, de la disposition des lignes de force.

« Dans les assemblages soudés soumis à des contraintes dynamiques, il est particulièrement important de se rendre exactement compte de la disposition des lignes de force. Les variations brusques de section, les angles vifs qui se présentent aux entailles, les positions défavorables des cordons de soudure, peuvent donner naissance à des « pointes » brusques dans les contraintes mises en jeu. Il faut donc les éviter dans toute la mesure du possible ou tout au moins annihiler leur influence défavorable par des dispositions judicieuses. Les efforts doivent être transmis d'une partie à l'autre des ouvrages suivant les voies les plus directes et d'une manière naturelle, sans qu'il soit apporté de modification sensible à leur orientation naturelle. »

Dans la construction des charpentes métalliques fixes, de telles « pointes » dans les contraintes sont loin de jouer un rôle aussi grave que dans les parties d'ouvrages soumises à des contraintes dynamiques. Ceci provient de ce que la plasticité du métal des différentes parties de l'ouvrage soumises à des contraintes statiques excessives, exerce une action de réduction sur les pointes de tension, après le dépassement de la limite d'écoulement, de telle sorte que les contraintes viennent à être supportées par des éléments de section différents des premiers et initialement moins chargés. Cette différence de comportement est d'ailleurs nettement mise en évidence par les essais suivants⁵ (figure 4). Le cliché de gauche représente le résultat de l'essai de traction statique. Par

⁵ Voir Graf: „Über die Festigkeiten der Schweißverbindungen“; Autogene Metallbearbeitung 1934, p. 1 et suivantes.

suite de la présence du trou, la répartition des contraintes dans la section qui passe par le centre de ce trou est irrégulière. On constate des «pointes» de contraintes sur les bords du trou. A l'essai statique, on a obtenu une charge de rupture $\sigma_B = 54,6 \text{ kg/mm}^2$, tandis qu'au cours de l'essai de fatigue, poursuivi jusqu'à la rupture (cliché de droite), on n'a atteint pour la résistance à la fatigue par rapport à l'origine que $\sigma_U = 24 \text{ kg/mm}^2$.

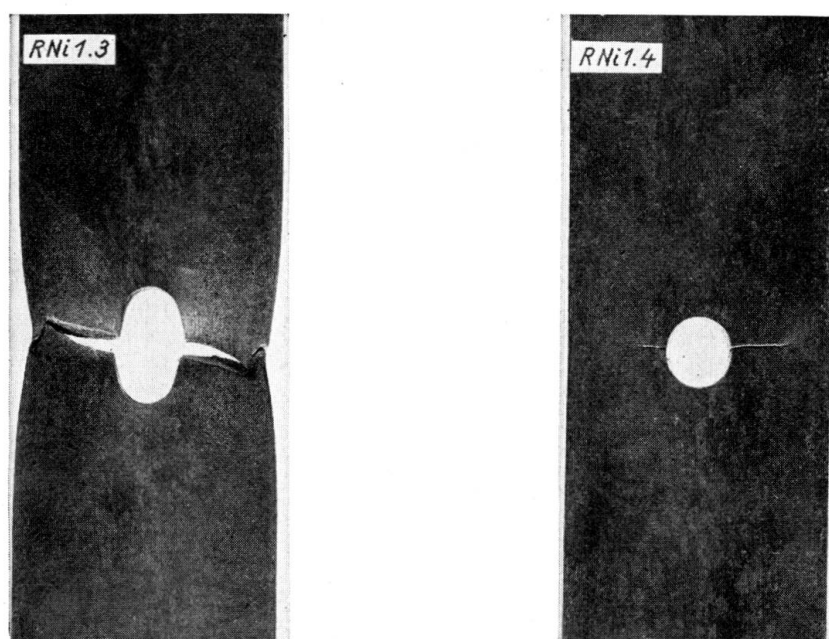


Fig. 4.

Essai statique de traction; résistance
à la traction
 $\sigma_B = 54,6 \text{ kg/mm}^2$

Essai dynamique de traction; résistance
aux efforts répétés non alternés
($M_{\min} = 0$): $\sigma_U = 24,0 \text{ kg/mm}^2$

3° — Soudures bout à bout.

a) « Dans les débuts de la soudure, on éprouvait quelque prévention instinctive à l'égard des assemblages soudés bout à bout; cette opinion s'est toutefois complètement modifiée à la suite de nombreux essais de résistance à la fatigue. Par suite en effet de l'écoulement rectiligne régulier des lignes de force, ces soudures s'y comportent beaucoup mieux que les soudures d'angle. On admet même aujourd'hui que la résistance aux efforts répétés non alternés de soudures bout à bout exécutées soigneusement est, dans les limites supérieures, tout aussi élevée que dans la barre perforée ($\sigma_U = 18 \text{ kg/mm}^2$).

La résistance à la fatigue dépend dans une large mesure de l'exécution du cordon de soudure. Considérons par exemple un assemblage soudé bout à bout⁶ avec zone de transition défectueuse entre le métal d'apport et le métal de base et comportant de nombreuses porosités (figure 5a); la résistance correspondante aux efforts répétés non alternés est de 10 kg/mm^2 (effet de résilience). Par contre, dans l'assemblage de la figure 5b, qui ne présente pas ces défauts, la

⁶ Voir Graf: „Über die Festigkeiten der Schweißverbindungen“; Autogene Metallbearbeitung 1934, p. 4 et 5.

résistance à la fatigue atteint 18 kg/mm^2 . Dans les deux cas, la résistance à la traction statique ne diffère que très peu des chiffres ci-dessus. Elle est également plus élevée pour le cordon le mieux exécuté.

b) Les cordons de soudure doivent augmenter de section très progressivement et ne faire saillie que très légèrement au-dessus de la surface des pièces assem-

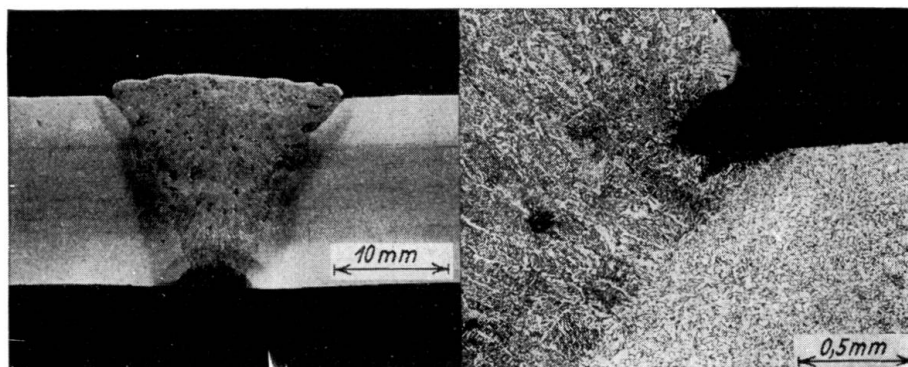


Fig. 5a.

Résistance aux efforts répétés non alternés: $\rho_{Uz} = 10 \text{ kg/mm}^2$

Résistance statique à la traction: $\sigma_B = 34 \text{ kg/mm}^2$.

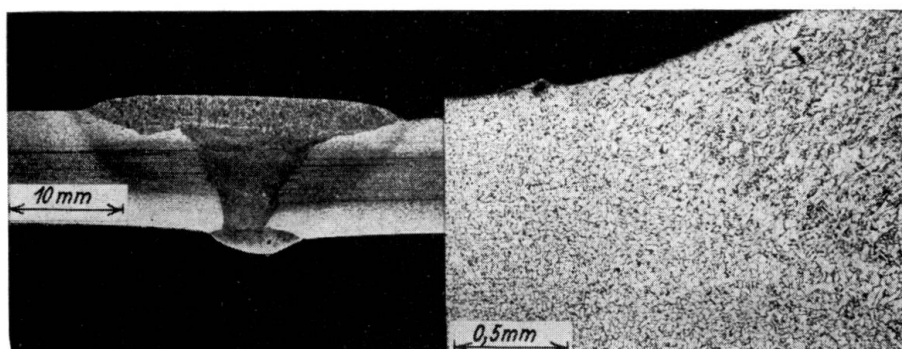


Fig. 5b.

Résistance aux efforts répétés non alternés: $\rho_{Uz} = 18 \text{ kg/mm}^2$.

Résistance statique à la traction: $\sigma_B = 37,5 \text{ kg/mm}^2$.

Fig. 5a et 5b. Essai dynamique de traction sur une soudure bout à bout avec et sans porosités et cavités dans la zone de transition.

blées. C'est une erreur que de croire qu'un cordon de soudure épais augmente la résistance de l'assemblage à la fatigue. C'est précisément le contraire qui se produit.»

c) «Dans les assemblages bout à bout, il est particulièrement important de reprendre soigneusement la soudure du côté de la racine, après avoir enlevé les scories. Ceci résulte nettement des figures 6a (voir renvois précédents) qui représente une soudure en V effectuée au chalumeau et n'ayant donné qu'une résistance aux effort répétés non alternés de 12 kg/mm^2 et 6b, comportant une reprise de la racine du cordon et ayant donné 18 kg/mm^2 . Dans les deux cas, la résistance statique était de 38 kg/mm^2 . On a également constaté dans de nombreux essais de résistance à la fatigue sur cordons de soudure en X, combien

il est important de bien débarrasser l'intérieur des cordons des scories (en affouillant et en dégageant à l'émeri), puis de reprendre avec soin la soudure à l'aide d'une baguette de faible diamètre. Voir la figure 7, pour laquelle on n'a obtenu une résistance aux efforts répétés non alternés de 10 kg/mm² seulement. D'une manière générale, les soudures en V se sont mieux comportées que les soudures en X.»

«Pour l'assemblage des semelles de membrure de poutres, il peut arriver que l'on ne puisse pas reprendre à l'envers les cordons de soudure en V; dans ce cas, il est à recommander dans tous les cas de travailler tout d'abord avec une

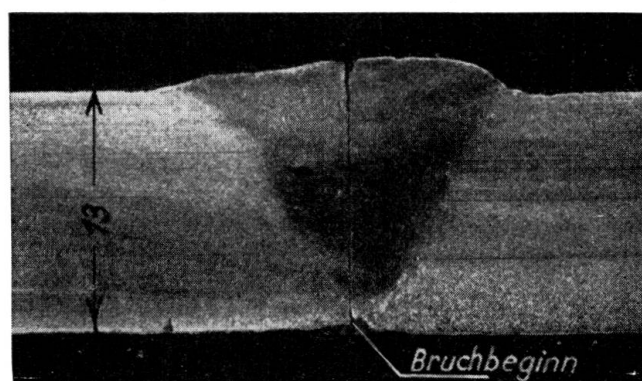


Fig. 6a.

Résistance aux efforts répétés non alternés: $\rho_{Uz} = 12 \text{ kg/mm}^2$.

Résistance statique à la traction: $\sigma_B = 38 \text{ kg/mm}^2$.

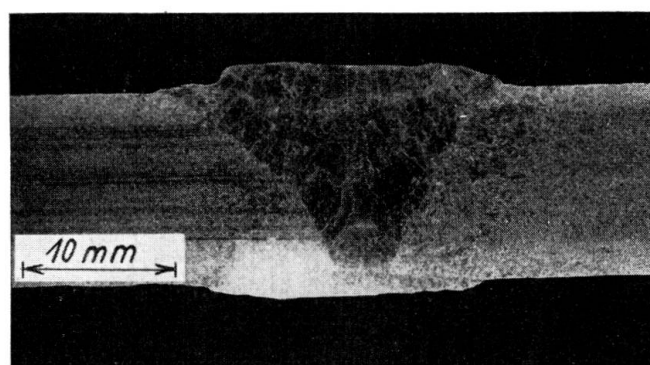


Fig. 6b.

Résistance aux efforts répétés non alternés: $\rho_{Uz} = 18 \text{ kg/mm}^2$.

Résistance statique à la traction: $\sigma_B = 38 \text{ kg/mm}^2$.

Fig. 6a et 6b. Essai dynamique de traction avec racines non reprises et avec racines reprises à l'envers.

baguette de faible diamètre et d'adopter entre les pièces à assembler un écartement tel que l'on puisse assurer un excellent assemblage à la base même du cordon. Dans la mesure du possible, le joint devra en pareil cas être disposé en une place où les contraintes sont plus faibles qu'ailleurs.

d) Suivant Graf, on a pu obtenir dans les assemblages bout à bout, une résistance aux efforts répétés non alternés allant jusqu'à 24 kg/mm² en rabotant les cordons de soudure des deux côtés, suivant la direction de la traction et en les

finissant avec soin. On voit ici combien il est important, pour les contraintes de fatigue, que les surfaces soient lisses et bien continues. La résistance à la fatigue des assemblages soudés peut également être améliorée par un polissage soigné des cordons de soudure, en ayant soin de réaliser des transitions toujours progressives et d'éviter toute discontinuité.»

e) «En vue d'améliorer la résistance à la fatigue des soudures bout à bout (pour l'assemblage de pièces en acier St. 37), on a également déjà envisagé

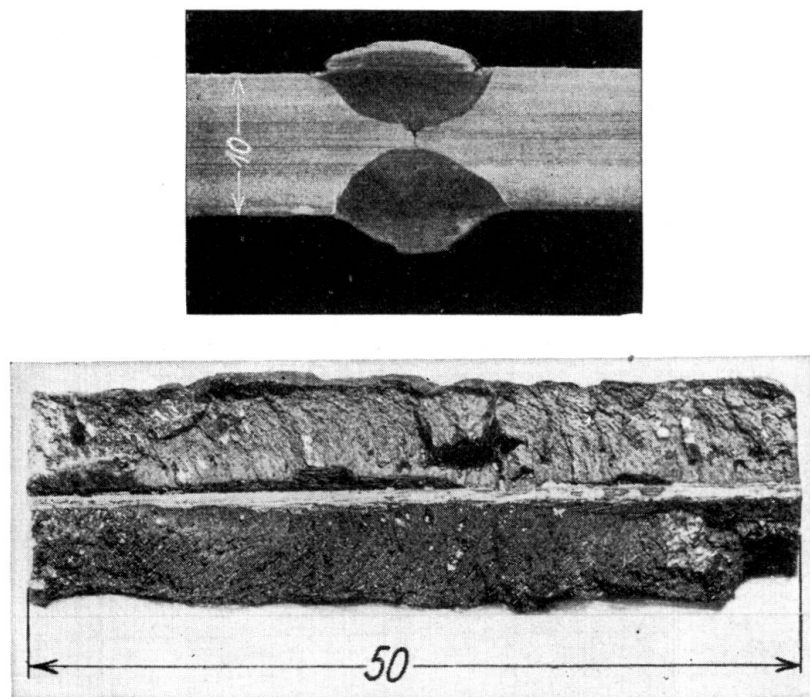
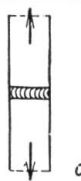
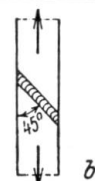


Fig. 7. Soudures à l'arc défectueuses sur acier St. 37; cordons en X.

l'emploi de baguettes d'apport à haute résistance. Ainsi qu'il résulte des essais, il est illusoire de donner au cordon de soudure une résistance plus élevée que celle du métal de base, car cette résistance n'est pas intégralement utilisée; dans la plupart des cas en effet, les assemblages se rompent non pas dans le cordon lui-même, mais à partir d'entailles dans la zone de transition.»

f) Graf a également effectué un essai intéressant⁷ sur un cordon de soudure en V incliné à 45° en comparaison avec un cordon en V perpendiculaire au bord de la tôle. Ainsi qu'il résulte du tableau ci-après, on peut encore améliorer la résistance de l'assemblage aux efforts répétés non alternés.

		
Sans reprise à l'envers	$\rho_U = 12 \text{ kg/mm}^2$	$\rho_U = 17 \text{ kg/mm}^2$
Avec reprise à l'envers	$\rho_U = 18 \text{ kg/mm}^2$	$\rho_U = 22 \text{ kg/mm}^2$

⁷ Autogene Metallbearbeitung 1934, page 5.

Dans les deux cas, l'amorce de la rupture s'est produite dans des entailles (figures 8 et 9).

Comme toutefois, dans le cas b, et dans une section perpendiculaire à la direction des efforts, la plus grande partie de la section était constituée par le métal de base, l'influence des entailles a été dans ce cas, plus réduite que dans le cas a. En disposant le joint obliquement et en usinant les cordons de soudure, on peut encore améliorer notablement la résistance à la fatigue.



Fig. 8.

(Racine non reprise).



Fig. 9.

(Racine reprise).

Fig. 8 et 9. Soudures au chalumeau en V aigu sur acier St. 37 soumises à des charges de traction fréquemment répétées.

g) A titre de comparaison, *Graf* indique pour les résistances aux efforts répétés non alternés, pour des barreaux plats non soudés, les valeurs suivantes:

a) acier St. 37 avec peau de laminage sans perçage:

$$\sigma_U = 25 \text{ à } 31 \text{ kg/mm}^2;$$

b) acier St. 37 avec peau de laminage et avec perçage:

$$\sigma_U = 16 \text{ à } 21 \text{ kg/mm}^2.$$

Dans les assemblages rivés et par suite de la pression sur les parois des trous, la résistance à la fatigue est plus faible, en particulier dans les assemblages avec

couche de peinture intermédiaire. D'après les essais de Dahlem, elle est de l'ordre de: $\sigma_U = 15 \text{ kg/mm}^2$.

Dans des assemblages bout à bout, avec reprise à l'envers et cordons de soudure présentant peu de porosité, on a par contre obtenu, ainsi qu'il a été indiqué plus haut:

$\rho_U = 18 \text{ kg/mm}^2$ avec cordon perpendiculaire à la direction des efforts;

$\rho_U = 22 \text{ kg/mm}^2$ avec cordon dirigé à 45° par rapport à la direction des efforts.

Il est donc à remarquer que les valeurs supérieures de la résistance aux efforts répétés non alternés, des assemblages convenablement soudés est de l'ordre de grandeur de celle des barreaux plats non soudés, avec peau de laminage et trou. Par contre, et même en usinant les cordons de soudure, on n'a pas encore pu jusqu'à maintenant atteindre la résistance des barreaux non percés. A Stuttgart, on insiste aussi tout particulièrement sur ce fait que la dispersion entre les valeurs de la résistance à la fatigue des assemblages soudés bout à bout est plus marquée que dans les barreaux non soudés avec et sans perçage. C'est ainsi que l'on a obtenu avec des assemblages bout à bout simples non usinés les valeurs suivantes de résistance aux efforts répétés non alternés:

Soudure au chalumeau sur tôles de 10 à 26 mm d'épaisseur

en acier St. 37 (5 valeurs) $\rho_{Uz} = 12 \text{ à } 18 \text{ kg/mm}^2$;

Soudure à l'arc sur tôles de 10 à 16 mm d'épaisseur

en acier St. 37 (12 valeurs) $\rho_{Uz} = 9 \text{ à } 18 \text{ kg/mm}^2$.

Les valeurs de la résistance aux efforts répétés non alternés peuvent, dans les assemblages bout à bout, être aussi élevées que les contraintes qui correspondent à la limite d'écoulement du métal de base, soit:

$$\rho_{Ud} = 24 \text{ kg/mm}^2.$$

4° — Soudures latérales.

a) Dans les soudures latérales, l'écoulement des lignes de force se fait beaucoup moins favorablement que dans les soudures bout à bout. Dans les assemblages suivant figure 11, elles sont très rapprochées les unes des autres et s'écoulent de leur direction principale dans les cordons de soudure latéraux. Il se produit donc des déviations de ces lignes de force et par suite des contraintes de fléchissement latéral dans les barres assemblées. Des pièces taillées dans la masse et des assemblages en croix accusent déjà ainsi de forts écarts de résistance à la fatigue, auxquels vient s'ajouter l'influence des entailles dans la zone de transition entre les cordons de soudure et le métal de base. Il résulte de tout ceci que dans les essais avec soudures latérales, l'écart entre les résultats des essais statiques et ceux des essais de résistance à la fatigue est notablement plus accusé que pour les soudures bout à bout. Tandis que dans les essais statiques; les soudures latérales de qualité moyenne tiennent aussi bien que de bonnes soudures bout à bout, elles sont nettement inférieures en ce qui concerne la résistance à la fatigue. Dans le cas de la figure 11, par exemple,⁸ on a à droite une résistance aux efforts répétés non alternés $\rho_U = 9 - 0,5 = 8,5 \text{ kg/mm}^2$, contre une résistance à la traction $\sigma_B = 41,2 \text{ kg/mm}^2$ pour l'essai statique,

⁸ Graf: „Über die Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen“; Stahlbau 1933, pages 84 et 85.

à gauche. Il intervient d'ailleurs ici un manque de régularité dans la zone de transition entre le métal de base et le cordon de soudure (entailles), qui exerce une influence très défavorable (voir figure 12). Si l'on peut employer les cordons de soudure d'angle, en charpente métallique ordinaire, pour les assemblages de barres de treillis, sans qu'il en résulte aucun inconvénient, on ne peut le faire lorsqu'il s'agit d'assemblages exposés à des contraintes dynamiques qu'en

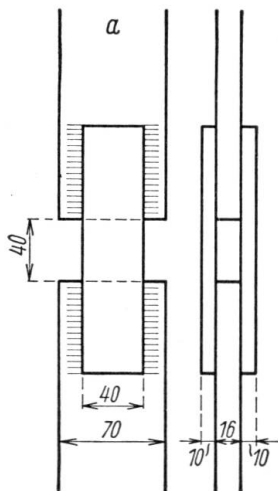


Fig. 10.

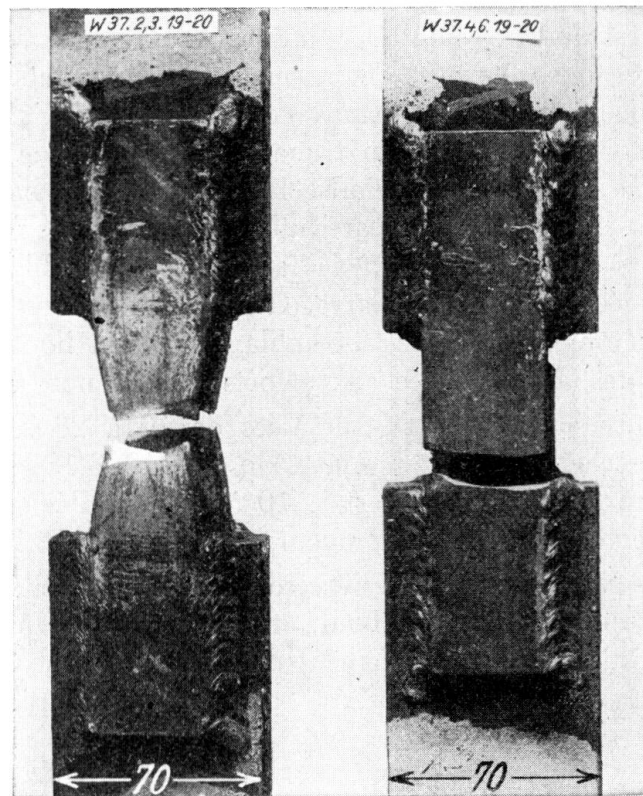


Fig. 11.

Essais de traction sur assemblages par cordons d'angle latéraux d'après la fig. 17. Soudure à l'arc sur St. 37. A gauche: après essai statique, à droite après essai dynamique.

réduisant notablement les contraintes admissibles dans les barres elles-mêmes. Aux extrémités des cordons d'angle latéraux, se manifestent des contraintes très nettement ondulatoires, que l'on peut compenser par intervention de la plasticité locale du métal. Pour pouvoir faire intervenir cette plasticité, il faut utiliser pour les soudures un métal accusant des caractéristiques correspondantes élevées, pour toutes les soudures d'angle et tout particulièrement dans la construction des ponts.

Ainsi qu'il résulte des figures 12 à 14 (Stuttgart), la rupture qui s'amorce dans la zone de transition du cordon de soudure intéresse également le métal de base; *les parties assemblées avec ces cordons d'angle ne doivent donc pas elles-mêmes être chargées au-delà de ce que permet l'assemblage soudé, en tenant compte de la sécurité nécessaire.*

b) Une très forte pénétration de la soudure dans les parties à assembler peut, par suite de la modification de structure qui en résulte, provoquer un effet

de résilience marqué, qui peut s'étendre à la zone de transition tout entière. Dans les soudures soumises à des contraintes dynamiques, il faut donc éviter cette trop forte pénétration de la fusion. Dans les soudures d'angle en construction

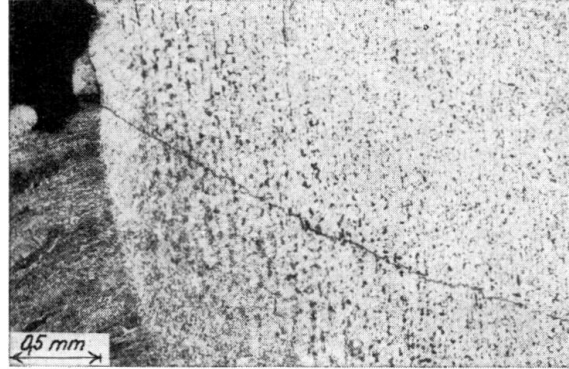


Fig. 12.

de ponts et de charpentes métalliques, il est nécessaire que le soudeur se tienne aussi rigoureusement que possible, pour les cordons de soudure, aux cotes prescrites.

c) *Dans les soudures d'angle, il est particulièrement important de réaliser un assemblage intime dans la racine du cordon de soudure.*

d) Ce qui a été dit en 3^{ième} au sujet de la résistance du métal d'apport dans les soudures bout à bout s'applique également ici aux soudures d'angle.

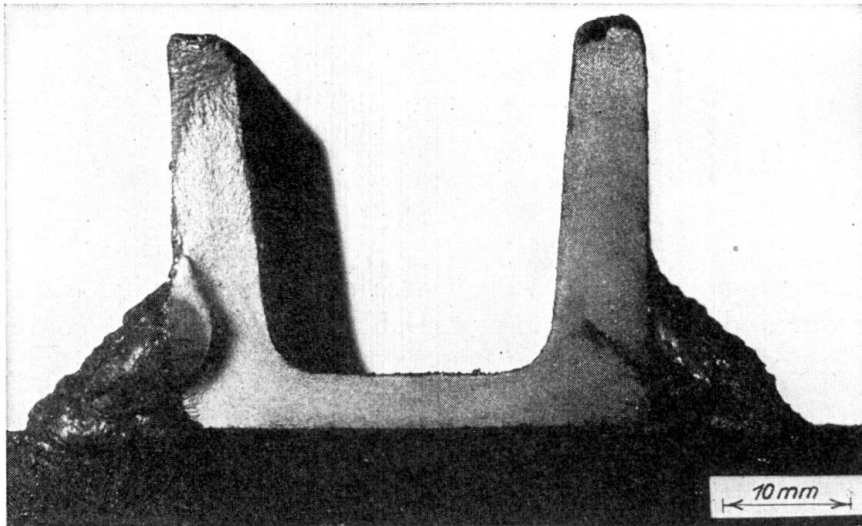


Fig. 13.

e) Au cours des essais de fatigue à la traction, sur cordons d'angle, on a constaté que la rupture se produit toujours dans la barre (zone de transition) et non pas dans le cordon de soudure lui-même, lorsque l'on a :

$$\frac{\text{Contrainte dans le cordon de soudure}}{\text{Contrainte dans la barre}} = \frac{\rho}{\sigma} = 0,5.$$

Si $\frac{\rho}{\sigma} = 1$ ou plus, les ruptures se produisent dans le cordon. Lorsque la longueur

du cordon augmente, la résistance de l'assemblage aux efforts répétés non alternés croît. Lorsque $\frac{\rho}{\sigma} < 0,5$, cet accroissement n'est que faible.

La valeur $\frac{\rho}{\sigma} = 0,5$ indique que la section du cordon de soudure est le double de celle de la barre:

$$F_s = 2 \cdot F_b$$

A partir de ce rapport et au-dessous, ce n'est donc plus la section du cordon de soudure qui joue le rôle capital dans la rupture, mais bien celle de la barre. C'est pourquoi la rupture se produit toujours dans la barre au cours de l'essai

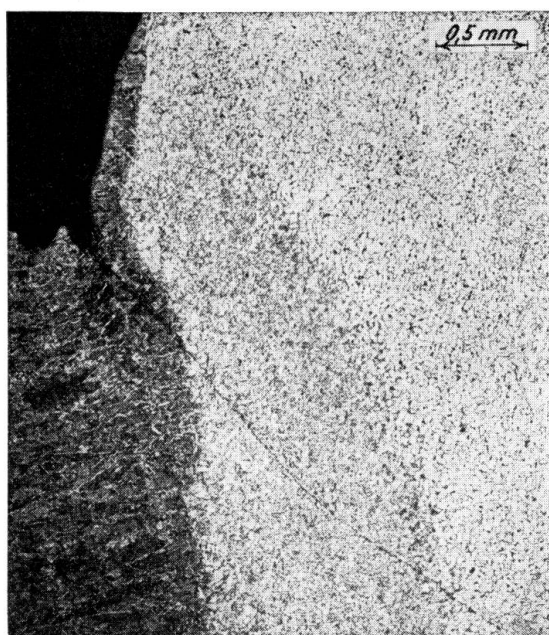


Fig. 14.

de fatigue. Les essais sur pont oscillant avec assemblages uniquement constitués par des soudures d'angle, effectués à Dahlem et à Dresde, confirment que lorsque:

$$\frac{F_b}{F_s} = 0,40 \text{ à } 0,83^9$$

la rupture ne se produit pas dans le cordon, mais toujours dans les barres ou les couvre-joints, aux extrémités des cordons.

Au cours des essais de fatigue, les ruptures se sont en règle générale produites aux extrémités des cordons d'angle, même lorsque l'on employait des fers à U au lieu de fers plats (figures 12, 13 et 14) (Stuttgart).

f) Les écarts entre les contraintes aux extrémités des cordons d'angle étaient d'autant plus marqués que la largeur B des couvre-joints était grande. Ceci a

⁹ Comme $\rho/\sigma = \frac{C/F_s}{C/F} = F/F_s$ (C charge totale) il en résulte que le rapport F_b/F_s a la même signification que le rapport ρ/σ .

pour conséquence une diminution de ρ_U lorsque la largeur des couvre-joints croît à épaisseur constante et l'on a :

Largeur des couvre-joints B	25	40	70 mm
Résistance à la fatigue ρ_U	10	9	7 kg/mm ²

(Voir les essais de Stuttgart)¹⁰

On peut donc envisager, pour les assemblages de barres tendues soumises à des contraintes dynamiques, d'adopter plusieurs couvre-joints étroits au lieu d'un seul couvre-joints très large.

g) Pour assurer un écoulement plus favorable des lignes de force, on a usiné avec soin les faces frontales des couvre-joints de l'assemblage ci-dessus mentionné : $B = 70$ mm, $\rho_U = 7$ kg/mm². On n'a obtenu ainsi qu'une augmentation insignifiante de la résistance à la fatigue par rapport à l'assemblage non usiné, soit $\rho_U = 8$ kg/mm².

h) Dans un assemblage à couvre-joint avec cordons de soudure d'angle, il ne faut jamais appliquer de cordons au-dessus de l'intervalle du joint lui-même. De même, lorsqu'il s'agit d'assemblages par couvre-joints soumis à des contraintes dynamiques, il est très défavorable de rapprocher près l'une de l'autre les extrémités des cordons de soudure qui se font face de chaque côté de l'intervalle du joint, car il en résulte une notable diminution de la résistance à la fatigue par suite d'une trop grande localisation des contraintes. On trouvera dans le tableau suivant quelques résultats d'essais effectués à ce sujet à Dahlem et Dresde.¹¹

Série d'essais n°	Intervalle entre les extrémités des cordons au-dessus de l'intervalle du joint mm	ρ_U kg/mm ²	ρ_O kg/mm ²	Nombre d'alternances supportées par l'assemblage 10 ⁶
VI (St. 37) VIa (S II)	} 5	8	16	0,30 à 0,51
RI E (St. 37) VIa E (S II)	} 50	8	17	1,06 à 1,47
VI (St. 37) Echantillon Da 4	} 5 ¹²	8	16	2,10

Au cours de l'essai VI (St. 37 Da 4), l'influence favorable d'un passage très progressif de la soudure à la tôle s'est fait nettement sentir. *Bierett* signale avoir fait un essai du même genre.¹³ Il a obtenu les résistances à la fatigue suivantes :

¹⁰ „Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen“, Ed. V.D.I., Berlin 1935.

¹¹ Voir renvoi précédent.

¹² Un fraisage a ici assuré une transition très progressive.

¹³ *G. Bierett*: „Die Schweißverbindung bei dynamischer Beanspruchung“, Die Electro-schweißung, avril 1933, n° 4.

Eprouvette non usinée (figure 15):

$\rho_o = 8,5 \text{ kg/mm}^2$; avec contrainte initiale de 2 kg/mm^2 ;

Amplitude de variation de la charge: $\rho_w = 6,5 \text{ kg/mm}^2$;

Extrémités des cordons usinés ultérieurement (figure 16):

$\rho_o = 12,5 \text{ kg/mm}^2$; avec contrainte initiale de 2 kg/mm^2 ;

Amplitude de variation de la charge: $\rho_w = 10,5 \text{ kg/mm}^2$.

Avec une contrainte initiale de 10 kg/mm^2 , on a obtenu sur des cordons de soudure non usinés $\rho_o = 16 \text{ kg/mm}^2$, soit une amplitude de variation de charge de $\rho_w = 6 \text{ kg/mm}^2$. Comme les couvre-joints avaient été découpés à la cisaille, condition défavorable pour la résistance à la fatigue, ces dernières valeurs ne peuvent être considérées que comparativement.

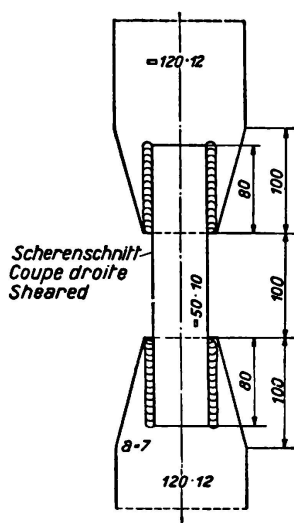


Fig. 15.

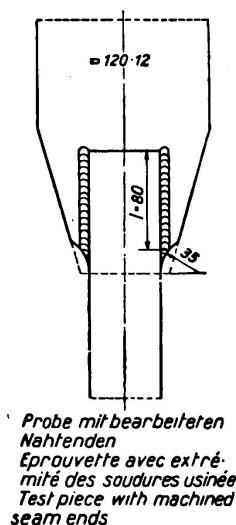


Fig. 16.

i) Sur des assemblages en acier St. 37 soudés à l'arc, on a obtenu une notable amélioration de la résistance à la fatigue par rapport à l'origine, de 9 à 11 kg/mm^2 en portant l'intervalle libre entre les extrémités des barres assemblées de 30 à 200 mm. Les lignes de force peuvent ainsi prendre une forme plus allongée. Cette disposition ne peut toutefois pas être utilisée très couramment en construction.

k) Des essais de résistance à la fatigue sur poutres en tôles soudées ont montré¹⁴ que les valeurs de la résistance à la fatigue sont plus faibles lorsque les cordons d'angle entre tôles d'âme et éléments de membrure sont discontinus que lorsque ces cordons sont continus. Ceci se conçoit aisément, car les variations brusques de section au commencement et à la fin de chaque élément de cordon discontinu donnent lieu à un effet de résilience. Dans les ponts et en particulier lorsque les traverses reposent directement sur les poutres en tôles soudées, de même que dans la construction des voies de roulement des engins de levage, on

¹⁴ Hochheim: „Mitteilungen aus den Forschungsanstalten der Gutehoffnungshütte“, 1932, 1, page 225. Une poutre avec cordons de soudure discontinus, soumise à une contrainte en bordure de 1560 kg/cm^2 , n'a supporté que 60.000 alternances, tandis que la même poutre avec cordons de soudure continus a tenu, sous la même charge, jusqu'à $2 \cdot 10^6$ alternances sans manifester encore aucun signe de détérioration.

adoptera donc des cordons de soudure d'angle continus. Les conditions sont différentes en charpente métallique proprement dite. Ici, on pourra sans inconvénient prévoir également des cordons discontinus entre tôles d'âme et éléments de membrure, à moins que d'autres considérations (risques de corrosion par exemple) n'imposent également le cordon continu.

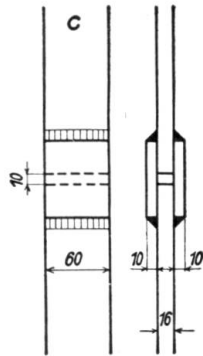


Fig. 17.

Essais de fatigue par traction sur assemblages par cordons d'angle frontaux.

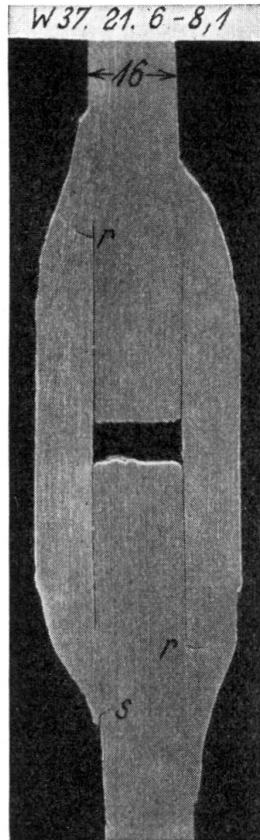


Fig. 18.

Assemblage par cordons d'angle frontaux (au chalumeau sur St. 37) après application répétée de tractions.

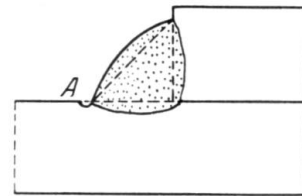


Fig. 19.

5° — Soudures frontales.

a) Ce qui a été dit plus haut en 4b s'applique ici à la trop grande pénétration de la fusion; ce qui a été dit en 4c s'applique également à l'assemblage intime à la base du cordon de soudure; il en est de même pour ce qui a été indiqué en 3^{ème} au sujet de la résistance du métal d'apport.

b) Dans les soudures frontales suivant figures 17 et 18, les fissures s'amorcèrent en r, puis de nouvelles fissures apparurent ultérieurement en s. Les résistances aux efforts répétés non alternés obtenues sont les suivantes:

Cordons frontaux:

Soudure au chalumeau suivant figures 17 et 18:

$$\rho_U = 14 \text{ kg/mm}^2;$$

Soudure à l'arc suivant figure 17:

$$\rho_U = 8,5 \text{ kg/mm}^2.$$

A titre de comparaison, les résistances des cordons latéraux ont été les suivantes:

Cordons latéraux:

Soudure au chalumeau suivant figure 11:

$$\rho_U = 14 \text{ kg/mm}^2;$$

Soudure à l'arc suivant figure 11:

$$\rho_U = 8,5 \text{ kg/mm}^2.$$

Dans la soudure au chalumeau, une influence très favorable a été exercée par le passage progressif des cordons de soudure au métal de base. On verra plus loin, en 5c, que la même forme de cordons de soudure a permis d'obtenir des valeurs encore supérieures, en soudure à l'arc. Au cours de nombreux essais sur

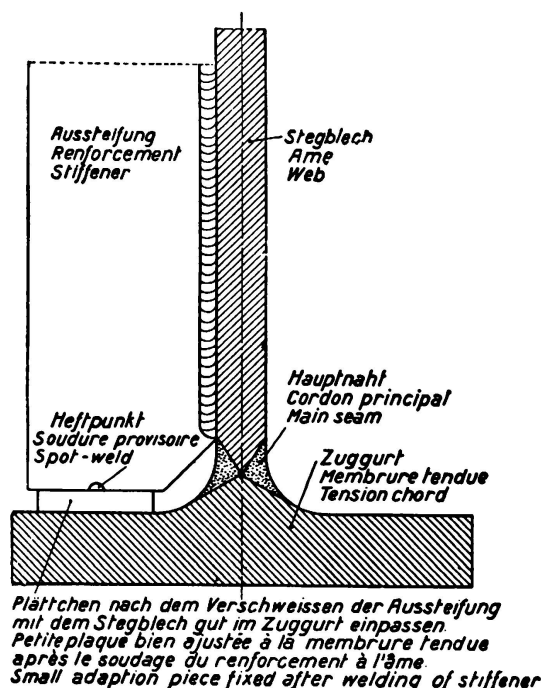


Fig. 20.

cordons d'angle frontaux, on a constaté que la résistance à la fatigue diminuait sensiblement lorsque la pénétration de la fusion est profonde en A et que la surface du métal est irrégulière (creux) (figure 19).

Dans les parties d'ouvrages soumises à des contraintes dynamiques, il faut examiner avec soin les bords des cordons de soudure pour trouver les défauts éventuels (à la loupe); s'il en existe, il faudra de toute nécessité reprendre la soudure en A (cette précaution est à recommander même en construction de charpentes ordinaires, voir 5c). Ici, un passage trop brusque du métal d'apport à la tôle, de même qu'une irrégularité de la surface en A, peuvent donner lieu à un effet de résilience défavorable. Cette éventualité n'est d'ailleurs pas limitée au cas où la soudure s'étend sur toute la largeur de la barre ou presque, mais également au cas où elle vient se terminer en pointe.

Dans les barres qui travaillent à la traction et qui sont soumises à des efforts dynamiques importants, il faut donc éviter les cordons de soudure frontaux normaux à la direction des efforts dans toute la mesure du possible. Voir toute-

fois 5c (amélioration des formes). Pour les charpentes ordinaires, il n'est pas nécessaire d'être aussi strict; toutefois, ici aussi, il faut éviter tout affouillement en A, figure 19.

Par suite de la diminution de la résistance à la fatigue que causent les cordons de soudure frontaux perpendiculaires à la direction des efforts dans les barres travaillant à la traction, il faut, dans la construction des ponts par exemple, éviter de souder les éléments de renforcement de l'âme directement sur la membrure travaillant à la traction. Comme il est toutefois essentiel de réaliser une large fixation des éléments de renforcement sur les deux membrures, on interpose de petites plaques entre l'élément de renforcement et la membrure travaillant à la traction; il suffit alors que les plaques, soigneusement ajustées, soient maintenues en position par de légères soudures sur les éléments de renforcement.

Sur les deux membrures, les éléments de renforcement sont convenablement dégagés à l'endroit des cordons de soudure principaux entre âme et semelle, afin qu'au moment de la pose de ces éléments, les soudures principales restent exemptes de toute atteinte et que leur vérification ultérieure reste facile. Sur les membrures comprimées, les éléments de renforcement peuvent être soudés directement sur les membrures.

(Les plaques de compensation ci-dessus peuvent également être utiles dans la construction des charpentes métalliques ordinaires, en particulier dans le cas des poutres de grande hauteur. Le montage des éléments de renforcement sur les tôles d'âme provoque un retrait des cordons d'assemblage et il ne faut pas compter obtenir une bonne fixation des éléments de renforcement sur la membrure inférieure, principalement sur les poutres de grande hauteur. L'intervention des plaques ci-dessus, plus ou moins épaisses, permet d'obtenir une bonne liaison entre les éléments de renforcement et les deux membrures, si importante dans le cas des poutres en tôles soudées.)

c) D'après les essais effectués au Laboratoire d'Essai des Matériaux de Dahlem, la forme des cordons de soudure joue un rôle extrêmement important dans la résistance à la fatigue des assemblages par cordons frontaux.¹⁵

„Sur des cordons d'angle frontaux inclinés à un peu moins de 45° et exécutés avec électrodes nues, on a obtenu sous une charge initiale de 2 kg/mm² et à 2 · 10⁶ alternances une résistance à la fatigue de 10,8 kg/mm². La rupture à la fatigue s'est produite dans la tôle elle-même, sous le cordon.

Même en employant des électrodes à allongement plus élevé et même dans le cas le plus favorable, lorsque les caractéristiques des électrodes sont identiques à celles du métal de base, il ne faut pas espérer obtenir un meilleur résultat en adoptant la forme géométrique (section de cordon à côtés égaux avec arrondi) sur laquelle ont été appuyés les essais. On peut recommander, dans le cas de la soudure à l'arc, l'emploi des électrodes enrobées, car en règle générale elles donnent aux cordons de soudure de meilleures caractéristiques d'allongement et par suite de leur comportement au cours de la soudure, elles permettent de donner à la section des cordons une forme géométrique plus favorable et en

¹⁵ Bierett et Grüning: „Spannungszustand und Festigkeit von Stirnkehlnahtverbindungen“; Stahlbau 1933, n° 22.

particulier de réaliser un raccordement progressif de la surface du cordon et de celle du métal de base.

Avec une section de cordon convenable, même sans adjonction de cordons latéraux, mais peut-être conjointement avec des cordons de soudure bout à bout, les cordons de soudure frontaux doivent être considérés comme un élément important et de réelle valeur en construction soudée.»

Si, au début, la préférence allait au cordon bombé, les essais de résistance à la fatigue ont complètement modifié ce point de vue. Pour tous les cordons d'angle soumis à des contraintes dynamiques, les formes ci-dessus indiquées et en particulier la forme concave de la figure 21, sont préférables.

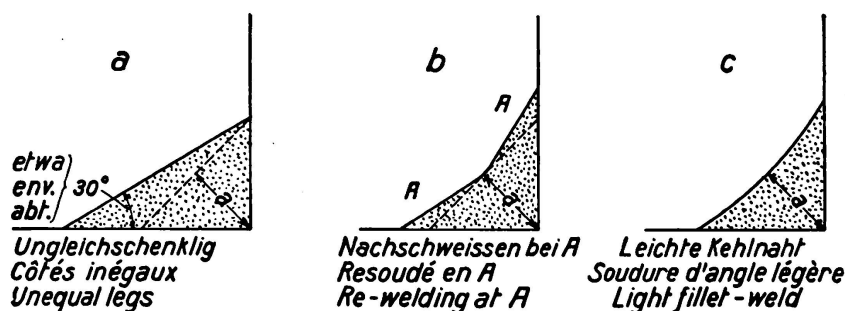


Fig. 21.

Formes à adopter pour les cordons d'angle frontaux dans les parties d'ouvrages soumises à des contraintes dynamiques.

D'après le tableau 2 du Rapport Commun de Dalems-Dresde,¹⁶ on a obtenu les valeurs suivantes de résistance à la fatigue pour une inclinaison de la surface du cordon inférieure à 45° par rapport au plan de la tôle.

Désignation des cordons		ρ_u	ρ_o	ρ_U
Cordons frontaux	G IV St 37 (chalumeau)	2,0	12,5	11,0 kg/mm ²
	IV St 37 (arc)	2,0	10,8	9,3 kg/mm ²
		(électrodes nues)		

Les essais de Dahlem concordent parfaitement avec les essais de Stuttgart mentionnés en 5b en ce qui concerne la soudure au chalumeau. Si l'on compare la valeur obtenue à Stuttgart, soit $\rho_U = 7 \text{ kg/mm}^2$ sous une inclinaison de 45° du cordon d'angle frontal, valeur obtenue par soudure à l'arc, avec la valeur ci-dessus obtenue à Dahlem, soit $\rho_U = 9,3 \text{ kg/mm}^2$, l'amélioration résultant de la plus faible inclinaison de la section du cordon de soudure est nettement mise en évidence. Il n'est d'ailleurs pas impossible que l'emploi d'électrodes enrobées ou d'électrodes à âme spéciale permette encore d'améliorer la zone de transition, de telle sorte que l'on puisse obtenir des résistances à la fatigue encore meilleures, avec la soudure à l'arc également.

d) Avec les cordons de soudure suivant figure 22 (assemblages en croix), la résistance à la fatigue par rapport à l'origine a pu être notablement augmentée

¹⁶ „Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen“, Berlin 1935, Ed. V.D.I.

par un double chanfreinage des tôles. Ces soudures ont été effectuées à l'arc sur tôles en acier St. 52 avec électrodes spéciales. On a obtenu :

Nature de l'essai	a	b	c
Traction statique	48,2	56,7	58,2 kg/mm ²
Fatigue par rapport à l'origine	9,5 ¹⁷	11	15

L'écoulement des lignes de force se fait dans les conditions les plus favorables dans le cas de la figure 22; il est d'ailleurs à remarquer que le double chanfreinage des tôles améliore également les conditions de l'essai statique (charpentes ordinaires).

Dörnen a utilisé cette disposition pour l'assemblage de la tôle d'âme sur la membrure. Il a même été jusqu'à faire laminer les semelles de membrure en conséquence et a pu ainsi remplacer les deux cordons de soudure en angle par un cordon en bout en X (figure 23).

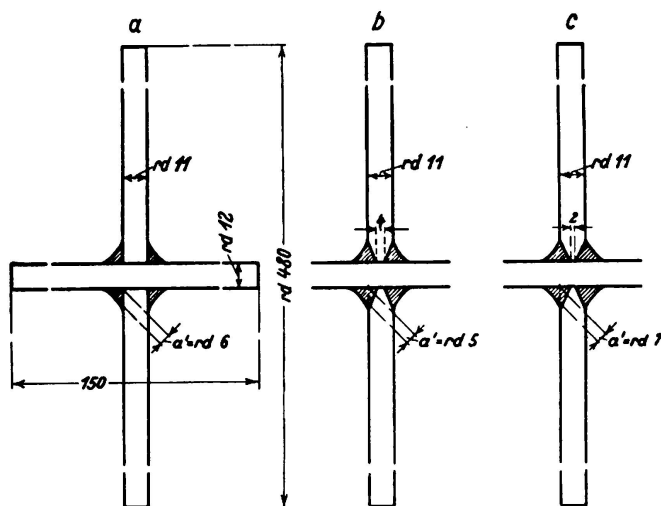


Fig. 22.

Assemblages en croix soudés à l'arc.

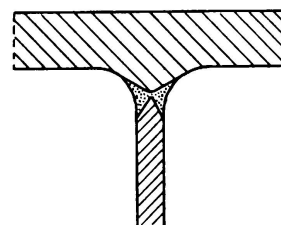


Fig. 23.

6° — Combinaison des cordons en bout et des cordons d'angle.

Au Laboratoire d'Essai des Matériaux de Stuttgart, on a étudié si l'emploi de couvre-joints, au-dessus des assemblages bout à bout, était susceptible de donner une amélioration de la résistance à la fatigue. Les couvre-joints constituent en eux-mêmes un renforcement, mais par suite de la présence des cordons d'angle, il se produit en d'autres endroits des écarts de contraintes qui dépendent des formes des cordons et du rapport entre l'épaisseur des couvre-joints et celle de la tôle. La figure 24 montre qu'à l'essai statique de traction, le cordon de soudure bout à bout s'est fissuré à $\sigma_B = 30,4 \text{ kg/mm}^2$ et qu'après adjonction du couvre-joints, la résistance à la traction a atteint $\sigma_B = 38,4 \text{ kg/mm}^2$.

¹⁷ D'après le Rapport Commun de Dahlem-Dresde, dans le cas du tableau 2, G II E (St. 37), on a obtenu avec une contrainte initiale de 2 kg/mm^2 , une résistance à la fatigue de $10,5 \text{ kg/mm}^2$, ce qui correspond à une résistance aux efforts répétés non alternés de $9,5 \text{ kg/mm}^2$; la concordance est entière.

La rupture s'est produite à l'endroit de la striction courante dans les essais statiques. En matière de charpentes ordinaires, on peut donc réaliser un renforcement par couvre-joints qui permet d'utiliser intégralement le barreau.

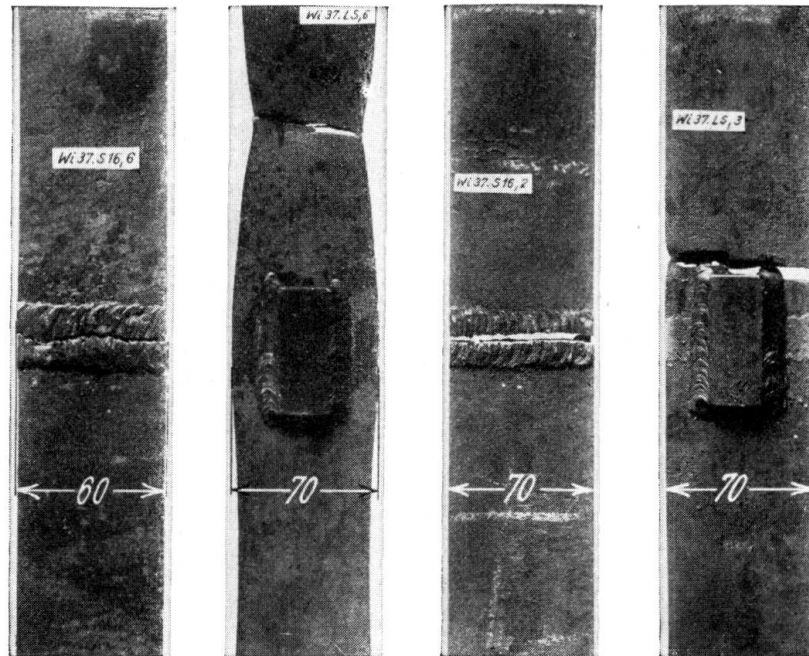


Fig. 24.

Essais statiques de traction

 σ_B 30,438,4 kg/mm²

Essais dynamique de traction

 σ_U 912 kg/mm²

Fig. 24. Soudures bout à bout avec et sans couvre-joints acier St. 37. soudure à l'arc.

A l'essai de fatigue à la traction, la résistance aux efforts répétés non alternés était $\sigma_U = 9$ kg/mm² pour le cordon de soudure en bout seul; avec couvre-joint soudé, on a obtenu $\sigma_U = 12$ kg/mm². Cette soudure bout à bout donnant 9 kg/mm² n'était en somme que médiocre et elle a pu être effectivement améliorée

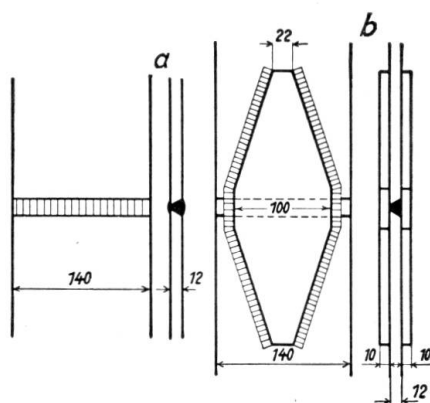


Fig. 25.

 σ_U 1310 kg/mm²

Essais dynamiques de traction sur
soudures à l'arc sur acier St. 37,
avec racine reprise à l'envers.

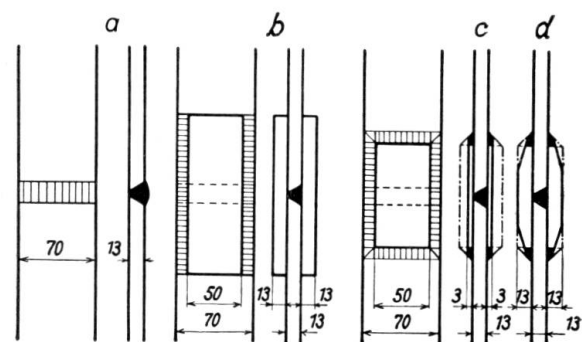


Fig. 26.

 σ_U 12

13

17

18 kg/mm²

Essais dynamiques de traction sur soudures au
chalumeau sur acier St. 37, avec racines non
reprises.

par les couvre-joints, quoique dans une proportion beaucoup moindre que ce que l'on aurait pu obtenir avec une bonne soudure en bout. Dans le cas de la figure 25, la résistance d'un assemblage par soudure bout à bout de meilleure qualité donnant 13 kg/mm^2 a même été, par l'adjonction de couvre-joints, abaissée à $\sigma_U = 10 \text{ kg/mm}^2$; la rupture s'est produite à l'extrémité des couvre-joints, au commencement du cordon d'angle. La figure 26 se rapporte à un assemblage par soudure bout à bout, dans lequel la base du cordon n'a pas été reprise et qui donnait une résistance aux efforts répétés non alternés $\sigma_U = 12 \text{ kg/mm}^2$ (26a) et qui a été amené à 18 kg/mm^2 par adjonction et usinage de couvre-joints suivant disposition 26d. Cette valeur peut d'ailleurs être également réalisée avec une soudure bout à bout convenablement reprise.

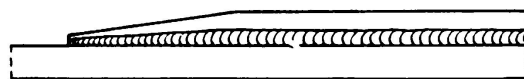


Fig. 27.

On pourra tenir compte de ces résultats par exemple dans l'assemblage des semelles de membrures; lorsque les conditions locales empêcheront en effet la reprise des soudures bout à bout, leur qualité pourra être considérée comme douteuse. Il résulte également de cet essai que dans les ouvrages soumis à des contraintes dynamiques, il est bon d'amincir les extrémités des semelles (suivant figure 27), afin de ménager un écoulement progressif des lignes de force. Une telle disposition n'est pas nécessaire dans le cas des charpentes ordinaires.

7° — Résumé des résultats des essais de résistance à la fatigue.¹⁸

a) Les assemblages soudés qui sont soumis à des contraintes purement statiques atteignent des résistances à la traction qui sont de l'ordre de celle du métal de base ($\sigma_B = 37$ à 42 kg/mm^2). Au cours des essais, on a constaté la formation de la striction habituelle.

b) Les mêmes assemblages soudés, essayés au pulsateur ou au pont oscillant, n'ont donné, à $2 \cdot 10^6$ alternances, que les valeurs suivantes de résistance aux efforts répétés non alternés:

$\sigma_U = 13$ à 18 kg/mm^2 pour les soudures bout à bout,

$\sigma_U = 6,5$ à $10,3 \text{ kg/mm}^2$ pour les soudures frontales,

$\sigma_U = 8$ à 12 kg/mm^2 pour les soudures latérales.

On a obtenu la forme usuelle de rupture par fatigue. Les soudures bout à bout se sont donc mieux comportées que les soudures en angle.

c) Les ruptures par fatigue ont intéressé, dans la plupart des cas, le métal de base lui-même et se sont fréquemment amorcées sur de petites cavités de surface, à la zone de transition entre le cordon de soudure et la tôle (effet de résilience) (figure 28).

d) Dans les soudures bout à bout dont la base n'est pas reprise à l'envers, la résistance aux efforts répétés non alternés tombe à environ 0,7 fois celle que donnent les assemblages avec reprise.

¹⁸ Voir *Kommerell*: Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten, 4^{ème} édition, II^{ème} partie, Ponts de Chemin de Fer à parois pleines.

e) Si les soudures bout à bout sont exécutées dans les meilleures conditions et disposées à 45° , on obtient, sur les parties d'ouvrages travaillant à la traction, en acier St. 37, une élévation de la résistance aux efforts répétés non alternés de 18 à 22 kg/mm². Les ruptures se produisent au milieu des cordons en aa (figure 29).

f) Au cours d'un essai de recouvrement d'un assemblage bout à bout par des couvre-joints, la résistance aux efforts répétés non alternés qui était initialement de 13 kg/mm², valeur d'ailleurs médiocre, est tombée à 10 kg/mm². La rupture s'est produite au commencement du cordon d'angle, au voisinage des couvre-joints.

g) Dans tous les cordons d'angle dans lesquels la soudure n'était pas absolument intimement exécutée jusqu'à la racine du cordon, on a constaté de très faibles valeurs de la résistance à la fatigue.

h) Contrairement au point de vue antérieurement admis, les soudures d'angle frontales exécutées avec cordons légers et passage progressif du cordon à la tôle ont donné de meilleurs résultats que les soudures à cordons bombés.

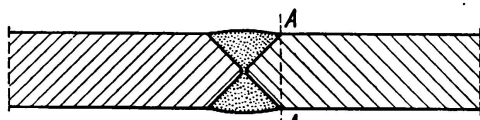


Fig. 28.

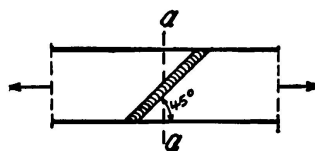


Fig. 29.

Soudure bout à bout inclinée à 45° soigneusement usinée.

i) Aux endroits où sont prévus des cordons d'angle frontaux, ou lorsque des éléments sont assemblés par soudures latérales à d'autres éléments traversants, en somme partout où commencent ou finissent des cordons latéraux, les contraintes admissibles dans la partie d'ouvrage correspondante elle-même doit être ramenée à :

$$\sigma = \alpha \sigma_{\text{adm}}^{19}$$

La valeur de α dépend du rapport $\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{max}}}$

(voir Tableau 2 V, lignes 14 à 17, page 32).

k) Si aux endroits où commencent ou finissent les cordons d'angle, le passage de la soudure à la tôle de base et aux parties y assemblées est assuré très progressivement, on obtient une notable amélioration de la résistance à la fatigue.

l) La forme du cordon de soudure, en particulier à la transition entre la soudure et le métal de base, joue ici un rôle très important, son influence est notablement plus grande que celle de la nature du métal d'apport employé.

m) Les résultats des essais de résistance à la fatigue au pont oscillant concordent, dans l'essentiel, avec ceux du pulsateur.

n) Il n'a pas été constaté de différence essentielle entre les éléments d'ouvrages en acier St. 37 et en acier St. 52 au cours des essais de résistance à la fatigue.

¹⁹ L'abréviation «adm» correspond à l'abréviation allemande «zul».

L'emploi des aciers de construction à haute résistance ne prend un intérêt nettement marqué que dans le cas des fortes contraintes initiales.

o) Les essais de résistance à la fatigue ayant montré que les valeurs de résistance à la fatigue par rapport à l'origine sont souvent faibles alors que les essais purement statiques sur les mêmes éprouvettes donnent d'excellentes valeurs. de résistance à la traction, il convient de soumettre également les baguettes d'apport destinées à la construction des ponts à des essais de résistance à la fatigue.

p) Tout récemment, après la publication du Rapport du Comité d'Etudes, des essais de résistance à la fatigue effectués sur cordons d'angle continus soumis à des contraintes en direction longitudinale ont donné des valeurs de résistance aux efforts répétés non alternés aussi élevées que des cordons de soudure bout à bout ($\sigma_U = 16$ à 18 kg/mm^2).

q) Jusqu'à maintenant et principalement pour les éléments d'ouvrages soumis à des contraintes de traction de nature dynamique, on considérait, d'une manière purement intuitive, les soudures d'angle comme préférables; or les essais de fatigue ont montré que des cordons de soudure en bout convenablement exécutés étaient notablement meilleurs. Ceci provient de ce fait que dans les soudures bout à bout, l'écoulement des lignes de force se fait d'une manière beaucoup plus naturelle alors que dans les assemblages par cordons d'angle, ces lignes de force sont souvent déviées de leur orientation primitive et que des modifications brusques de section provoquent des «pointes» dans les contraintes. Or l'écoulement non perturbé des lignes de force est tout particulièrement important dans les assemblages soudés soumis à des contraintes dynamiques. Les contraintes admissibles dans les soudures bout à bout peuvent ainsi être plus élevées que dans les soudures d'angle et ceci — ainsi que nous le verrons plus loin — se traduit également favorablement sur les dimensions des pièces à assembler elles-mêmes. On se trouvera donc amené, ne serait-ce que pour des motifs d'ordre économique, à adopter partout où cela est possible, dans la construction des ouvrages soumis à des contraintes dynamiques, les cordons de soudure en bout. On y trouve également cet avantage que ces cordons une fois terminés se prêtent plus facilement à un contrôle de qualité (rayons X) que les cordons d'angle.

r) En ce qui concerne le calcul des ponts soudés, on admettait qu'il fallait seulement, pour les cordons de soudure prévoir des dimensions permettant une exécution parfaite des ouvrages; or les résultats des essais de fatigue ont montré qu'il fallait accorder tout autant d'attention aux éléments à assembler eux-mêmes; en effet, au cours de ces essais, les ruptures se sont souvent produites non pas dans les cordons de soudure, mais dans les pièces elles-mêmes et généralement dans les zones de transition. Les contraintes admissibles dans les parties des ouvrages elles-mêmes ne doivent donc pas être supérieures à celles des cordons de soudure.

s) Les essais ont également montré que pour les assemblages soumis à des contraintes dynamiques, la soudure au chalumeau et la soudure à l'arc doivent en général être considérées comme équivalentes. Si les valeurs inférieures des résistances obtenues avec les cordons de soudure en bout soudés au chalumeau sont quelque peu au-dessus de celles que donne la soudure à l'arc, les deux

modes de soudure permettent néanmoins d'atteindre les mêmes valeurs maxima, par exemple $\sigma_U = 18 \text{ kg/mm}^2$. Le même fait se produit pour les soudures d'angle. Avec les deux modes de soudure, les éprouvettes se sont rompues à partir des extrémités des cordons d'angle latéraux. Le comportement plus favorable des cordons d'angle frontaux soudés au chalumeau doit être attribué à la forme de section plus favorable de ces cordons — transition plus progressive entre la surface du cordon et la surface du métal de base. Pour une même forme superficielle des cordons, on a obtenu des résultats tout aussi bons avec la soudure à l'arc.

D. — Contraintes admissibles σ_{Dadm} tenant compte de la résistance à la fatigue.

1° — *Généralités.*

Il n'est possible de réaliser pratiquement un mode de construction rationnel et simple que si les parties de l'ouvrage qui sont sollicitées à la traction ou à la flexion sont assemblées bout à bout par soudure, sans qu'il soit nécessaire de recourir à l'emploi des couvre-joints. Les joints bout à bout doivent naturellement se trouver placés en des endroits tels que les contraintes admissibles n'y soient pas dépassées.

2° — *Le procédé γ .²⁰*

D'après les « Notions Fondamentales pour le calcul des ponts métalliques de Chemin de Fer » du Reich,²¹ il faut s'efforcer de conférer le même coefficient de sécurité aux différentes parties des ouvrages. Le procédé le plus simple et le plus clair pour appliquer ce principe consiste à ramener toutes les contraintes à la valeur σ_{adm} (contrainte admissible à la flexion dans les parties continues sans assemblages).

(Dans le calcul des barres comprimées, par exemple, on doit avoir :

$$\sigma = \omega \cdot \frac{S = \text{charge}}{F = \text{section}} \leq \sigma_{adm}$$

ω désigne ici un facteur qui tient compte des conditions de flambage et par lequel il faut multiplier la charge S , en cas d'application axiale, pour que la barre puisse être considérée, du point de vue de la contrainte admissible, comme travaillant à la traction.)

Une méthode analogue, dite « procédé γ », a été adoptée par les Chemins de Fer Allemands, tant pour les ponts soudés que pour les ponts rivés, pour permettre de faire entrer en ligne de compte la résistance à la fatigue σ_D des matériaux, dans les parties des ouvrages qui sont soumises à des contraintes oscillantes ou alternées.

Si σ_{Dadm} désigne la contrainte admissible en tenant compte de la résistance à la fatigue (en général inférieure à σ_{adm}), nous aurons pour les ponts à parois pleines :

²⁰ Voir Kommerell: „Verfahren zur Berechnung von Fachwerkstäben und auf Biegung beanspruchten Trägern bei wechselnder Belastung“; Bautechnik 1933, page 114.

²¹ „Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken der Deutschen Reichsbahn (B. E.)“, Berlin 1934, Ed.: Reichsbahn-Zentralamt Berlin, Halle'sches Ufer.

$$\sigma_{D \text{ adm}} = \frac{M \text{ max}}{W} = \frac{\sigma_{\text{adm}}}{\gamma} \quad (2)$$

d'où :

$$\sigma = \gamma \cdot \frac{M \text{ max}}{W} = \sigma_{\text{adm}} \quad (3)$$

Par suite si l'on met en parallèle la valeur de $\gamma \cdot \frac{M \text{ max}}{W}$ avec celle de σ_{adm} , γ représente le coefficient (≥ 1) par lequel il faut multiplier le moment fléchissant maximum pour que la poutre puisse être calculée comme si elle n'avait à supporter qu'un moment fléchissant $M \text{ max}$, produit par une charge toujours constante (comme par exemple en charpente ordinaire).

Si en tenant compte du coefficient de choc φ , $M \text{ min}$ et $M \text{ max}$ représentent les valeurs extrêmes des moments fléchissants — c'est-à-dire les valeurs les plus défavorables qui puissent apparaître au passage d'un train — et si $M \text{ min}$ représente le plus petit moment fléchissant en valeur absolue et $M \text{ max}$ le plus grand, on arrive aux conclusions suivantes :

Pour les poutres soumises à une charge toujours constante, on aurait à écrire :

$$\sigma = \frac{M \text{ max}}{W} \leq \sigma_{\text{adm}}. \quad (4)$$

Par contre dans les ponts, où sous l'influence de la charge roulante, se manifestent des contraintes alternées (contraintes extrêmes avec signes différents) ou des contraintes seulement oscillantes (contraintes extrêmes de même signe), il y aurait à tenir compte non seulement du plus grand moment fléchissant $M \text{ max}$, mais également encore d'une partie du plus petit moment fléchissant. L'évaluation de l'influence ci-dessus doit donc se faire sous intervention des coefficients a et b qui sont encore à déterminer et d'après la relation ci-après :

$$\sigma = \frac{a \cdot M \text{ max} + b \cdot M \text{ min}}{W} = \left(a + b \cdot \frac{M \text{ min}}{M \text{ max}} \right) \frac{M \text{ max}}{W} \leq \sigma_{\text{adm}} \quad (5)$$

Or l'expression entre parenthèses n'est pas autre chose que la valeur de γ de la relation (3).

On a donc :

$$\gamma = a + b \cdot \frac{M \text{ min}}{M \text{ max}} \quad (6)$$

et γ doit être considéré comme une fonction linéaire de $\frac{M \text{ min}}{M \text{ max}}$.

On a par exemple dans les ponts rivés :

$$\gamma = 1 - 0,3 \cdot \frac{M \text{ min}}{M \text{ max}} \quad (7)$$

Ainsi qu'il est indiqué dans mon Rapport au Premier Congrès de Paris, page 334, les cordons de soudure des ponts étaient antérieurement calculés à l'aide de la formule suivante :

$$M = M \text{ max} + \frac{1}{2} (M \text{ max} - M \text{ min}) = M \text{ max} \left(1,5 - 0,5 \cdot \frac{M \text{ min}}{M \text{ max}} \right) \quad (8)$$

d'où :

$$\gamma = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{M_{\min}}{M_{\max}} \quad (9)$$

Ainsi qu'il résulte du tableau 2, page 12, les résistances à la fatigue diffèrent considérablement dans les divers types de cordons de soudure et de plus suivant la qualité de l'exécution de ces cordons. Les résistances aux efforts alternés varient entre 4,2 et 13 kg/mm² et les résistances aux efforts répétés non alternés varient entre 8 et 22 kg/mm².

Dans le Rapport du Comité d'Etudes (page 46, figures 16 ** et 17 **) j'avais proposé pour les cordons de soudure d'angle, qui ne peuvent pas être soumis à des contraintes aussi élevées que les parties continues, sans assemblages, des ouvrages, d'adopter pour γ des valeurs spéciales. A la suite d'une étude ultérieure, j'ai renoncé à cette solution, car il aurait encore fallu déterminer des valeurs particulières de γ pour un grand nombre d'autres cas dans lesquels les contraintes admissibles doivent également être plus faibles que dans les parties continues, sans assemblages, des ouvrages. Il en serait résulté une grande complication et un manque de netteté des Règlements. La tentative qui a été faite de simplifier les Règlements dans toute la mesure du possible en adoptant une valeur de γ correspondant au cas le plus défavorable et en introduisant seulement un coefficient d'amenuisement $\alpha = 0,65$ n'a pas conduit à un résultat acceptable, car les valeurs de γ auraient été si élevées que les poutres soudées statiquement indéterminées n'auraient pas pu concurrencer les poutres rivées. La solution a été trouvée dans l'adoption de valeurs variables de α (coefficients de forme) (voir tableaux 2 V et 3 V).

Lorsque, en tenant compte de la valeur de γ , des parties d'ouvrages continues sans assemblages peuvent être soumises à des contraintes σ_{adm} de 1400 pour l'acier St. 37 ou de 2100 pour l'acier St. 52, les contraintes admissibles deviennent, dans les cas où une contrainte aussi élevée que ci-dessus n'est pas possible :

$$\sigma'' = \alpha \sigma_{adm}$$

α étant lu dans les tableaux 2 V et 3 V. Afin de tout ramener à une échelle unique (à savoir σ_{adm}), on a introduit la valeur :

$$\frac{\sigma''}{\alpha} \leq \sigma_{adm}$$

et on a été ainsi conduit à la formule :

$$\sigma_1 = \frac{\gamma}{\alpha} \cdot \frac{M_1 \max}{W_n} \leq \sigma_{adm}. \quad (5 V)$$

3° — Diagrammes des contraintes.

Il est évident que l'on ne peut pas aller en ce qui concerne les contraintes admissibles $\sigma_{W adm}$ et $\sigma_{U adm}$ jusqu'aux valeurs de résistance à la fatigue que donnent les pulsateurs ou les ponts oscillants à $2 \cdot 10^6$ alternances, même si les charges oscillantes introduites dans les calculs de résistance ne doivent être atteintes que rarement. Il peut exister à l'intérieur des matériaux et dans les assemblages soudés des irrégularités qui n'ont pas été mises en évidence au cours

de la réception, si minutieuse eût-elle été. Dans la détermination de la marge entre la résistance à la fatigue donnée par le pulsateur à $2 \cdot 10^6$ oscillations et les contraintes admissibles dans les assemblages soudés, la Commission de Travail est partie, sur ma proposition, de l'expérience très large déjà acquise dans la construction des ponts de chemin de fer métalliques rivés. Pour ces ponts, on a d'après les Notions Fondamentales pour le Calcul des Ponts Métalliques de Chemin de fer (que nous désignerons par la suite sous les initiales conventionnelles « B. E »), et en tenant compte des efforts principaux pour l'acier St. 37:

$$\sigma_{adm} = 1400 \text{ kg/cm}^2$$

Si l'on tient compte du vent et des efforts additionnels, on a:

$$\sigma_{adm} = 1600 \text{ kg/cm}^2$$

Ces efforts du vent et efforts additionnels n'interviennent pas à chaque passage de train; ils agissent plutôt dans le même sens qu'une charge préliminaire (charge fixe). Tenir compte des efforts dûs au vent et des efforts additionnels revient donc à augmenter la charge permanente de 200 kg/cm^2 . Comme toutefois l'amplitude des variations de charge σ_w peut être considérée comme étant de même grandeur dans le domaine considéré, il en résulte que la résistance à la fatigue, en tenant compte des efforts dûs au vent et des efforts additionnels, est également plus élevée de 200 kg/cm^2 . Il suffit donc d'étudier les conditions effectives en ne prenant en considération que les efforts principaux. A titre de comparaison, on a effectué des essais de résistance à la fatigue sur des barres rivées. La résistance à la fatigue par rapport à l'origine, dans les assemblages rivés (de dimensions analogues à celles des assemblages soudés) a été $\sigma_{Uz} = 15 \text{ kg/mm}^2$ (voir courbe de *Wöhler*, page 16, figure 34 du Rapport du Comité d'Etudes). On a trouvé des valeurs semblables et même fréquemment des valeurs encore plus faibles dans les essais au pulsateur, principalement lorsque les surfaces en recouvrement avaient été au préalable passées à une couche de minium. La marge entre la résistance à la fatigue par rapport à l'origine et la contrainte admissible est donc:

$$\sigma_U - \sigma_{adm} = 15 - 14 = 1 \text{ kg/mm}^2$$

Les assemblages soudés convenablement exécutés sont absolument équivalents et souvent même supérieurs aux assemblages rivés. Il n'y a donc aucune raison pour que, dans le cas des ponts soudés, on admette des conditions plus défavorables que dans le cas des ponts rivés. La commission de Travail a donc décidé de prendre pour valeurs de σ_{adm} des valeurs s'écartant d'au moins 1 kg/mm^2 au-dessous des valeurs de la résistance à la fatigue pour $2 \cdot 10^6$ alternances.

(Avec cette méthode, il devient inutile d'étudier si la fréquence rapide des variations de charge au pulsateur permet de tirer des conclusions directes sur le régime des contraintes auxquelles sont soumis les ponts, régime dans lequel les variations de charge se manifestent à une allure beaucoup plus lente.)

Les valeurs de σ_{adm} peuvent donc toujours être choisies à une marge de 1 kg/mm^2 au-dessous des valeurs de la résistance à la fatigue sous $2 \cdot 10^6$ alternances.

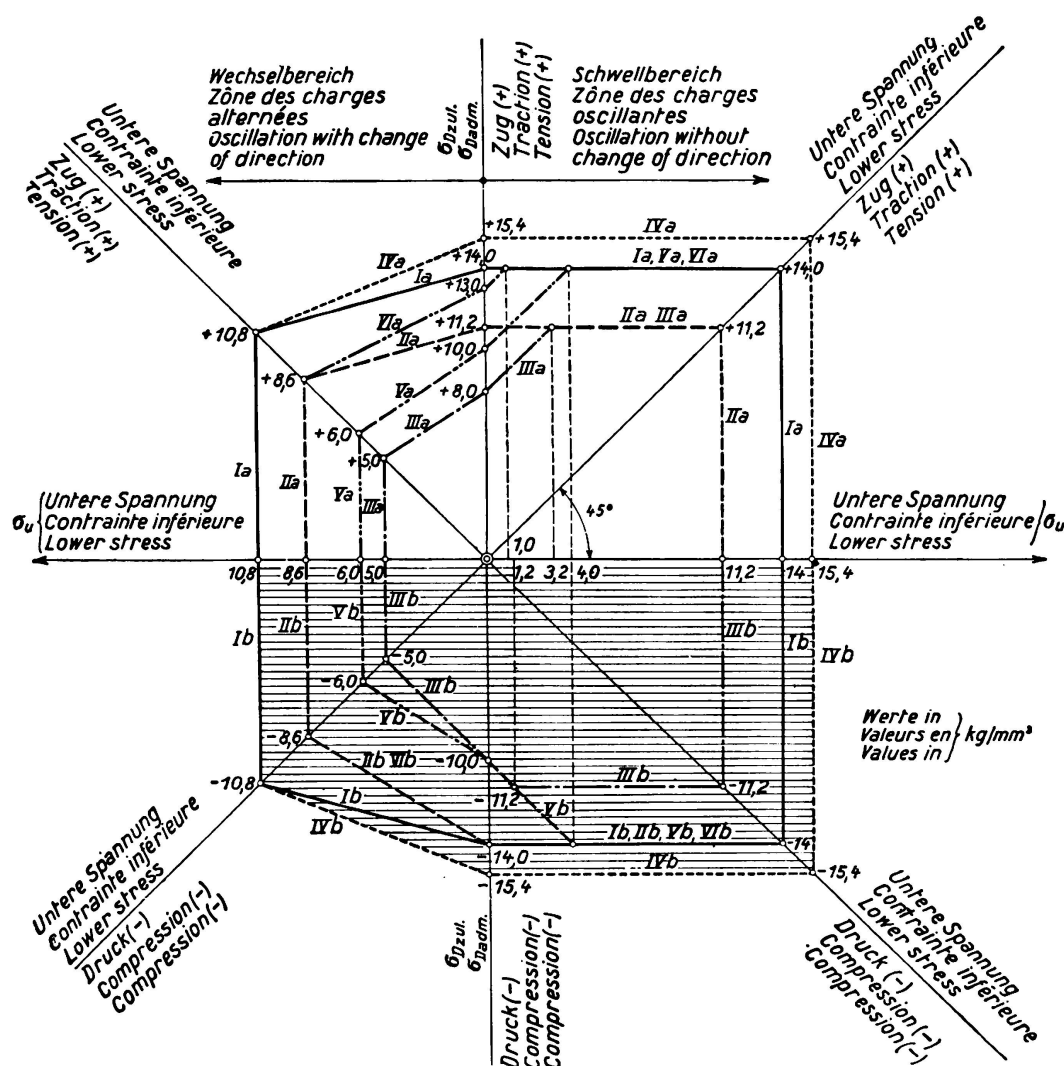
Les bases essentielles du calcul des ponts de chemin de fer à parois pleines

soudées sont constituées par les *diagrammes des contraintes*²² qui sont représentés dans le tableau 1 V pour l'acier St. 37 et dans le tableau 2 V pour l'acier St. 52 et qui font sous cette forme l'objet de la décision définitive de la Commission. Je renverrai en particulier à ce sujet à mes « Commentaires », 2^{ème} partie, page 30 et suivantes. Le mode de représentation correspond aux figures 1 et 2, pages 3 et 4.

Diagramme des contraintes admissibles $\sigma_{U adm}$ dans le cas des ponts soudés en acier St. 37.

(Les contraintes sont indiquées en kg/mm².)

Figure 1 V.



Ia, Ib Parties d'ouvrages ne comportant pas de joints, dans les domaines de la traction et de la compression;

IIa Parties d'ouvrages comportant des joints, dans le domaine de la traction, au voisinage des cordons de soudure bout à bout et dans ces cordons eux-mêmes, avec reprise des racines des cordons et usinage;

²² Que l'on désigne en Allemagne par l'expression imagée de « maisonnettes » (N. du Tr.) (Spannungshäuschen).

- IIb Comme en IIa, mais dans le domaine de la compression;
 IIIa, IIIb Comme en IIa, IIb, mais lorsqu'il n'est pas possible de reprendre les cordons par la racine;
 IVa, IVb Contraintes principales admissibles suivant la formule:

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_1^2 + 4 \tau_1^2}$$

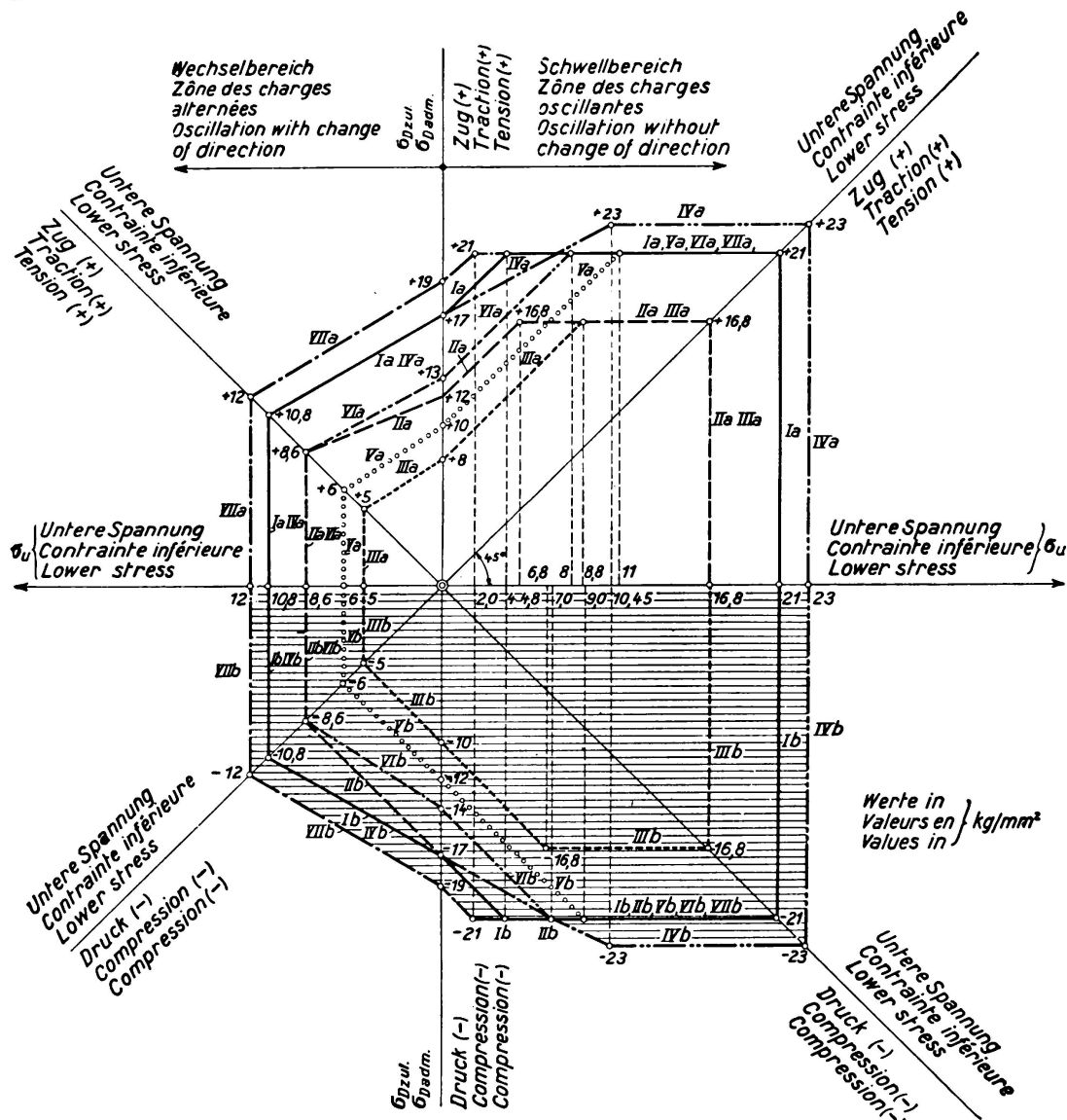
Va, Vb Parties d'ouvrages au voisinage de cordons frontaux et au commencement de cordons latéraux, le raccordement des cordons frontaux et les extrémités des cordons latéraux n'ayant pas été usinés.

Via, Vlb Comme en Va, Vb mais avec usinage soigné du raccordement des cordons frontaux et des extrémités des cordons latéraux.

Diagramme des contraintes admissibles σ_{Dadm} dans le cas des ponts soudés en acier St. 52.

(Les contraintes sont indiquées en kg/mm².)

Figure 2 V.



- Ia, Ib Parties d'ouvrages ne comportant pas de joints, dans les domaines de la traction et de la compression, pour un trafic intense (plus de 25 trains par jour sur chaque voie);
- IIa Parties d'ouvrages comportant des joints, dans le domaine de la traction, au voisinage des cordons de soudure bout à bout et dans ces cordons eux-mêmes, avec reprise des racines des cordons et usinage;
- IIb Comme en IIa, mais dans le domaine de la compression;
- IIIa, IIIb Comme en IIa, IIb, mais lorsqu'il n'est pas possible de reprendre les cordons par la racine;
- IVa, IVb Contraintes principales admissibles suivant la formule:

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_1^2 + 4 \tau_1^2}$$

- Va, Vb Parties d'ouvrages au voisinage de cordons frontaux et au commencement de cordons latéraux, le raccordement des cordons frontaux et les extrémités des cordons latéraux n'ayant pas été usinés.
- VIa, VIb Comme en Va, Vb mais avec usinage soigné des raccords des cordons frontaux et des extrémités des cordons latéraux;
- VIIa, VIIb Comme en Ia, Ib mais pour un trafic faible (jusqu'à 25 trains par jour sur chaque voie).

4° — *Commentaires concernant les différentes courbes $\sigma_{D adm}$.*

Considérons comme point de départ les résistances à la fatigue σ_D qui figurent dans le Rapport du Comité d'Etude (voir Tableau 2, page 6).

a) — *Acier St. 37.*

- 1° — Courbes Ia, Ib pour parties d'ouvrages ne comportant pas de joints, dans les domaines de la traction et de la compression.

Suivant le tableau 2, colonne 3, ligne 1, on a pour les cordons de soudure bout à bout de qualité 1 (racine reprise, passage progressif du cordon à la tôle): $\sigma_w = 11 \text{ kg/mm}^2$. La contrainte admissible avec $M_{\min} = -M_{\max}$, serait donc: $\sigma_{w adm} = 11 - 1 = 10 \text{ kg/mm}^2$. En se basant sur des essais plus récents, les services d'Essais des Matériaux représentés au Comité de Travail ont considéré qu'il était possible d'admettre, comme pour les ponts rivés:

$$\sigma_{w adm}^{Ia, Ib} = \pm 10,8 \text{ kg/mm}^2$$

Pour σ_U le tableau 2 donne, pour ces cordons, $\sigma_U = 18 \text{ kg/mm}^2$, de telle sorte que l'on pourrait avoir:

$$\sigma_{U adm} = 18 - 1 = 17 \text{ kg/mm}^2$$

Comme on tenait toutefois à ne pas dépasser

$$\sigma_{U adm}^{Ia, Ib} = \pm 14 \text{ kg/mm}^2$$

c'est cette valeur qui a été adoptée pour $M_{\min} = 0$ par la Commission de Travail, tant en traction qu'en compression. L'allure de la courbe Ia, Ib est donc, pour les ponts soudés en acier St. 37, la même que pour les ponts rivés.

Ces courbes Ia, Ib ne s'appliquent toutefois pas, ainsi qu'il a été envisagé initialement, aux cordons de soudure bout à bout soignés, mais seulement aux parties d'ouvrages ne comportant pas de joints. Pour les soudures bout à bout et étant donné les différentes possibilités d'exécution, il a été établi des courbes spéciales (voir 2 et 3 ci-dessous).

- 2° — Courbe IIa pour parties d'ouvrages comportant des joints, dans le domaine traction, au voisinage des cordons de soudure bout à bout et dans ces cordons eux-mêmes, avec reprise des racines et usinage des cordons.

Bien que les résistances à la fatigue du tableau 2 aient été déduites d'essais de traction, la Commission de Travail a décidé de réduire les valeurs de σ_{adm} dans le domaine de la traction à 0,8 fois celles de la courbe Ia, mais d'admettre que les parties d'ouvrages soumises à la traction pourraient être soudées bout à bout, mais sans aucun couvre-joint; pour augmenter le coefficient de sécurité et dans les membrures soumises à la traction, les cordons de soudure en bout doivent être disposés à 45°, les racines de ces cordons doivent être reprises à l'envers et le raccordement entre le métal d'apport et la tôle doit être réalisé progressivement par usinage. On a donc :

$$\sigma_{W adm}^{IIa, IIb} = \pm 10,8 \cdot 0,8 = \text{env. } \pm 8,6 \text{ kg/mm}^2,$$

$$\sigma_{U adm}^{IIa} = 14 \cdot 0,8 = 11,2 \text{ kg/mm}^2.$$

Dans le domaine de la compression, on a :

$$\sigma_{U adm}^{Ib} = -14 \text{ kg/mm}^2,$$

de même que dans les parties d'ouvrages ne comportant pas de joints (courbe Ib).

- 3° — Courbe IIIa, mêmes prévisions qu'en IIa, mais impossibilité de reprendre les racines des cordons à l'envers.

Ce cas se présente rarement. La Commission de Travail a décidé d'adopter ici les valeurs suivantes :

$$\sigma_{W adm}^{IIIa} = 5,0 \text{ kg/mm}^2,$$

$$\sigma_{U adm} = 8,0 \text{ kg/mm}^2.$$

Aussi bien dans le domaine de la traction que dans le domaine de la compression, les courbes de $\sigma_{D adm}$ doivent monter à 45°, car dans le domaine des charges seulement oscillantes (non alternées) considérées, l'amplitude de variation de la charge peut être considérée comme ayant la même valeur. La courbe IIIa atteint donc la contrainte de 11,2 kg/mm² pour une contrainte inférieure de 11,2 — 8 = 3,2 kg/mm².

On a pour la courbe IIIb :

$$\sigma_{U adm}^{IIIb} = -10 \text{ kg/mm}^2.$$

La courbe IIIb atteint la valeur de — 11,2 kg/mm² pour une contrainte inférieure de :

$$-(11,2 - 10,00) = -1,2 \text{ kg/mm}^2.$$

4° — Courbes IVa, IVb pour contrainte admissible principale suivant la formule:

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_1^2 + \tau_1^2}$$

Pour $M_{\min} = -M_{\max}$, on a adopté:

$$\sigma_{w \text{ adm}}^{\text{IVa, IVb}} = \pm 10,8 \text{ kg/mm}^2$$

comme pour les courbes Ia, Ib. Comme toutefois avec l'acier St. 37 et pour $M_{\min} = 0$, les résistances à la fatigue ne sont pas utilisées, la Commission a jugé pouvoir adopter la valeur:

$$\sigma_{U \text{ adm}}^{\text{IVa, IVb}} = 15,4 \text{ kg/mm}^2 \quad \left(\text{soit } 14 + \frac{14}{10} \right)$$

Les essais du Comité d'Etudes ne se rapportaient qu'à des éléments travaillant à la traction dans lesquelles les ruptures à l'essai de fatigue se sont produites en règle générale en A ou en B, c'est-à-dire au commencement des cordons d'angle (modification de section) (figure 30).

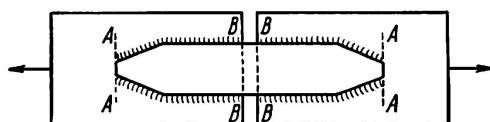


Fig. 30.

Comme toutefois les cordons destinés à assembler les tôles d'âme avec les semelles de membrure sont soit des cordons d'angle continus, soit des cordons en bout, des essais ont été effectués, sur ma proposition, à Wittenberge et au Laboratoire d'Essai des Matériaux de l'Office Central des Chemins de Fer du Reich; ces essais de fatigue à la traction sur pulsateurs, portaient sur des cordons d'angle et des soudures bout à bout continus, chargés longitudinalement, suivant figures 31 et 32. Ces essais ont confirmé les prévisions; *en particulier, ces*

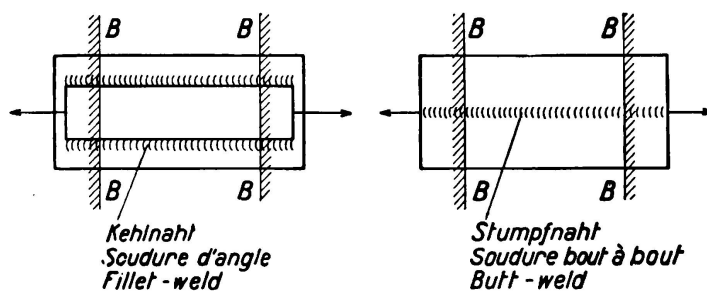


Fig. 31.

Fig. 32.

cordons d'angle et en bout continus peuvent être chargés au moins autant que des cordons de soudure en bout normaux à la direction des efforts. En pratique, on a atteint des résistances aux efforts répétés non alternés ($M_{\min} = 0$) de 18 kg/mm^2 . Par comparaison, on a essayé également la disposition de la figure 31 avec cordons d'angle discontinus au lieu de cordons continus et la résistance à la fatigue a sensiblement diminué par suite de l'effet de discontinuité.

5° — Courbes Va, Vb pour parties d'ouvrages au voisinage de cordons d'angle frontaux et au commencement de cordons d'angle latéraux, avec extrémités non usinées.

La Commission de Travail n'a considéré, à Goslar, que les cordons d'angle usinés, admettant qu'étant donné les valeurs déjà faibles en soi que l'on obtient pour la résistance à la fatigue, on ne peut qu'envisager un usinage soigné des cordons (extrémités des cordons d'angle latéraux). On a tout d'abord prévu, suivant le tableau 2, colonne 6:

$$\sigma'_{W adm}^{a, b} = \pm (8,3 - 1,0) = \pm 5,3 \text{ kg/mm}^2$$

La Commission de Travail a ensuite élevé cette valeur à: $\pm 6,0 \text{ kg/mm}^2$ et a posé:

$$\sigma'_{U adm}^{a, b} = \pm 10 \text{ kg/mm}^2.$$

Dans la zone des charges oscillantes non alternées, la courbe de $\sigma_{D adm}$ doit passer sous une inclinaison de 45° jusqu'à $\pm 14 \text{ kg/mm}^2$ avec une charge inférieure de 4 kg/mm^2 , tant dans le domaine de la traction que dans le domaine de la compression.

Par ailleurs, le *Dr. Dörnen* a effectué des essais de résistance à la fatigue sur des poutres soumises à la flexion avec cordons d'angle progressifs et plaques de membrure allant en s'amincissant et la Commission de Travail de Friedrichshafen a jugé possible d'adopter la courbe ainsi trouvée pour le cas des cordons d'angle et frontaux non usinés. On a ainsi:

$$\sigma_{W adm}^{Va, Vb} = \pm 6 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{U adm}^{Va, Vb} = \pm 10 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{D adm}^{Va, Vb} = \pm 14 \text{ kg/mm}^2$$

pour une contrainte inférieure de 4 kg/mm^2 .

6° — Courbes VIa, VIb pour parties d'ouvrages au voisinage de cordons frontaux et au commencement de cordons latéraux, avec extrémités de cordons usinées.

Il a été décidé, à Friedrichshafen, à la suite de nouveaux essais, d'adopter les valeurs suivantes:

$$\sigma_{W adm}^{VIa, VIb} = \pm 8,6 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{U adm}^{VIa} = + 13,0 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{U adm}^{VIb} = - 14,0 \text{ kg/mm}^2$$

β) *Acier St. 52.*

Les essais de résistance à la fatigue ont montré, d'après le Rapport du Comité d'Etudes, que la résistance aux efforts répétés non alternés ($M_{min} = 0$) dans le cas de l'acier St. 52 (ainsi d'ailleurs que la résistance à la fatigue par efforts alternés) ne sont pas notablement plus élevées que pour l'acier St. 37. On a donc les valeurs suivantes:

1° — Courbes Ia, Ib pour parties d'ouvrages ne comportant pas de joints, en traction et en compression (trafic intense).

$$\sigma_{W adm}^{Ia, Ib} = \pm 10,8 \text{ kg/mm}^2$$

D'après le tableau 2, ligne 1, on a trouvé pour les cordons d'angle bout à bout, avec racines non reprises:

$$\sigma_U = 18 \text{ kg/mm}^2$$

de sorte que l'on a adopté:

$$\sigma_{U \text{ adm}}^{\text{Ia, Ib}} = \pm (18 - 1) = \pm 17 \text{ kg/mm}^2$$

En outre, on a considéré la courbe de $\sigma_{D \text{ adm}}$ dans le domaine des charges seulement oscillantes (non alternées) comme inclinée uniformément à 45° , de telle sorte que l'on a:

$$\sigma_{D \text{ adm}}^{\text{Ia, Ib}} = \pm 21 \text{ kg/mm}^2$$

2° — Courbes IIa, IIb pour parties d'ouvrages comportant des joints, en traction et en compression, et pour les cordons de soudure bout à bout eux-mêmes, avec reprise des cordons et usinage.

On a dans le domaine de la traction:

$$\sigma_{W \text{ adm}}^{\text{IIa}} = 0,8 \cdot 10,8 = \text{env.} + 8,6 \text{ kg/mm}^2 \text{ (comme pour l'acier St 37)}$$

$$\sigma_{U \text{ adm}}^{\text{IIa}} = + 12 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{D \text{ adm}}^{\text{IIa}} = 0,8 \cdot 21 = + 16,8 \text{ kg/mm}^2$$

pour une contrainte inférieure de $+ 4,8 \text{ kg/mm}^2$.

On a dans le domaine de la compression:

$$\sigma_{W \text{ adm}}^{\text{IIb}} = - 8,6 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{U \text{ adm}}^{\text{IIb}} = - 2 \cdot 8,6 = \text{env.} - 17 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{D \text{ adm}}^{\text{IIb}} = - 21 \text{ kg/mm}^2$$

pour une contrainte inférieure de $- 4 \text{ kg/mm}^2$.

3° — Courbes VIIa, VIIb pour parties d'ouvrages ne comportant pas de joints, en traction et en compression, pour un trafic faible.

Comme pour les ponts rivés (voir Règlements «B. E.», tableau 17), il faut distinguer pour les ponts soudés entre le trafic intense (plus de 25 trains par jour et par voie) et le trafic faible (moins de 25 trains par jour et par voie).

La Commission de Travail de Friedrichshafen a donc adopté les valeurs suivantes:

$$\sigma_{W \text{ adm}}^{\text{VIIa, b}} = \pm 12 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{U \text{ adm}}^{\text{VIIa, b}} = \pm 19 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{D \text{ adm}}^{\text{VIIa, b}} = \pm 21 \text{ kg/mm}^2$$

pour une contrainte inférieure $\pm (21 - 19) = \pm 2 \text{ kg/mm}^2$.

4° — Les autres diagrammes de contraintes pour l'acier St. 52 ont été établis d'après les mêmes principes que pour l'acier St. 37. Je renverrai à ce sujet à mes «Commentaires», 2^{ème} partie, pages 34 et suivantes.

E. — *Détermination des sections.*1° — *Généralités.*

a) Les parties d'ouvrages soumises à des contraintes oscillantes ou alternées doivent être calculées d'après les directives suivantes :

Soit : $M_I \max$ la valeur maximum du moment,

$M_I \min$ la valeur minimum du moment,

pour les moments fléchissants résultant de l'application de la charge permanente et de la charge roulante, avec le coefficient de choc — pour les courbes, résultant de l'application de la force centrifuge avec coefficient de choc — les moments fléchissants positifs étant toujours affectés du signe + et les moments fléchissants négatifs (efforts de compression) du signe —.

Si l'on a par exemple

$$M_g = + 200 \text{ tm}$$

$$\varphi M_p = + 400 \text{ tm}$$

et

$$\varphi M_p = - 600 \text{ tm}$$

on aura ainsi :

$$M_I \max = + 200 + 400 = + 600 \text{ tm}$$

$$M_I \min = + 200 - 600 = - 400 \text{ tm}$$

On aura à considérer une contrainte oscillante si $M_I \max$ et $M_I \min$ sont affectés des mêmes signes et une contrainte alternée si $M_I \max$ et $M_I \min$ sont affectés de signes opposés.

b) S'il n'était pas nécessaire de traiter les assemblages soudés différemment suivant la nature du cordon de soudure et sa position, les influences exercées par les charges oscillantes ou alternées pourraient être prises en considération comme dans le cas des ponts rivés par le procédé γ (Voir Règlements « B. E. », page 36). On aurait ainsi :

$$\sigma' = \frac{\gamma M_I \max}{W_n} \quad (4 V)$$

γ désignant le coefficient tenant compte de l'influence d'une contrainte alternée ou oscillante (contrainte de fatigue) et par lequel il faut multiplier la valeur limite maximum des moments fléchissants, etc., résultant de l'application de la charge permanente et de la charge roulante (et éventuellement des forces centrifuges), affectées du coefficient de choc φ afin que ces parties d'ouvrages puissent être traitées comme celles qui ne sont soumises à aucune contrainte alternée ou oscillante.

c) La résistance à la fatigue correspondant à chacun des différents types d'assemblages soudés est ensuite considérée sous intervention d'un coefficient α (coefficient de forme) qui peut être déduit des diagrammes des figures 1 V et 2 V et qu'indiquent les tableaux 2 V et 3 V. On doit avoir :

$$\sigma_I = \frac{\gamma M_I \max}{\alpha W_n} < \sigma_{adm} \quad (5 V)$$

(1400 pour St. 37 — 2100 pour St. 52).

Les efforts tranchants doivent être introduits également d'une manière analogue dans les calculs, avec multiplication par γ/α (la valeur de γ étant déterminée en remplaçant $M_I \text{ min}/M_I \text{ max}$ par $Q_I \text{ min}/Q_I \text{ max}$).

d) Les valeurs de γ ont été déduites des diagrammes des contraintes, en fait pour le cas de $\alpha = 1$ c'est-à-dire pour le cas d'un cordon de soudure bout à bout extrêmement soigné, dans le domaine des contraintes oscillantes et pour la membrure travaillant à la compression.

e) Les valeurs de γ dépendent du rapport $M_I \text{ min}/M_I \text{ max}$ et des signes de $M_I \text{ min}$ et de $M_I \text{ max}$.

La méthode des coefficients α (coefficients de forme) présente ce grand avantage que tout se trouve ramené à la même échelle, à savoir celle de σ_{adm} et que celui qui étudie le projet sait toujours quand et de combien il doit réduire la contrainte admissible. Cette méthode présente même un avantage du point de vue technique, car de lui-même, l'auteur du projet se trouve amené, pour des considérations d'ordre économique, à adopter de faibles valeurs de α (par exemple, il devra, à l'endroit du commencement des cordons d'angle, appliquer des dispositions différentes). Si inversement on veut connaître les contraintes calculées σ_r auxquelles sont soumises les parties de l'ouvrage sans tenir compte des valeurs de γ et de α il suffit de multiplier par α/γ la valeur de σ tirée de la formule (5 V). Exemple:

$$\sigma = \frac{1,2}{0,65} \cdot \frac{M_I \text{ max}}{W} = 1380 \text{ kg/cm}^2$$

donc:

$$\sigma_r = 1380 \cdot \frac{0,65}{1,2} = 750 \text{ kg/cm}^2.$$

2° — Le coefficient γ .

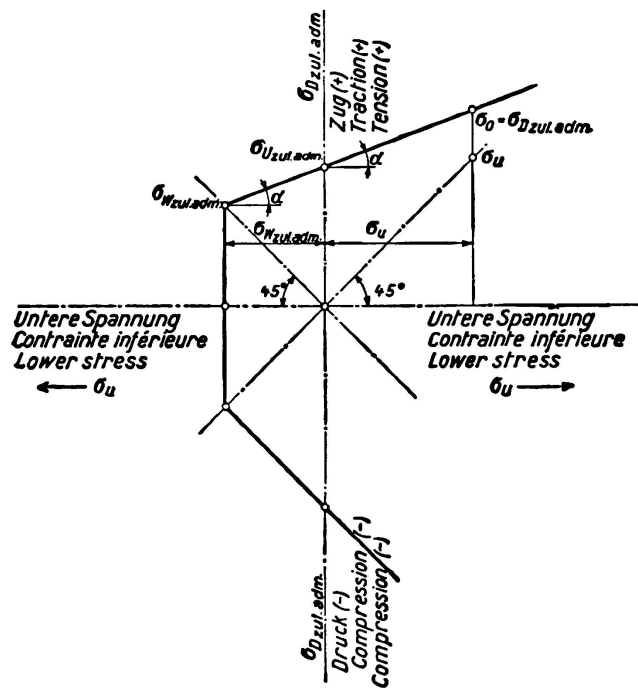


Fig. 33.

D'après la figure 33, on a:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_{U \text{ adm}} - \sigma_{W \text{ adm}}}{\sigma_{W \text{ adm}}} \quad (10)$$

Pour un point quelconque (σ_o, σ_u) , on a:

$$\sigma_o - \sigma_{U \text{ adm}} = \sigma_u \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (11)$$

d'où:

$$\sigma_o - \sigma_u \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\sigma_o}{\sigma_o} = \sigma_{U \text{ adm}}$$

ou:

$$\sigma_o = \frac{\sigma_{U \text{ adm}}}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\sigma_u}{\sigma_o}} \quad (12)$$

Mais on a par ailleurs:

$$\sigma_u = \frac{M_I \text{ min}}{W} \quad (13)$$

$$\sigma_o = \sigma_{D adm} = \frac{M_I \max}{W} \quad (14)$$

donc:

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_o} = \frac{M_I \min}{M_I \max} \quad (15)$$

et par suite:

$$\sigma_o = \sigma_{D adm} = \frac{\sigma_{U adm}}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{M_I \min}{M_I \max}} \quad (16)$$

Désignons maintenant par σ_{adm} la contrainte admissible suivant les prescriptions « B. E. » (soit 1400 kg/mm² pour l'acier St. 37 et 2100 kg/cm² pour l'acier St. 52) et comparons $\sigma_{D adm}$ qui est en général plus petite que σ_{adm} avec cette contrainte admissible σ_{adm} (afin de pouvoir tout ramener sur la valeur unique de σ_{adm}). Nous pouvons écrire:

$$\gamma \cdot \sigma_{D adm} = \sigma_{adm} \quad (17)$$

d'où:

$$\gamma \cdot \frac{M_I \max}{W} = \sigma_{adm} \quad (18)$$

A partir de (16) et (17), nous tirons:

$$\gamma = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{D adm}} = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{U adm}} \cdot \left(1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{M_I \min}{M_I \max} \right). \quad (19)$$

γ est donc une fonction linéaire de $\frac{M_I \min}{M_I \max}$. Les valeurs de γ peuvent ainsi être calculées pour des valeurs quelconques du rapport ci-dessus, à partir des valeurs de $\sigma_{U adm}$ et de $\sigma_{W adm}$. Le procédé le plus simple à appliquer est le suivant:

Pour les ponts en acier St. 37, on a:

$$\text{pour } M_I \min = -M_I \max \quad \gamma_{-1} = \frac{1400}{10,8} = \text{env. } 1,3$$

pour $M_I \min = 0$ (fatigue par rapport à l'origine), on a:

$$\sigma_{U adm}^{Ia} = 14 \text{ kg/mm}^2, \text{ donc: } \gamma_o = \frac{14}{14} = 1.$$

D'une manière générale, on peut écrire:

$$\gamma = a + b \cdot \frac{M_I \min}{M_I \max}$$

pour $M_I \min = 0$, on aura: $a = 1$

pour $\frac{M_I \min}{M_I \max} = -1$, on aura: $1,3 = 1 + b(-1)$

$$\text{d'où: } b = -0,3$$

On a donc, pour l'acier St. 37:

$$\gamma = 1 - 0,3 \cdot \frac{M_I \min}{M_I \max} \quad (20)$$

comme dans le cas des ponts rivés.

D'une manière analogue, on peut trouver les valeurs de γ qui correspondent au St. 52. On a ainsi:

— dans le cas du trafic intense:

$$\gamma = 1,235 - 1,237 \cdot \frac{M_I \text{ min}}{M_I \text{ max}} \quad (21)$$

— dans le cas du trafic faible:

$$\gamma = 1,105 - 1,102 \cdot \frac{M_I \text{ min}}{M_I \text{ max}} \quad (22)$$

Les droites représentant γ font l'objet des figures 34 et 35.

De ce qui vient d'être établi au sujet de γ (équations 17 et 18), il résulte que γ ne doit jamais être inférieur à 1, même lorsque le calcul semble l'indiquer (domaine des charges oscillantes non alternées).

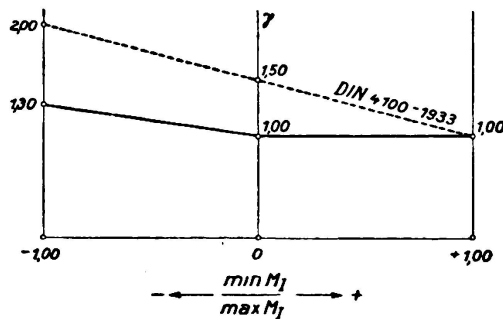


Fig. 34.

Courbes γ pour l'acier St. 37.

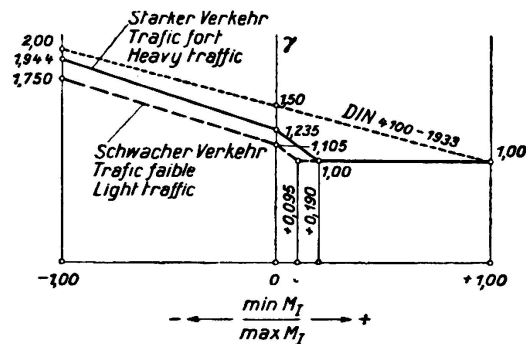


Fig. 35.

Courbes γ pour l'acier St. 52.

3° — Le coefficient α .

Dans les poutres sollicitées à la flexion, la contrainte admissible effective est:

$$\sigma_{D \text{ adm}} = \frac{M_I \text{ max}}{W_n} \quad (7 V)$$

d'après le diagramme des contraintes. Si l'on reporte cette valeur dans la relation (5 V), on obtient:

$$\alpha = \gamma \cdot \frac{\sigma_{D \text{ adm}}}{\sigma_{\text{adm}}} \quad (8 V)$$

Au lieu des courbes que l'on obtient par calcul exact et qui sont légèrement incurvées, pour les valeurs de α qui dépendent de la valeur du rapport $M_I \text{ min}/M_I \text{ max}$ on peut avec une précision suffisante remplacer ces courbes par des droites entre les valeurs limites; par exemple:

entre α_{-1} pour $M_I \text{ min}/M_I \text{ max} = -1$

et α_0 pour $M_I \text{ min}/M_I \text{ max} = 0$

on pourra écrire d'une manière générale:

$$\alpha = a + b \cdot \frac{M_I \text{ min}}{M_I \text{ max}}$$

C'est ainsi qu'ont été calculées les valeurs de α du tableau 2 V pour l'acier St. 37. Le tableau concernant l'acier St. 52 est analogue.

Considérons un exemple pratique. Les cordons de soudure bout à bout peuvent être repris avec soin sur la racine. Les contraintes les plus fortes sont des contraintes de traction (courbe IIa).

Les règlements antérieurs prévoyaient dans tous les cas l'adjonction de couvre-joints supplémentaires dans la membrure travaillant à la traction, lorsque les éléments des membrures sont soudés bout à bout. Ces couvre-joints pouvaient être assemblés soit par soudures d'angle soit par rivetage.

Ainsi qu'il résulte du tableau 2, (St. 37) et aussi bien avec les cordons frontaux d'angle qu'au commencement et à la fin des cordons latéraux, les résistances à la fatigue diminuent notablement (presque jusqu'à 50 %) par rapport aux valeurs correspondant aux cordons de soudure bout à bout. D'autre part, les membrures elles-mêmes ne peuvent pas, au commencement des couvre-joints, être soumises à des contraintes plus élevées que les cordons d'angle. On se trouve pour ces raisons en présence de conditions très défavorables et fort peu économiques, principalement dans le cas des poutres statiquement indéterminées. D'ailleurs même dans le cas du rivetage, il n'existe aucune solution absolument satisfaisante, par suite de l'affaiblissement que causent les trous des rivets, dont il faut tenir compte. On a ainsi été amené à adopter une solution qui représente un progrès considérable: on prévoit des assemblages bout à bout même dans les membrures qui travaillent à la traction, sans aucun couvre-joint de renforcement. Naturellement, il ne peut s'agir ici que de soudures exécutées avec le plus grand soin: chaque fois qu'il est possible, on reprendra les racines et on usinera avec soin la zone de transition entre le métal d'apport et le métal de base, afin de réaliser un passage progressif de l'un à l'autre. Les cordons eux-mêmes doivent également être soigneusement usinés. Il ne doit être admis aucun trou à la surface des cordons. L'affaiblissement total de la tôle (par passage à la toile émeri) ne doit pas être supérieur à 5 % de l'épaisseur de cette tôle. Comme, ainsi qu'il résulte du tableau 2, ligne 3, la résistance à la fatigue augmente notablement lorsque le cordon de soudure bout à bout est disposé à 45° (22 kg/mm² au lieu de 18 kg/mm²), ces cordons devront en principe être disposés à 45° dans la membrure travaillant à la traction.

Considérons la courbe IIa de $\sigma_{D adm}$ — Parties d'ouvrages comportant des joints, au voisinage des soudures bout à bout et dans ces soudures elle-mêmes — on a pour l'acier St. 37:

$$\gamma_{-1} = 1,30 \quad (\text{figure 34})$$

$$\sigma_{w adm}^{IIa} = 8,6 \text{ kg/mm}^2$$

donc, d'après la formule (8 V):

$$\alpha_{-1} = \frac{\gamma \cdot \sigma_{D adm}}{\sigma_{adm}} = \frac{1,30 \cdot 8,6}{14} = \text{env. } 0,8$$

$$\gamma_0 = 1$$

$$\sigma_{U adm}^{IIa} = 11,2 \text{ kg/mm}^2 \quad (\text{figure 1 V})$$

donc:

$$\alpha_0 = 1 \cdot \frac{11,2}{14} = 0,8$$

Tableau 2V. Valeurs de α pour l'acier St 37.

1	2	3	4	5	6
	Partie de l'ouvrage et mode de soudure	Nature de la contrainte	Charges alternees	Valeurs de α Charges oscillantes non alternees	Observations
1	Parties continues sans joints Semelles d'assemblage (+)	Traction	1,0	1,0	Diagramme: Ia
2		Compression	1,0	1,0	Diagramme: Ib
3		Cisaillement	0,8	0,8	(*) Voir ligne 18
4	Parties com- portant des joints, avec soudures bout à bout, lorsque la reprise à l'envers des cordons de soudure est	possible Contrainte maximum Traction (+)	0,8	0,8	Diagramme: IIa
5		Contrainte maximum Compression (—)	$\alpha = 1 + 0,2 \frac{\max M_I}{\min M_I}$	1,0	Diagramme: IIb
6		impossible Contrainte maximum Traction (+)	$\alpha = 0,57 + 0,11 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	Pour $\frac{\min M_I}{\max M_I} \geq 0 \leq 0,29$ $\alpha = 0,57 + 0,79 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	Diagramme: IIIa
7		Contrainte maximum Compression (—)	$\alpha = 0,71 + 0,25 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	Pour $\frac{\min M_I}{\max M_I} \geq 0 \leq 0,11$ $\alpha = 0,71 + 0,82 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	Diagramme: IIIb
8	Soudures d'angle ou bout à bout continues pour assemblage entre âme et membrure	Contrainte principale $\sigma = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\sigma_1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_1^2 + 4\tau_1^2} \right] \leq \sigma_{adm}$	$\alpha = 1,1 + 0,1 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	1,1	Diagramme: IVa, IVb
9	Cordons de soudure et âmes, à l'endroit du passage de l'âme à la membrure	Cisaillement $\tau'_I = \frac{\gamma \max Q_{Ix} S}{\alpha J t} \leq \sigma_{adm}$	0,65	0,65	

10	Cordon de soudure bout à bout sur joint d'âme	Contrainte principale même formule qu' à la ligne 8	1,0	1,0			
11		Cisaillement $\tau'_I = \frac{\gamma \max Q_{Ix}}{\alpha t h_s}$ $\leq \sigma_{adm}$	0,65	0,65			
12	Soudures d'angle sur joints rigides d'une poutre	Contrainte principale $\sigma = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\sigma_I^2 + \tau_I^2}$ $\leq \sigma_{adm}$	0,75	0,75			
13		Cisaillement $\tau'_I = \frac{\gamma \max A_I}{\alpha \Sigma (a l)}$ $\leq \sigma_{adm}$	0,65	0,65			
14 et 15	Parties au voisinage de cordons d'angle frontaux et endroits où commencent ou finissent des cordons d'angle latéraux. Pour les cordons eux-mêmes, calculer suivant ligne 19	Cordons frontaux et extrémités de cordons latéraux non usinés	Contrainte maximum Traction (+) ou Compression (—)	$\alpha = 0,71 + 0,15 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	Pour $\frac{\min M_I}{\max M_I} \geq 0 \leq 0,29$ $\alpha = 0,71 + 1,0 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	Pour $\frac{\min M_I}{\max M_I} \geq 0,29$ $\alpha = 1,0$	Diagramme: Va, Vb
16	ditos usinés avec soin	Contrainte maximum Traction (+)	$\alpha = 0,93 + 0,13 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	Pour $\frac{\min M_I}{\max M_I} \geq 0 \leq 0,07$ $\alpha = 0,93 + 1,0 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	Pour $\frac{\min M_I}{\max M_I} \geq 0,07$ $\alpha = 1,0$		Diagramme: VIa
17		Contrainte maximum Compression (—)	$\alpha = 1 + 0,2 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	1,0		Diagramme: VIb	
18	Semelles d'assemblage et plaques intercalaires sur poutres longitudinales de tabliers, lorsque les cordons d'angle ne sont pas soudés d'une manière continue	Comme lignes 14 à 17	Comme lignes 14 à 17	Comme lignes 14 à 17			
19	Cordons d'angle	Contraintes de toutes catégories, à l'exception des contraintes principales (ligne 8) et de la traction et compression en direction longitudinale par rapport aux cordons d'angle	0,65	0,65			
20	Les joints bout à bout des tôles d'âme doivent être examinés aux rayons x; ils doivent être usinés (afin d'assurer un passage très progressif entre le cordon de soudure et la tôle elle-même) aux endroits où l'écart entre les contraintes supérieures et inférieures est: $\sigma_o - \sigma_u \geq 0,8 \cdot 1400 \geq 1120 \text{ kg/cm}^2$ avec: $\sigma_o = \max M_I / W_n$ et $\sigma_u = \min M_I / W_n$						

On a donc dans les deux domaines:

$$\alpha = 0,8 \text{ (voir tableau 2 V, ligne 4)}$$

(La contrainte calculée est au plus égale à:

$$\sigma_r = \frac{\alpha}{\gamma} \cdot \sigma_{adm} = \frac{0,8}{1,30} \cdot 1400 = 860 \text{ kg/cm}^2$$

alors que la résistance aux contraintes alternées peut être considérée comme étant égale à $\sigma_w = 1300 \text{ kg/cm}^2$, d'après le tableau 2, ligne 3.)

Dans le domaine de la traction, on a pour la courbe IIb:

$$\begin{aligned} \gamma_{-1} &= 1,30 \\ \sigma_{wadm}^{IIb} &= -8,6 \text{ kg/mm}^2 \quad (\text{figure 1 V}) \end{aligned}$$

d'où:

$$\alpha_{-1} = \frac{1,30 \cdot 8,6}{14} = \text{env. } 0,8 \text{ comme pour IIa}$$

On a en outre:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= 1,0 \\ \sigma_{Uadm}^{IIb} &= -14,0 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

d'où:

$$\alpha_0 = 1,0 \cdot \frac{14}{14} = 1$$

(dans tout le domaine des charges oscillantes non alternées, voir à ce sujet tableau 2 V, ligne 5.)

On a d'une manière générale:

$$\alpha = a + b \cdot \frac{M_I \min}{M_I \max}$$

$$\text{pour } \frac{M_I \min}{M_I \max} = 0 \quad \alpha_0 = 1$$

$$\text{pour } \frac{M_I \min}{M_I \max} = -1 \quad \alpha_{-1} = 0,8$$

d'où:

$$0,8 = 1 + b (-1) \quad \text{et par suite} \quad b = +0,2$$

On a donc en définitive:

$$\alpha = 1 + 0,2 \cdot \frac{M_I \min}{M_I \max} \quad (\text{charges alternées}) \quad (23)$$

(Voir tableau 2 V, ligne 5.)

Considérons le tableau 2 V, ligne 18. Comme les cordons d'angle qui sont utilisés pour l'assemblage des plaques intercalaires des poutres longitudinales sont interrompus à l'endroit des poutres transversales et comme il se manifeste un effet de discontinuité très marqué par suite de la présence des intervalles entre poutres longitudinales et transversales, on se trouve obligé de réduire les contraintes admissibles dans ces plaques intercalaires comme il est indiqué aux lignes 14 à 17.

L'usinage des soudures bout à bout des tôles d'âme est nécessaire dans les parties d'ouvrages dans lesquelles l'écart entre les contraintes supérieure et inférieure (sans considérer la valeur de γ) est supérieure à 11,2 kg/mm², du fait que des cordons de soudure non usinés ne peuvent pas supporter des contraintes plus élevées.

Pour les ponts en acier St. 52 soumis à un faible trafic, les valeurs de α sont les mêmes que pour le trafic intense. Seules, les valeurs de γ sont différentes.

F. Applications pratiques à l'étude et à la construction des ouvrages.

1° — Dès l'étude du projet, il faut veiller à prévoir une bonne accessibilité des cordons de soudure et la possibilité pour les soudeurs de manier les appareils dans de bonnes conditions.

Les soudures au plafond doivent dans toute la mesure du possible être évitées. Il faut s'efforcer de prévoir la possibilité d'exécuter les soudures en position horizontale.

Cette exigence concernant l'exécution des soudures en position horizontale est particulièrement importante dans la construction des ponts. Une exécution impeccable exige en effet que toutes les facilités possibles soient assurées aux soudeurs. Les entreprises de construction métallique qui se proposent de participer à la construction de ponts soudés seront ainsi amenées à prévoir des dispositifs de montage rotatifs, afin que les pièces puissent être placées en position correcte pour la soudure.

2° — Il faut éviter les joints dans toute la mesure du possible, sous réserve des considérations économiques.

Depuis quelque temps, on renonce à l'adoption des semelles de membrure de longueurs graduées donnant une progression régulière de l'épaisseur suivant les variations du moment résistant nécessaire et on préfère adopter des semelles continues en une seule épaisseur nécessitant un moins grand nombre de joints. D'ailleurs les semelles épaisses se déforment moins facilement que les semelles minces. On a déjà employé des semelles d'un poids de 15 tonnes sans que les prix de revient en aient été considérablement augmentés.

3° — Les cordons de soudure ne doivent pas être multipliés et localisés en certains endroits particuliers.

4° — Dans la construction des ponts, il ne doit pas être prévu de cordons de soudure discontinus ou en bouchon.

Dans les cordons de soudure discontinus, la résistance à la fatigue se trouve en effet notablement amoindrie, par suite de l'effet de discontinuité qui se manifeste au début et à la fin des cordons.²³ Les cordons en bouchon doivent être considérés comme des cordons discontinus.

5° — En général, les cordons de soudure doivent être isocèles et ne pas avoir une épaisseur plus grande que celle qui est prévue par le calcul, à moins que des considérations sur l'exécution des soudures n'interviennent. Dans les soudures frontales, on peut prévoir une exécution non isocèle, afin de réaliser un meilleur écoulement des lignes de force.

²³ Voir le renvoi 14.

6° — En tous les endroits où commencent ou finissent des cordons d'angle, il faut assurer un passage aussi progressif que possible entre le cordon et le métal de base, c'est-à-dire que les extrémités des cordons doivent être usinées de telle sorte que l'on puisse appliquer les plus grandes valeurs de α des tableaux 2 V et 3 V, lignes 16 et 17 (courbes VIa et VIb des diagrammes des contraintes; figures 1 V et 2 V).

7° — Les éléments de renforcement et les raccords de poutres ne doivent être soudés directement que sur des membrures travaillant uniquement à la compression (dérogation par rapport aux tableaux 2 V et 3 V); sur les membrures qui travaillent également à la traction, un tel raccordement ne peut être prévu que lorsque, en tenant compte des valeurs de α suivant tableaux 2 V et 3 V, lignes 14 et 16, les contraintes de flexion admissibles dans la membrure ne sont pas dépassées; dans le cas contraire, il y a lieu d'ajuster avec soin, entre la membrure travaillant à la traction et l'élément de renforcement, des plaquettes qui ne doivent pas être soudées sur la membrure elle-même (figure 12 V).

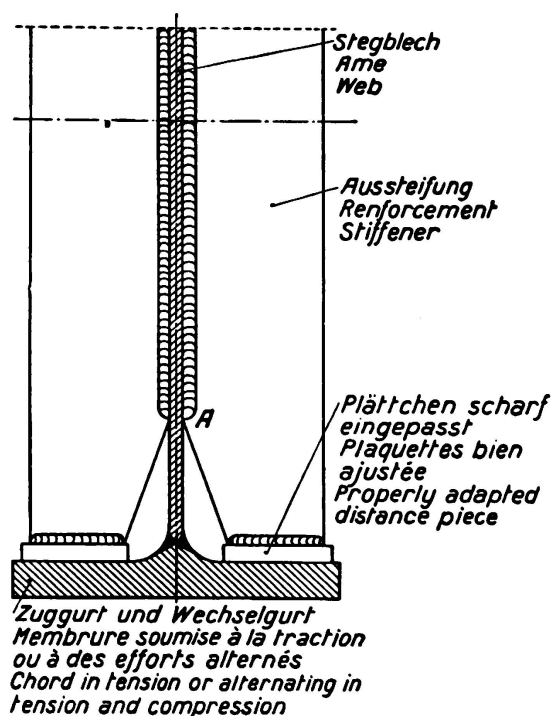


Fig. 12 V.

Même lorsque les éléments de renforcement et les assemblages peuvent être raccordés sur la membrure, il doit être prévu sur cette membrure des entailles permettant de dégager complètement le cordon principal d'assemblage entre âme et membrure, afin que ce dernier puisse être inspecté facilement.

Dans les poutres en tôles dont les âmes ont plus de 1 m de hauteur et dans les poutres comportant de grands efforts tranchants, il faut contrôler la résistance des âmes au voilement.²⁴ Dans les poutres sur lesquelles ce contrôle n'est pas effectué, les éléments de renforcement ne doivent pas être écartés de plus de 1,30 m.

²⁴ Voir Schaper: „Grundlagen des Stahlbaues“, page 98, Berlin 1933, éditeur Wilhelm Ernst & Sohn.

Dans les poutres à hautes âmes et lorsqu'il est difficile d'observer la prescription ci-dessus, on peut également envisager l'emploi du rivetage pour l'assemblage des poutres. Le rivetage ne doit pas être systématiquement exclu dans la construction des ponts soudés; il est au contraire tout indiqué de l'employer là où il peut présenter des avantages.

8° — Des éléments de renforcement doivent être prévus aux endroits où s'appliqueront des charges localisées.

9° — L'épaisseur minimum des cordons de soudure « porteurs » en angle est $a = 3,5 \text{ mm}$ (on admet $a = 3 \text{ mm}$ pour les éléments de renforcement). D'une manière générale, l'épaisseur des cordons d'angle ne doit pas être supérieure à $a = 0,7 t_1$; t_1 désignant l'épaisseur de la tôle la plus mince ou de la bride ou de l'élément de profilé le plus mince de l'assemblage (figures 13 V, 14 V et 15 V).

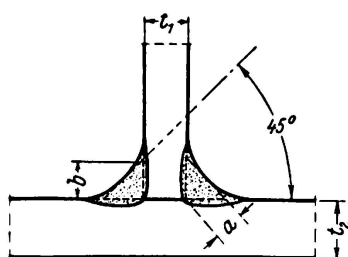


Fig. 13 V.

$t_1 < t_2$, $\alpha \leq 0,7 t_1$
(exceptionnellement $\alpha = t_1$).

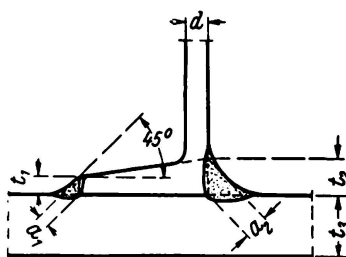


Fig. 14 V.

(Aile à face oblique).
Pour $t_1 < t_2$, Pour $t_2 < t_3$
 $\alpha \leq 0,7 t_1$, $\alpha_2 \leq 0,7 t_2$.

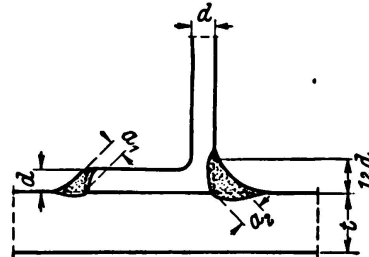


Fig. 15 V.

(Aile à faces parallèles).
Pour $d < t$, Pour $1,2 d < t$
 $\alpha_1 = 0,7 d$, $\alpha_2 \leq 0,7 \cdot 1,2 d$.

On ne doit s'écarter de cette prescription que lorsqu'il est impossible de procéder autrement pour réaliser un plein assemblage.

10° — Pour les assemblages des semelles épaisses de membrures, on peut également prévoir des cordons de soudure en U (figures 16a V et 16b V).

Les essais sur pulsateurs avec cordons en U sur des tôles d'environ 100 mm d'épaisseur ont donné des résultats aussi bons que des essais sur tôles plus minces avec cordons en V ou en X (exemple, voir figure 36).

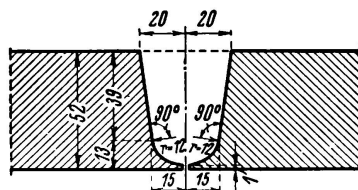


Fig. 36.

Exemple d'une soudure à cordon en U sur tôle de 52 mm d'épaisseur.

11° — Les cordons de soudure bout à bout sur semelles doivent dans toute la mesure du possible présenter une section symétrique par rapport à l'axe de gravité de ces semelles.

Les cordons en U peuvent être assimilés, pour le calcul, aux cordons à section symétrique.

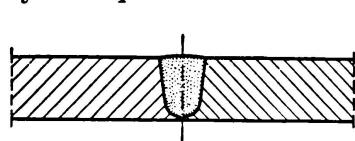


Fig. 16a V.

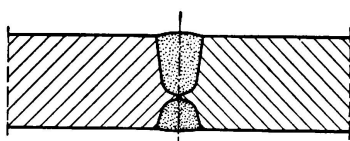


Fig. 16b V.

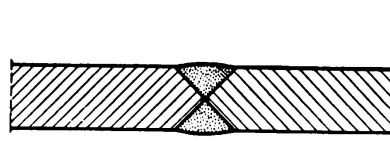


Fig. 17 V.

12° — Si deux semelles comportant chacune un joint soudé doivent être assemblées, les joints devront être disposés au même endroit, ce qui offrira la possibilité de reprendre la racine (figures 18 V et 19 V).

Il est important de noter que si l'on dispose le joint de manière défectueuse, la semelle inférieure risque d'être endommagée au moment de la reprise de la racine.

13° — Les semelles travaillant à la compression et qui ne sont pas assemblées directement avec les âmes correspondantes par des cordons continus ne doivent pas avoir une largeur de plus de 30 fois leur épaisseur. S'il est impossible

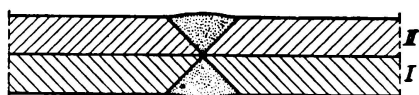


Fig. 18 V.

Deux cordons en V.

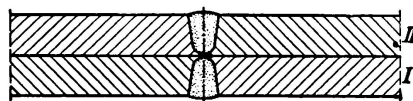


Fig. 19 V.

Deux cordons en U.

d'éviter une plus grande largeur, les semelles devront être renforcés par rivetage ou boulonnage afin d'éviter le voilement. (Il ne doit toutefois pas être percé de trous dans les membrures travaillant à la compression.)

14° — Si l'épaisseur d'une plaque de semelle varie, cette variation doit être progressive (figure 20 V). De même, le passage d'une tôle d'âme mince à une tôle plus épaisse doit également être progressif.

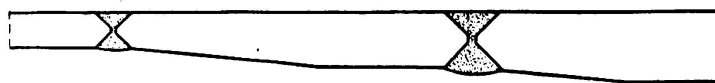


Fig. 20 V.

Semelle avec variation d'épaisseur.

15° — Dans les assemblages bout à bout sur tôles d'âme, les racines des cordons de soudure doivent être reprises; le raccordement entre le cordon de soudure et la tôle doit être usiné, suivant dispositions des tableaux 2 V et 3 V, ligne 20.

16° — Les trous de montage doivent être mentionnés sur les dessins; ces trous doivent être disposés de telle sorte que les parties de sections soumises à des contraintes élevées en soient aussi peu affaiblies que possible.

Dans les membrures travaillant à la traction, il ne faut pas autant que possible prévoir de cordons de soudure frontaux orientés perpendiculairement à la direction des efforts. Lorsqu'il est impossible de l'éviter, ou bien aux endroits où commencent ou finissent des cordons latéraux, il faut chaque fois que cela est possible, usiner les cordons de manière à réaliser un passage progressif du cordon de soudure à la tôle. En ce qui concerne les valeurs de α , voir paragraphe 6.

Si à titre provisoire, les ponts en treillis ne doivent pas être soudés, on peut néanmoins recourir à la soudure dans le cas du renforcement des poutres en treillis rivées. Ceci présente cet avantage qu'il n'est pas nécessaire de démonter ces poutres. Pour le calcul, il faut s'efforcer de faire supporter l'intégralité de la charge permanente à la rivure (éléments de renforcement compris), les assemblages soudés ayant à supporter la totalité de la charge roulante. Si ce n'est pas

possible, les assemblages soudés devront tout au moins supporter les deux tiers de la charge roulante, le reste étant supporté par la rivure.²⁵ Dans ces travaux de renforcement, il faut tout particulièrement prêter attention aux contraintes de retrait qui peuvent être mises en jeu par la soudure.

17° — Dans tous les assemblages de semelles et dans les assemblages de tôles d'âme dans la mesure où suivant les tableaux 2 V et 3 V, ligne 20, l'écart entre les contraintes de flexion les plus fortes et les plus faibles $\sigma_o - \sigma_u$ est supérieur ou égal à 11,2 kg/mm², ainsi que dans les autres cordons de soudure bout à bout importants pour lesquels cette disposition est prévue sur les dessins eux-mêmes, on devra réaliser en A et en B un passage progressif du cordon de soudure à la tôle de base, à la toile émeri ou par tout autre moyen. Il ne doit pas exister de gorges ou entailles perpendiculaires à la direction des efforts; il faut tout au contraire qu'en ces endroits importants, la surface soit absolument lisse et ne présente aucun creux. Si par suite de la pénétration de la fusion, il s'est formé des cavités dans la tôle ou sur le cordon de soudure, la soudure correspondante

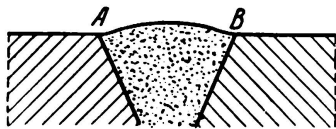


Fig. 25 V.

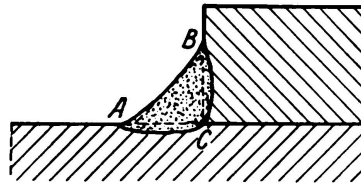


Fig. 26 V.

devra être reprise et usinée à nouveau. Il importe peu que le métal de base soit remplacé à droite ou à gauche de A ou de B par du métal d'apport parfaitement déposé. La question essentielle est que le passage soit progressif et absolument lisse. Les évidements existants dans la tôle peuvent être tolérés jusqu'à 5 % de l'épaisseur de cette tôle. Au lieu de laisser subsister les évidements qui résultent en A et en B de la présence de l'arrondi du cordon, on peut également prévoir un usinage complet à exécuter suivant la direction des efforts. Aucune cavité ne doit toutefois subsister à la surface de l'assemblage (figure 25 V).

18° — Le mode d'exécution des soudures doit être indiqué sur les dessins. On indiquera par exemple: «Soudure bout à bout exécution qualité 1, usiner les cordons.»

19° — Dans les cordons d'angle ou les cordons bout à bout continus longitudinaux, il n'est en général pas nécessaire d'usiner les cordons.

20° — Dans tous les cordons d'angle, la fusion doit pénétrer d'une manière très effective jusqu'à la racine C (figure 26 V). Il faut par contre éviter une pénétration plus profonde au-dessous de la surface de la tôle. Dans les cordons d'angle frontaux, il est particulièrement important que le soudeur respecte la forme et les dimensions prévues. Il ne doit en aucun cas être toléré de cavités en A et en B (les endroits defectueux devront être repris et réusinés).

²⁵ La possibilité de réaliser cette prescription a été confirmée par des essais statiques et de fatigue exécutés au Laboratoire d'Essai des Matériaux de Dahlem. Voir *Kommerell et Bierett*: „Über die statische Festigkeit und die Dauerfestigkeit genieteteter, vorbelasteter und unter Vorlast durch Schweißung verstärkter Stabanschlüsse“ (Stahlbau, 1934, page 81).

21° — Toutes les extrémités des cordons d'angle doivent, autant que cela est prévu dans l'application des valeurs de α des tableaux 2 V et 3 V, lignes 16 et 17, être usinées de manière à réaliser un passage progressif de la soudure à la tôle (voir figure 27 V). Cette indication doit être portée sur les dessins. Par exemple: « Usiner les extrémités des cordons d'angle. »

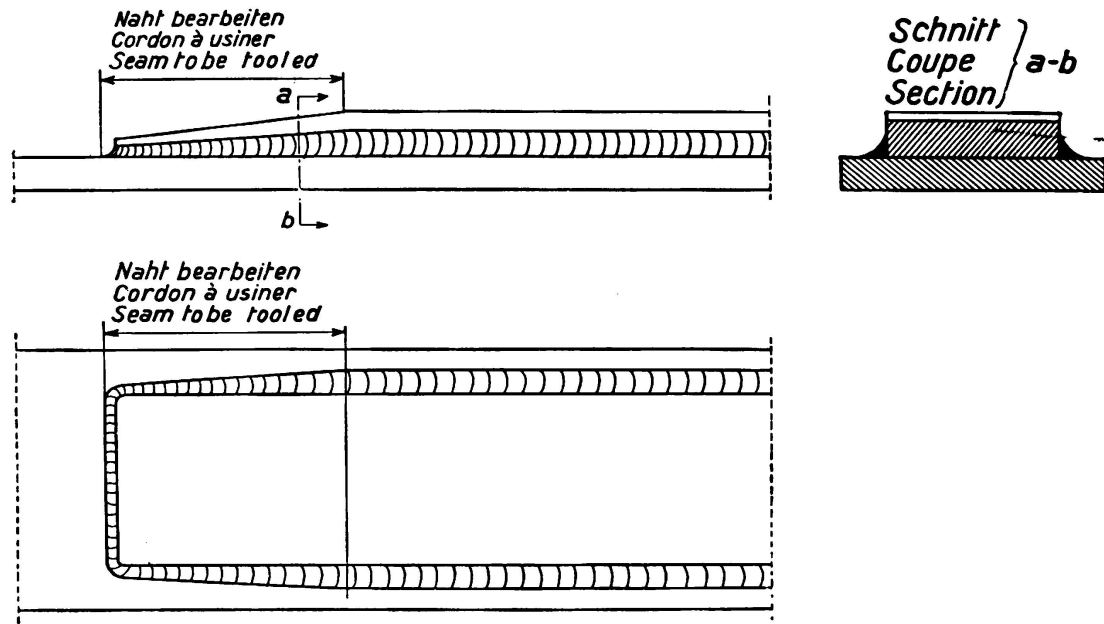


Fig. 27 V.

Exécution d'une transition douce par retouches à l'émeri ou fraisage.

22° — Les endroits où la soudure effectuée ne satisfait pas aux prescriptions qui précèdent doivent être dégagés avec soin; à l'aide d'outils suffisamment fins et la soudure doit être refaite parfaitement. Les endroits ainsi réparés doivent, après exécution de la nouvelle soudure, être légèrement chauffés au chalumeau ainsi que le voisinage.

23° — Sur les parties portantes, il ne doit être soudé aucune pièce ne devant servir qu'à faciliter le montage et qui ne soit pas prévue sur les dessins agréés, même si elles ne doivent être utilisées que provisoirement et être ultérieurement enlevées. Lorsque cela est nécessaire on pourra percer de petits trous (autant que possible dans les parties qui ne doivent pas être soumises à des contraintes élevées). Ces trous seront ultérieurement bouchés par des rivets et non pas par du métal d'apport.

24° — Il faut absolument éviter les détériorations de la charpente par les chalumeaux ou par des gouttes de soudure. L'arc ne devra également être amorcé qu'aux endroits où l'on prévoit la pose d'un cordon. Si néanmoins un enlèvement important de métal se trouvait effectué sur des parties portantes, le dommage devrait être réparé par apport de métal et la surface devrait être soigneusement unisée après la réparation.

Les soudures de pièces provisoires et les détériorations dont il est question ci-dessus donnent en effet naissance, sur les parties portantes; à des effets de résilience qui réduisent considérablement la résistance à la fatigue. Au cours d'un

essai de résistance à la fatigue effectué à Dahlem, la rupture s'est produite sur une tôle à un endroit que le soudeur avait touché avec la pince à souder.

25° — Dans toute la mesure du possible, les travaux de soudure doivent être exécutés à l'atelier. Si l'entrepreneur juge opportun d'adopter le rivetage à des endroits qui doivent être soudés, il devra en demander l'autorisation en temps voulu à la Direction des Chemins de Fer.

26° — Pour effectuer la pose des cordons particulièrement importants en position horizontale, des dispositifs rotatifs appropriés devront être prévus, tant à l'atelier que dans toute la mesure du possible sur le chantier.

Des dispositifs de cette nature sont représentés sur les figures 37 et 38.

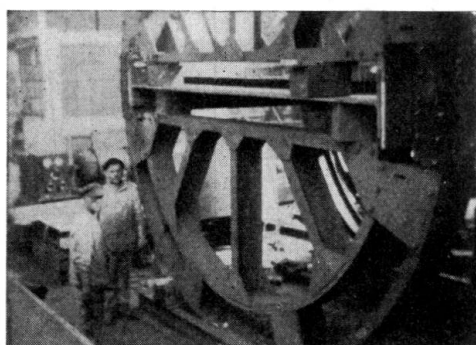


Fig. 37.

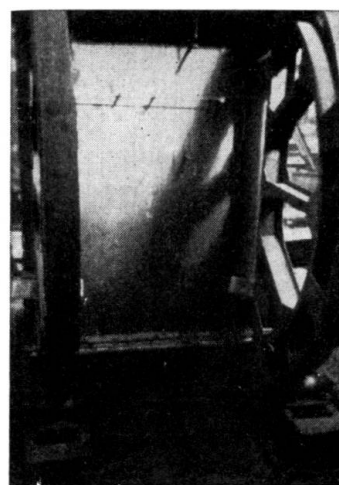


Fig. 38.

27° — Il est absolument essentiel que les retraites qu'il est impossible d'éviter au cours de la soudure puissent dans toute la mesure du possible s'effectuer, afin qu'il ne subsiste autant que possible aucune contrainte résiduelle de retrait si faible soit-elle dans les parties des ouvrages. Les parties à assembler ne doivent donc pas être au préalable montées trop rigidement, afin de pouvoir suivre le retrait.

Cette remarque s'applique également tout particulièrement aux assemblages sur le chantier. Si par exemple une poutre transversale doit être assemblée en A et B, on pourra disposer la tôle d'âme en position en C et en D, mais sans la souder dès le début (figure 39). On laissera également de côté, tout d'abord,

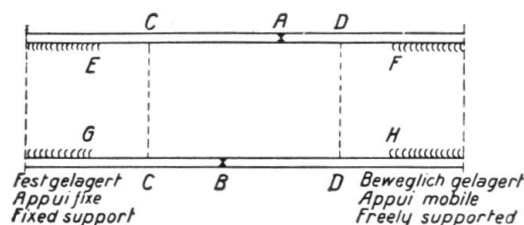


Fig. 39.

les cordons de membrure EC, DF, GC et DH. On pourra monter en position fixe la partie gauche du pont, mais laisser sa mobilité à la partie droite, en évitant naturellement tout risque d'accident. On pourra ainsi effectuer tout d'abord les cordons en A et en B sans qu'il en résulte de contraintes de retrait

notables dans les membrures. On montera ensuite la pièce constituant l'âme CCDD, qui aura été prévue de telle sorte qu'après exécution des joints CC, elle s'adapte exactement en DD. On exécutera le cordon CC en une seule pièce. Il ne se manifestera tout d'abord en EC et en GC aucune contrainte de retrait. Au moment de la soudure du joint d'âme DD, la tôle d'âme alors quelque peu incurvée se redressera. Il ne se produira de contraintes de retrait dans les membrures et dans l'âme que lorsque l'on effectuera les cordons EF et GH assemblant les membrures avec l'âme. Le fait de n'avoir pas exécuté dès le début les cordons EC, FD, etc. a ainsi permis de répartir ces contraintes sur une plus grande longueur. L'usinage des cordons ne sera effectué que lorsque tous les cordons auront été posés, sur le chantier.

Résumé.

1° — L'auteur expose tout d'abord l'évolution en Allemagne, depuis le Congrès de Paris de 1932, d'une nouvelle méthode de calcul des ouvrages soudés qui ont à supporter des charges accusant de grandes fréquences de variation. Les conclusions tirées par l'auteur des nombreux essais de fatigue sur assemblages soudés qui ont été effectués sous les auspices de Comité d'Etudes sur la résistance à la fatigue (Kuratorium für Dauerfestigkeitsversuche) ont servi de base aux chapitres « Calcul et Construction pratique » des « Règlements provisoires de 1935 pour la construction des ponts de Chemin de fer à poutres pleines soudées ».

2° — L'auteur définit les notions que l'on rencontre au cours des essais dynamiques avec pulsateurs et ponts oscillants: Résistance à la fatigue par rapport à l'origine σ_U ($M \min = 0$), résistance aux efforts alternés σ_w , amplitude de variation des charges σ_w en s'appuyant sur les courbes de résistance à la fatigue. Comme cette courbe peut, avec une précision suffisante, être considérée comme une droite (figure 3), on peut en faisant intervenir l'angle d'inclinaison α déterminé par des essais, obtenir la résistance aux efforts alternés à partir de la formule:

$$\sigma_w = \frac{\sigma_U}{1 + \operatorname{tg} \alpha} \quad (1)$$

3° — Le chapitre C résume les résultats principaux des essais du Comité d'Etudes:

a) Des assemblages soudés, qui ont donné de bons résultats aux essais purement statiques de résistance, ont fourni aux essais de fatigue des valeurs de résistance notablement plus faibles.

b) Les ruptures par fatigue se sont dans la plupart des cas produites dans le métal de base, en s'amorçant sur de petites cavités ou dépressions superficielles de la zone de transition entre les cordons de soudure et les tôles (effet de résilience du métal).

d) Dans les cordons de soudure bout à bout avec racine non reprise à l'envers, les résistances aux efforts répétés non alternés n'ont atteint que 0,7 fois la valeur donnée par les cordons dont la racine avait été reprise.

e) Des cordons de soudure bout à bout exécutés dans les meilleures conditions avec inclinaison de 45° par rapport à la direction des efforts, ont accusé à l'essai

de fatigue aux efforts répétés non alternés des résistances $\sigma_U = 22 \text{ kg/mm}^2$ par rapport aux valeurs de 18 kg/mm^2 de cordons bien exécutés mais perpendiculaires à la direction des efforts.

f) Les résistances obtenues avec cordons de soudure bout à bout auxquels avaient été adjoints des couvre-joints n'ont pas dépassé celles des bons assemblages bout à bout simples. Les assemblages bout à bout subissent plutôt une influence défavorable du point de vue de la résistance aux contraintes dynamiques, du fait des couvre-joints.

g) Dans tous les cordons d'angle, la résistance à la fatigue diminue notablement lorsque la soudure n'est pas intime jusque dans la racine même du cordon.

h) Les cordons de soudure frontaux légers (concaves) avec passage progressif de la soudure à la tôle de base se sont mieux comportés que les cordons avec arrondi bombé.

i) Aux endroits où sont disposés des cordons d'angle frontaux ou aux endroits où les parties d'ouvrages se croisant sont assemblées par des cordons latéraux, de même qu'à tous les endroits où commencent ou finissent des cordons latéraux, la résistance à la fatigue est plus faible. On a obtenu des valeurs plus élevées lorsque le passage entre la soudure et la tôle était assuré d'une manière très progressive.

k) Dans les soudures bout à bout, de même que dans les soudures d'angle, la forme du cordon et en particulier le passage entre le métal d'apport et le métal de base, joue un rôle de toute première importance. La forme est ici beaucoup plus importante que la qualité du métal d'apport.

l) Les résultats des essais de résistance à la fatigue sur ponts oscillants ont d'une manière générale concordé avec ceux des pulsateurs.

m) On n'a relevé aucune différence sensible de résistance à la fatigue entre les assemblages soudés en acier St. 37 et ceux en acier St. 52. L'acier de construction à haute résistance n'a donné des résultats plus intéressants que dans le cas de contraintes initiales plus élevées.

n) Les essais de fatigue sur cordons d'angle continus soumis à des contraintes longitudinales ont donné des résistances aux efforts répétés non alternés aussi élevées que celles des soudures bout à bout ($\sigma_U = 16$ à 18 kg/mm^2).

o) Les baguettes de métal d'apport destinées à la construction des ponts doivent faire l'objet d'essais de résistance à la fatigue.

4° — Les valeurs de résistance à la fatigue trouvées au cours de ces nombreux essais sur cordons et assemblages soudés ont été complétées dans la mesure des besoins à l'aide des courbes de résistance à la fatigue, de telle sorte que l'on peut considérer comme connues les résistances effectives des principaux assemblages courants dans les domaines des charges alternées et oscillantes non alternées. En tenant compte d'une marge de sécurité, ces valeurs ont été portées dans les «Diagrammes des contraintes admissibles $\sigma_{D \text{ adm}}$ pour les ponts soudés» (fig. 1 V et 2 V). Dans ces diagrammes, la contrainte supérieure admissible σ_o est portée en fonction de la contrainte inférieure σ_u .

5° — Pour ne pas être contraint d'envisager l'introduction d'un nombre trop important de contraintes admissibles, qui, pour chaque type de cordon de soudure et pour chaque variante d'exécution, devraient tenir compte en outre de la valeur du rapport σ_u/σ_0 ou de M_{\min}/M_{\max} , toutes les contraintes à faire intervenir dans les calculs de résistance ont été ramenées aux contraintes admissibles dans les aciers de construction, σ_{adm} , soit 1400 kg/cm² pour l'acier St. 37 et 2100 kg/cm² pour l'acier St. 52.

Pour le calcul des sections, la contrainte envisagée doit satisfaire à la relation :

$$\sigma = \gamma \cdot \frac{M_{\max}}{W} \sigma \leq \sigma_{adm} \quad (2)$$

(par exemple 1400 kg/cm² dans le cas de l'acier St. 37); dans cette expression on a :

$$\gamma = a + b \cdot \frac{M_{\min}}{M_{\max}} \geq 1 \quad (6)$$

γ étant un coefficient dynamique par lequel il faut multiplier la plus grande moment fléchissant M_{\max} afin que la poutre puisse être calculée comme une poutre uniquement soumise à une charge statique sous la forme du moment fléchissant maximum M_{\max} . Les valeurs de a et de b sont déduites des contraintes admissibles $\sigma_{D adm}$ des courbes Ia et Ib pour parties d'ouvrages ne comportant pas d'assemblages (figures 1 V et 2 V des diagrammes). On a obtenu :

$$\gamma = 1,0 - 0,3 \cdot \frac{M_{\min}}{M_{\max}} \quad (20)$$

pour les ponts soudés en acier St. 37 (figure 34).

Afin de tenir compte de la valeur effective des cordons de soudure et des parties d'ouvrages qui en sont immédiatement voisines, on a introduit des coefficients de réduction (coefficients de forme α). Ces valeurs de α sont déduites des diagrammes de tension de telle sorte que pour des parties d'ouvrages continues, ne comportant pas d'assemblages et même pour les parties qui comportent des cordons longitudinaux continus, on ait $\alpha = 1,0$ (tableau 2 V, lignes 1 et 2). D'une manière générale, pour le calcul des ponts soudés, on utilise ainsi la formule suivante :

$$\sigma = \frac{\gamma}{\alpha} \cdot \frac{M_{\max}}{W} \leq \sigma_{adm} \quad (V5)$$

(1400 kg/cm² pour l'acier St. 37).

Les valeurs de α peuvent être prises dans le tableau (tableau 2 V pour l'acier St. 37) après détermination des valeurs correspondantes du rapport $\frac{M_{\min}}{M_{\max}}$, ou bien calculées.

6° — Dans le chapitre F, est étudiée la réalisation pratique telle que l'on doit l'envisager à la suite de ces essais. Un point d'une importance toute particulière est l'écoulement non perturbé des lignes de force dans les assemblages soudés soumis à des contraintes dynamiques, ce qui se trouve réalisé au mieux dans les

soudures bout à bout. *Les semelles de membrures soumises à la traction doivent, dans l'état actuel de la question, être soudées bout à bout sans aucune adjonction de couvre-joints.* Les notions résultant des essais de fatigue et se rapportant par exemple à l'usinage des cordons et du métal de base, en particulier aux extrémités des cordons de soudure latéraux, ou à l'interdiction d'appliquer des contraintes déterminées à des cordons d'angle orientés perpendiculairement à la direction des efforts, sur des pièces travaillant à la traction, ont été également introduites dans les nouveaux « Règlements pour la construction des ponts de chemin de fer soudés à poutres pleines ». Ces règlements permettront à l'Ingénieur de projeter, de calculer et de construire des ponts soudés, dans les meilleures conditions de sécurité et d'exécution pratique.

Leere Seite
Blank page
Page vide

III a 2

Résistance à la fatigue et sécurité des constructions soudées
(Ponts, charpentes, conduites forcées).

Ermüdungsfestigkeit und Sicherheit geschweißter
Konstruktionen (Brücken- und Hochbauten und
Druckrohre).

Fatigue Strength and Safety of Welded Structures (Bridges,
Structural Steel Work and Pressure Pipes).

Dr. Ing. h. c. M. Roš,

Professeur à l'Ecole polytechnique fédérale et
Directeur du Laboratoire fédéral d'essai des matériaux, Zurich.

I. Introduction.

Le métal d'apport est le produit d'une fonderie en miniature, il faut donc en principe le considérer et le traiter comme de l'acier moulé.

Les assemblages soudés sont plus sensibles aux sollicitations à la fatigue que les aciers de construction eux-mêmes assemblés par soudage ou que les assemblages rivés de ces aciers; cette plus grande sensibilité résulte d'inclusions de scories, en pratique inévitables, d'entailles dues à la pénétration de la fusion, d'endroits qui ne sont pas parfaitement liés, de fissures imperceptibles provoquées par des tensions internes, et du changement de la texture sous l'influence de la chaleur, en particulier dans la zone de pénétration de la fusion.

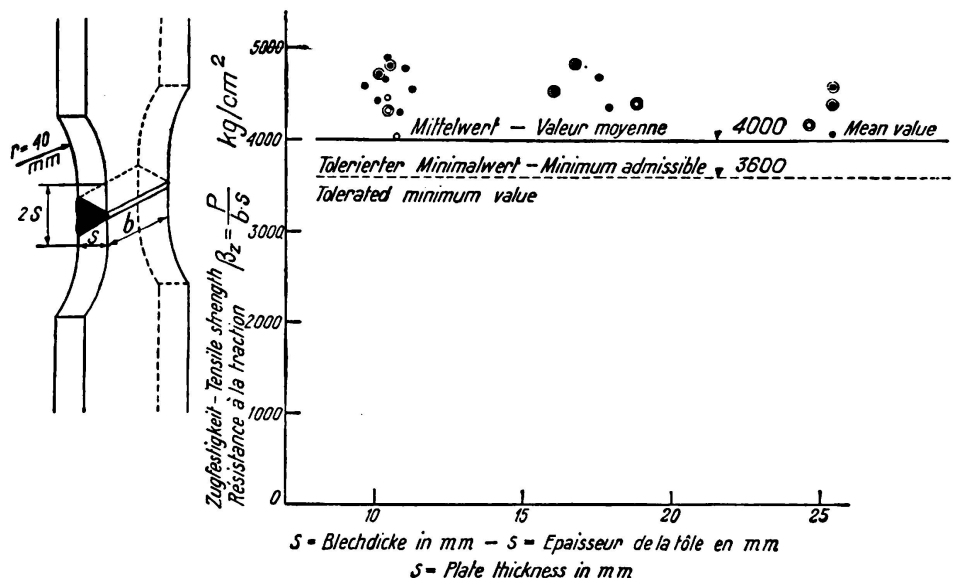
L'essai de résistance à la fatigue (endurance) entre différentes limites de tensions est spécialement indiqué pour mettre en valeur la qualité des cordons de soudure tant du point de vue métallurgique qu'au point de vue constructif.

Pour des aciers à teneur en carbone élevée ($C \geq 0,15 \%$) qui sont plus sensibles aux influences thermiques et mécaniques, on prendra, selon les possibilités et le but à atteindre, les mesures suivantes basées sur des connaissances métallurgiques: emploi d'électrodes spéciales appropriées, réchauffement préalable de la pièce, recuit au chalumeau, revenu faisant disparaître les tensions internes ou recuit de la pièce entière soudée. La mise en pratique de ces connaissances, en commun avec l'expérience acquise, a porté ses fruits; elle a exercé une influence prépondérante sur

- l'évolution des électrodes,
- la manière d'exécuter les assemblages soudés,
- l'agencement des détails constructifs,
- la méthode de calcul des assemblages soudés et
- l'essai de réception de constructions soudées (essai de contrôle).

II. Essais du laboratoire fédéral d'essai des matériaux 1927—1935.

Les résultats des essais statiques et d'endurance les plus importants effectués au L.F.E.M. depuis 1927 ont été publiés dans le rapport N° 86 du L.F.E.M.¹ Les essais d'endurance furent exécutés dans 3 pulsateurs de 10, 30 et 60 t de capacité et 4 machines pour flexion rotative continue d' *Alfred J. Amsler & Cie.*, Schaffhouse, ainsi que dans la grande machine de *C. Schenck*, Darmstadt, pour les essais de fatigue à la torsion et à la flexion.



Legende — Légende — Text.

	elektrisch à l'arc électrique electric arc	autogen oxy-acétylénique autogenous	
Thomas - Stahl Acier - Thomas Thomas - steel	●	○	Nicht gebrochen Non rompu Not fractured
S. M. Qualität Acier Siemens - Martin Siemens - Martin steel	●	○	

Zahlen - Millionen Lastwechsel
Chiffres - Millions de pulsations
Numbers - Millions of load alternations

Fig. 1.

Soudure bout à bout. Résistance à la traction.

Toutes les valeurs des résistances se rapportent à des soudures d'acier de construction, qualité normale, ayant une résistance à la traction moyenne β_z de $\cong 4000 \text{ kg/cm}^2$, une teneur en carbone $C \cong 0,1 \%$ et une proportion de phosphore et de soufre aussi faible que possible ($P + S < 0,1 \%$), techniquement libéré d'inclusions de scories, sans ségrégations, doublures, défauts de surface (petites fissures fines). Les soudures furent exécutées avec des électrodes enrobées et du courant continu; la qualité du métal d'apport correspondait à la qualité de résistance de l'acier.

Les plus intéressants de ces résultats sont représentés dans les figures 1 à 14. Les tableaux récapitulatifs suivants donnent dans différents cas les valeurs

¹ M. Roš et A. Eichinger: „Résistance des assemblages soudés — Festigkeit geschweißter Verbindungen“, Bericht Nr. 86 der Eidg. Materialprüfungsanstalt Zürich, März 1935.

moyennes des résistances statiques à la traction ainsi que des résistances à la fatigue.

Notations.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Résistances} \\ \text{à la fatigue} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \sigma_D = \text{Résistance à la fatigue} \\ \text{par oscillation harmonique} \\ \sigma_U = \text{Résistance à la fatigue} \\ \text{par efforts répétés variant entre} \\ \frac{1}{2}\sigma_W = \text{Résistance à la fatigue} \\ \text{par efforts répétés variant entre} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\max} = + \sigma_D \\ \sigma_{\min} = - \sigma_D \\ \sigma_{\max} = + \sigma_U \\ \sigma_{\min} = 0 \\ \sigma_{\max} = + \sigma_W \\ \sigma_{\min} = + \frac{1}{2}\sigma_W \end{array} \right.$$

perturbation visible de l'équilibre moléculaire σ_f limite apparente d'élasticité

force de traction maximum rapportée à la section primitive telle qu'elle était au début de l'essai β_z résistance à la traction

Tableau 1

Sollicitations à la traction:	Résistances à la fatigue valeurs moyennes en kg/cm ²	
	σ_U	$\frac{1}{2}\sigma_W$
soudure bout à bout		
soudure (surface de contact)	1400	2000
zone de pénétration de la fusion	1600	2300
	— fig. 2 et 13 —	
soudure d'angle		
soudure (surface de contact)	600	800
zone de pénétration de la fusion	1000	1500
	— fig. 4 et 14 —	
soudure latérale		
soudure (surface de contact)	800	1200
zone de pénétration de la fusion	1000	1500
	— fig. 6 et 14 —	
soudure frontale		
soudure (surface de contact)	800	1200
zone de pénétration de la fusion	1000	1500
	— fig. 8 et 14 —	

Les soudures du type d'angle, du type latéral et du type frontal, considérées provisoirement comme étant pratiquement équivalentes, furent classées dans un même groupe; on peut donc donner pour ce groupe les valeurs moyennes générales suivantes:

soudure (surface de contact)	~ 700	1100
zone de pénétration de la fusion	~ 1000	1500

Pour les soudures types d'angle, latéral et frontal, on a toujours donné les tensions par rapport à la surface de contact, parce que la rupture par fatigue

s'amorce en général dans cette zone. La rupture par fatigue pouvant se produire le long de la surface de contact du cordon de soudure, ainsi que dans la zone de pénétration de la fusion, il faut examiner ces deux endroits et tenir compte des résultats obtenus.

La résistance à la fatigue du groupe des soudures d'angle dépend des dimensions des tôles et des cordons de soudure, et par suite, des grandeurs de déformation qui en découlent; les données concernant les résistances à la fatigue — Tableau 1 — ainsi que les rapports des résistances — Tableau 7 — ne doivent être considérées que provisoirement comme directives obligatoires. Des essais approfondis devraient encore permettre de déterminer quelle est l'influence de la longueur du cordon, de la largeur du couvre-joint, de la hauteur du cordon et de l'épaisseur de la tôle.

Les valeurs moyennes générales des résistances à la fatigue de soudures bout à bout et des soudures du groupe des 3 autres types sont représentées par les diagrammes des fig. 13 et 14 pour la surface de contact et la zone de pénétration de la fusion.²

Les moyennes des *résistances statiques à la traction*³ de soudures bout à bout et soudures d'angle exécutées selon les règles de l'art, de même que les *coefficients de pliage*³ ressortent du tableau récapitulatif 2 suivant. Les résultats des résistances à la traction sont représentés graphiquement dans les fig. 1, 3, 5 et 7.

Tableau 2.

Sollicitation à la traction	Résistances statiques à la traction kg/cm ²	
	Moyenne	Minimum
soudure bout à bout	4000	3600
soudure d'angle	2500	2250
soudure latérale	2500	2250
soudure frontale	3500	3150

² Les résistances à la fatigue par oscillations harmoniques (traction — compression, volume) ne purent pas être déterminées directement par des essais. Les résistances à la fatigue par flexion et torsion (fibre extérieure) obtenues dans la machine de *Schenck* donnèrent les valeurs relatives suivantes:

$$\text{flexion } \frac{\sigma_D}{\sigma_U} = 0,7 \quad \text{— fig. 9 et 10 —}$$

$$\text{torsion } \frac{\tau_D}{\tau_U} = 0,6 \quad \text{— fig. 12 —}$$

soit en moyenne 0,65. On se basa sur cette valeur moyenne de 0,65 pour déterminer la résistance à la fatigue par oscillations harmoniques dans l'essai de traction — compression; par conséquent pour la soudure bout à bout, cette résistance est de $\sigma = 0,65 \cdot 1400 \cong 900 \text{ kg/cm}^2$. La valeur de σ , déterminée de cette manière, correspond fort bien à la valeur relative obtenue par *Haigh* dans sa machine à oscillations pour traction-compression

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_U} = \frac{930}{1470} = 0,64$$

³ Les valeurs contenues dans les tableaux 2 — Résistances statiques à la traction — et 3 — Taux de fatigue (tensions admissibles) sont basées sur les essais exécutés de 1927 à 1935 au Laboratoire fédéral d'essai des matériaux, et elles ont été admises sans aucun changement dans la *nouvelle ordonnance fédérale* du 14 mai 1935 *concernant le calcul, l'exécution et l'entretien des constructions métalliques placées sous le contrôle de la Confédération*.

Épaisseur du cordon de soudure	Coefficient de pliage $K = 50 \cdot \frac{s}{r}$	
	Racine dans la zone comprimée	tendue
< 12 mm	28	20
12—20 mm	20	16
> 20 mm	16	12

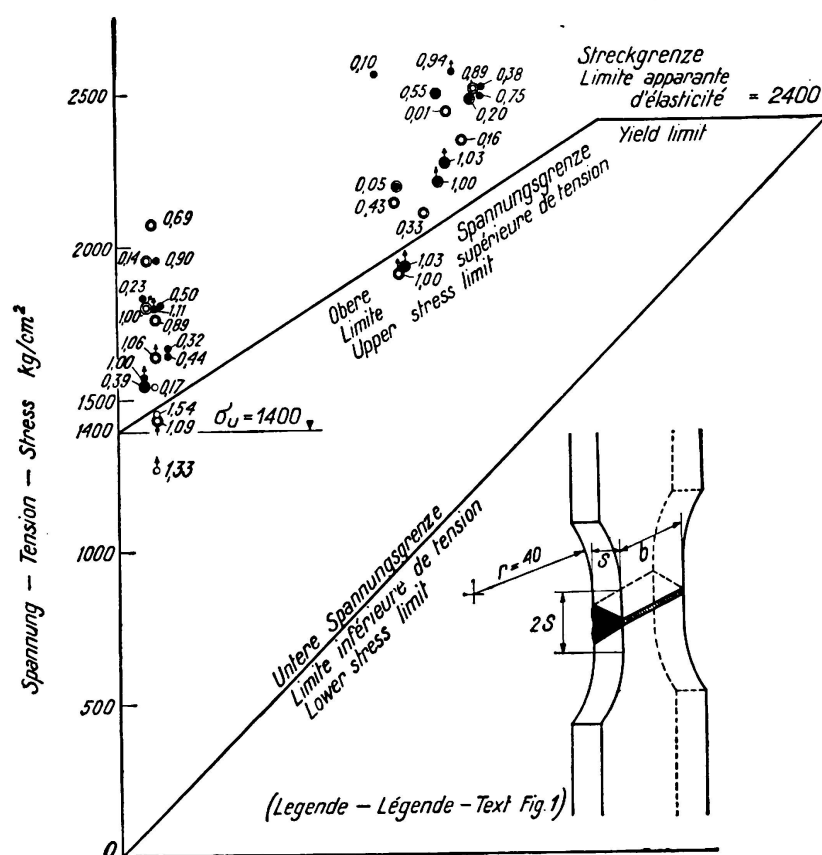


Fig. 2.

Soudure bout à bout. Essais de fatigue à la traction.

Lorsque la teneur en carbone augmente dans le but d'améliorer les résistances mécaniques, les précautions pendant le soudage ou le découpage à la flamme augmentent et les difficultés s'accroissent. Parmi ces mesures citons :

un réchauffement préalable, un réchauffement pendant le soudage, un soudage avec des électrodes épaisses et par couches plus épaisses (ce dernier mode opératoire ne peut être exécuté lors d'un soudage au plafond), ensuite, lorsque les soudures sont exécutées : un recuit au-dessus de la température supérieure de transformation (normalisation ; pour l'acier moulé, cette opération est liée à la stabilisation de la structure par une chauffe de longue durée), un revenu éliminant les tensions internes (jusqu'en dessous de la température inférieure de transformation) et, cas échéant, un recuit au chalumeau.

On peut appliquer ces mesures lors de la construction de conduites forcées ou de pièces en acier moulé, mais lorsqu'il s'agit de ponts ou de charpentes métalliques, elles ne sont praticables que dans certains cas extrêmement rares (distorsion, frais).

III. Contraintes admissibles (taux de fatigue).

Pour des assemblages soudés en acier de construction, qualité normale ($\beta_z \cong 4000 \text{ kg/cm}^2$), les contraintes admissibles en kg/cm^2 sont les suivantes:

Tableau 3.

	Ponts	Charpentes métalliques ⁴
<i>Soudures bout à bout</i>		
Traction	$850 \left(1 + 0,4 \frac{A}{B}\right)$ — fig. 16 —	$1000 \left(1 + 0,4 \frac{A}{B}\right)$ — fig. 16 —
Compression	$1200 \left(1 + 0,3 \frac{A}{B}\right)$ — fig. 15 —	$1400 \left(1 + 0,3 \frac{A}{B}\right)$ — fig. 15 —
Cisaillement	$660 \left(1 + 0,4 \frac{A}{B}\right)$	$770 \left(1 + 0,4 \frac{A}{B}\right)$
<i>Soudures d'angle</i>		
Traction	$425 \left(1 + 0,4 \frac{A}{B}\right)$ — fig. 17 —	$500 \left(1 + 0,4 \frac{A}{B}\right)$ — fig. 17 —
Compression	$600 \left(1 + 0,3 \frac{A}{B}\right)$	$700 \left(1 + 0,3 \frac{A}{B}\right)$
Cisaillement	$480 \left(1 + 0,4 \frac{A}{B}\right)$	$560 \left(1 + 0,4 \frac{A}{B}\right)$

Dans ces formules A désigne la plus petite limite des forces extérieures en valeur absolue (Moment, force axiale ou effort tranchant), et B la plus grande limite de ces mêmes forces extérieures, en valeur absolue; le signe (+) devient (—) si les limites sont de signes contraires. Le tableau récapitulatif 4 permet de comparer entre elles rivures et soudures; il donne les valeurs relatives des taux de fatigue des soudures par rapport aux rivures pour le cas où $A = 0$ (Résistance aux efforts répétés variant entre $\sigma_{\max} = +\sigma_U$ et $\sigma_{\min} = 0$).

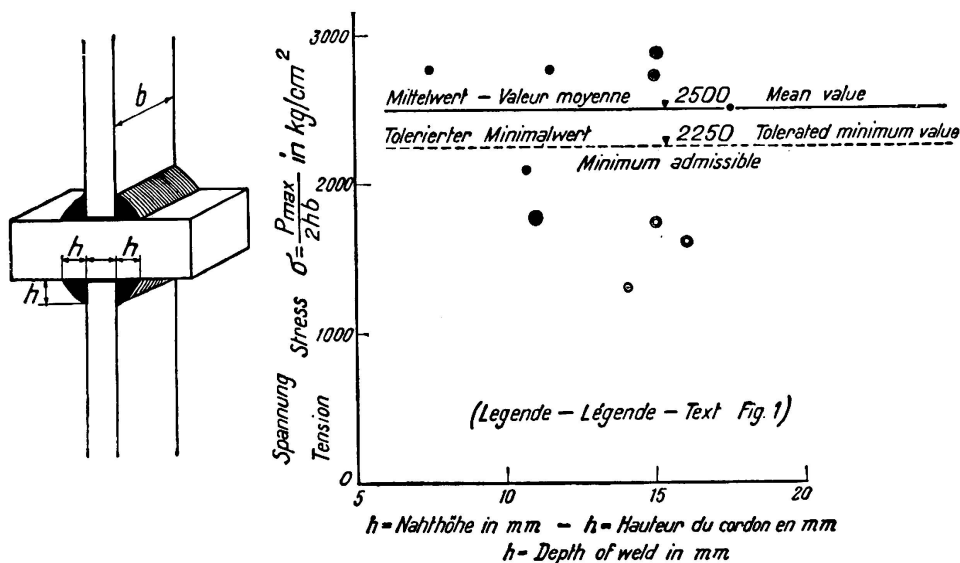


Fig. 3.
Soudure
d'angle.
Résistance à la
traction.

⁴ Ces valeurs sont aussi valables pour les ponts si l'on tient compte de toutes les influences secondaires, c'est-à-dire des efforts dus au freinage, au frottement, aux variations de température et autres. En même temps les taux de fatigue de la colonne «ponts» ne doivent pas être dépassés lorsqu'il s'agit des efforts principaux dus aux charges permanentes, aux surcharges stables et mobiles accidentelles, à la force centrifuge et aux actions dynamiques.

Tableau 4.
— Valeurs relatives ⁵ —

Genre de sollicitation	Rivure	Soudure	
		bout à bout	d'angle
Traction	1,00	0,70	0,35
Compression	1,00	1,00	0,50
Cisaillement — torsion —	0,58	0,55	—
Cisaillement	0,80	—	0,40

Les valeurs relatives pour les autres valeurs de $\frac{A}{B}$ sont pratiquement du même ordre de grandeur.

⁵ Les rapports donnés correspondent dans chaque cas aux valeurs relatives des résistances à la fatigue des soudures par rapport aux rivures. Les résultats des essais de résistance à la fatigue caractérisent les assemblages soudés d'une manière beaucoup plus nette que les résultats des essais de résistance statique; les grandes différences des valeurs des résistances à la fatigue permettent de mieux distinguer les assemblages soudés corrects des assemblages incorrects. Ce fait important a été déterminant dans le choix des rapports des résistances à la fatigue, et cela abstraction faite des variations plus ou moins fortes des sollicitations qui peuvent se produire en service entre certaines limites de diverses grandeurs. (Alternance des tensions, coups de bélier, interruptions dans l'exploitation, variations de pression, changements de température, etc.). Des cordons de soudure ayant de légères fissures (fine fissuration) et dont le matériau a des défauts, se comportent même sous une charge surtout statique de longue durée, comme un matériau pratiquement sans défauts soumis à des changements de charges répétés; la fissure se propage avec le temps jusqu'à ce que finalement la rupture ait lieu.

En nous basant sur les essais du L.F.E.M., nous donnons ci-après les valeurs relatives des résistances à la fatigue des soudures par rapport aux rivures, pour des efforts répétés variant entre $\sigma_{\max} = + \sigma_U$ et $\sigma_{\min} = 0$.

Soudures bout à bout

	Traction	Compression	Cisaillement
non recuit	$\alpha_1 = \frac{1400}{1900} \cong 0,7$	$\alpha_1 = 1,0$	$\alpha = \frac{1100}{1900} \cong 0,55$
	$\alpha_2 = \frac{1600}{1900} \cong 0,85$	$\alpha_2 = 1,0$	
recuit	$\alpha_1 = \frac{1500}{1900} \cong 0,8$		
	$\alpha_2 = \frac{1800}{1900} \cong 0,95$		

— fig. 13 —

Soudures types d'angle, latéral et frontal

$\alpha_1 = \frac{700}{1900} \cong 0,35$	$\alpha_1 = 0,5$	$\frac{750}{1900} \cong 0,4$
$\alpha_2 = \frac{1600}{1900} \cong 0,85$	$\alpha_2 = 1,0$	

— fig. 14 —

Zone de pénétration de la fusion

Soudures bout à bout

$\alpha_1 = \frac{1600}{1900} \cong 0,85$	$\alpha_1 = 1,0$	
$\alpha_2 = \frac{1600}{1900} \cong 0,85$	$\alpha_2 = 1,0$	0,58

Groupe des soudures d'angle

$\alpha_1 = \frac{1100}{1900} \cong 0,6$	$\alpha_1 = 0,9$	0,53
$\alpha_2 = \frac{1600}{1900} \cong 0,85$	$\alpha_2 = 1,0$	

— fig. 14 et 15 —

Lorsque la soudure bout à bout est uniquement sollicitée à la *compression* et qu'il n'y a pas de risque de flambage, la résistance à la fatigue est passablement plus grande que lorsqu'il s'agit d'une sollicitation à la traction; la limite

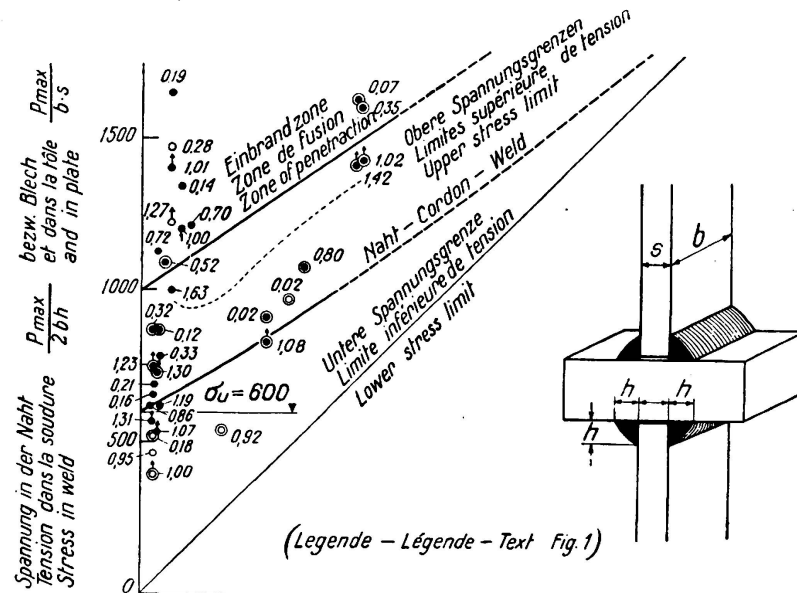


Fig. 4.

Soudure d'angle. Essais de fatigue à la traction.

apparente d'élasticité est un peu moins haute par suite de l'influence thermique ($\sigma_f = 2400 \text{ kg/cm}^2$ au lieu de $\sigma_f = 2600 \text{ kg/cm}^2$). Il est ainsi justifié d'admettre le taux de fatigue valable pour les assemblages rivés, en acier de construction de qualité normale ($\beta_z \approx 4000 \text{ kg/cm}^2$), sollicités à la compression.

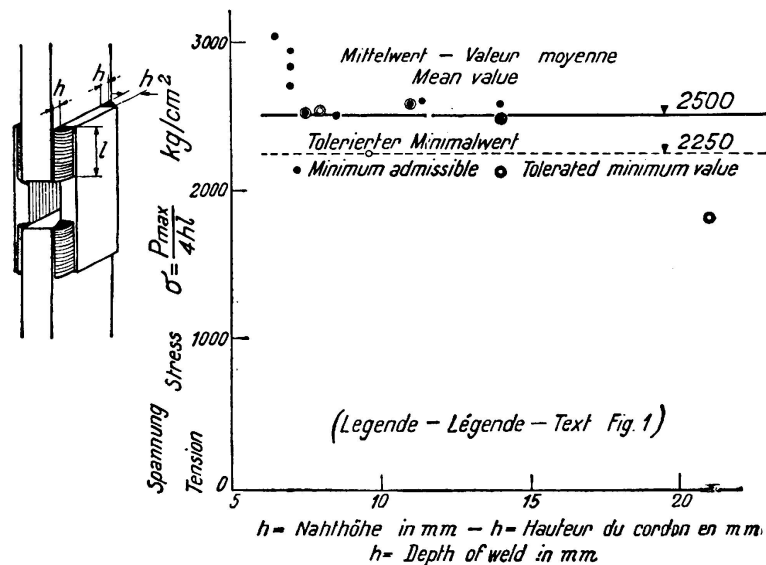


Fig. 5.

Cordons de soudure latéraux. Essais de fatigue à la traction.

En ce qui concerne la sollicitation au cisaillement pur, les soudures bout à bout ne purent être soumises qu'à l'essai de fatigue par torsion dans la machine de *Schenck*. Les valeurs des résistances à la fatigue par torsion ainsi

calculées sont trop grandes, par suite de la répartition plus favorable des tensions dans la section sollicitée. Il en est de même pour les éprouvettes sollicitées à la flexion.

Si l'on se base sur les valeurs relatives des résistances à la fatigue par torsion et flexion pour les soudures bout à bout sollicitées au cisaillement et à la traction, on obtient les valeurs suivantes :

Tableau 5

Résistance à la fatigue par	Sollicitation		Valeurs relatives
	au cisaillement τ_s fig. 12	à la flexion σ_B fig. 9 et 10	
oscillation harmonique variant entre $+\sigma_D$ et $-\sigma_D$	11	15	0,74
efforts répétés variant entre $+\sigma_U$ et 0	18	21	0,86
efforts répétés variant entre $+\sigma_W$ et $+\frac{1}{2}\sigma_W$	29	40	0,73
			Moyenne: $\sim 0,78$

Si l'on admet que les valeurs relatives des taux de fatigue pour le cisaillement et la traction sont les mêmes que celles données par le tableau 4, on obtient le rapport

$$\frac{\tau_{adm}}{\sigma_{adm}} = \frac{0,55}{0,70} \cong 0,78$$

qui est le même que celui trouvé précédemment.

On a choisi comme valeur des taux de fatigue des *soudures d'angle* pour la traction et la compression la moitié (facteur 0,5) des taux de fatigue des sou-

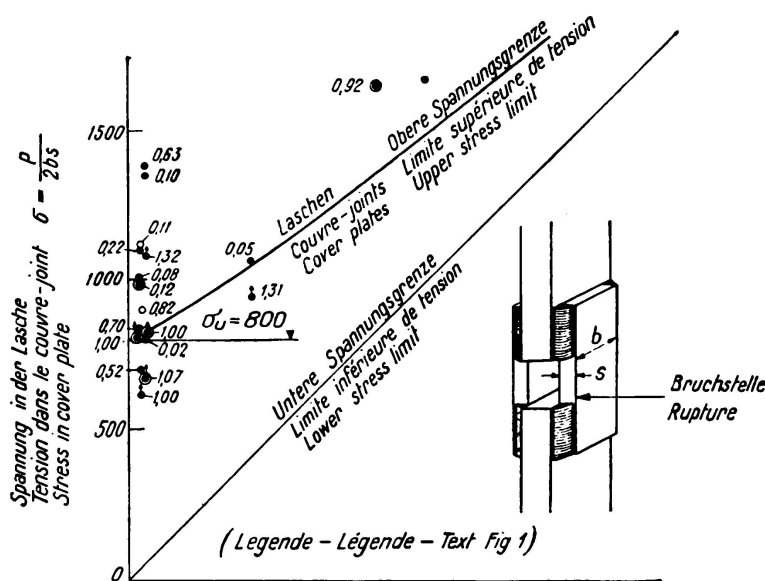


Fig. 6.

Cordons de soudure latéraux. Essais de fatigue à la traction.

plus élevées que celles de soudures d'angle soumises à la traction. On a tenu compte de ce fait en majorant le taux de fatigue pour la traction de

$$\left(\frac{0,40 - 0,35}{0,35} \right) = \frac{1}{7}$$

afin d'obtenir le taux de fatigue pour le cisaillement.

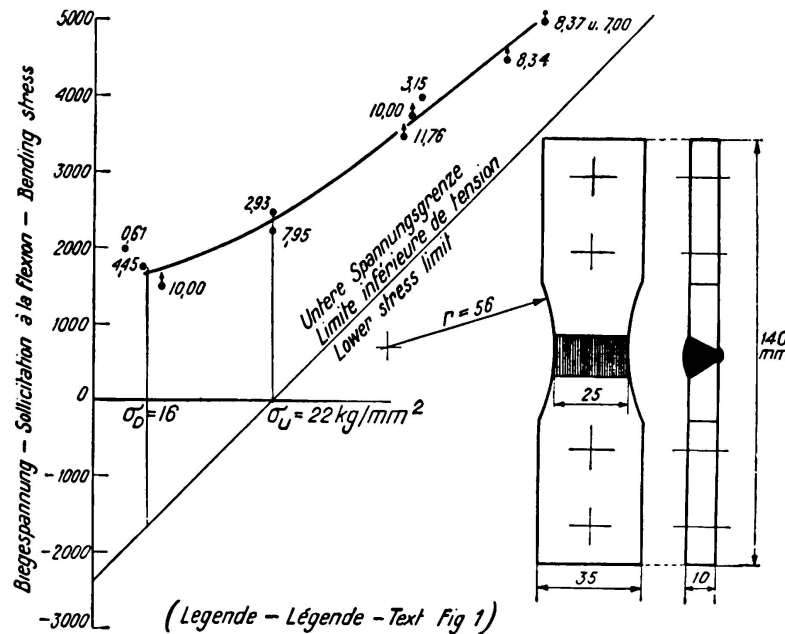


Fig. 9.

Soudure bout à bout; les proéminences du cordon de soudure ne sont pas rabotées. Essais d'endurance par flexion pulsatoire.

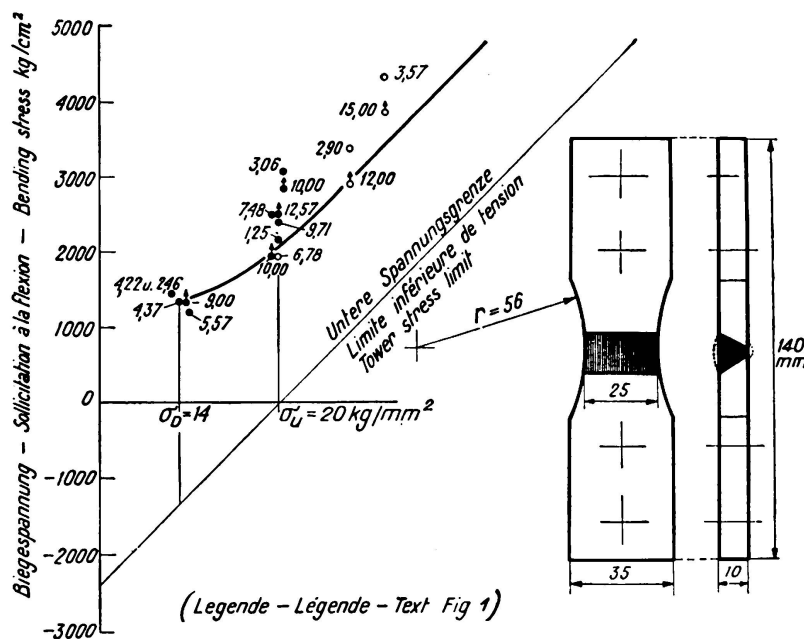


Fig. 10.

Soudure bout à bout; ce qui dépasse du cordon de soudure est raboté. Essais d'endurance par flexion pulsatoire.

Lorsqu'il s'agit de soudures d'angle — fig. 4 —, il ne faut jamais oublier que le matériau acier est sollicité très défavorablement quand on est en présence de rangées de scories et de doublures, qui peuvent provoquer des fentes dans le sens transversal de l'acier. Pour cette raison, il faut prescrire dans tous les cas de quelque importance un matériau autant que possible libéré de scories et de doublures, que l'on peut contrôler par des essais macrographiques de texture et des examens aux rayons Roentgen.

* * *

Les résistances à la fatigue des zones de pénétration de la fusion sont plus grandes que celles des cordons de soudure eux-mêmes (fig. 13 et 14); par conséquent on a choisi pour les zones de pénétration de la fusion des taux de

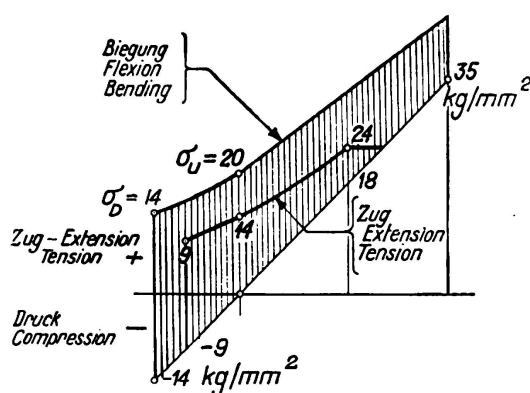


Fig. 11.

Soudure bout à bout.
Résistance à la fatigue.

fatigue plus élevés que ceux des cordons de soudure; les valeurs relatives des taux de fatigue de la zone de pénétration de la fusion par rapport à la rivure seront donc plus grandes.⁶

Tableau 7

— Valeurs relatives⁵ $A = 0$ —

Genre de sollicitation	Rivure	Zone de pénétration de la fusion. Soudure:	
		bout à bout	d'angle
Traction	1,0	0,85	0,60
Compression	1,0	1,0	0,90
Cisaillement-torsion	0,58	0,58	—
Cisaillement	0,8	—	0,53

⁶ De grandes contraintes dans les soudures d'angle peuvent exercer une influence très défavorable sur la résistance à la fatigue de la zone de pénétration de la fusion. Cela s'explique par le fait que le système de contraintes est ici très compliqué. La concentration de tensions qui se produit à l'endroit-même du raccordement reliant le cordon d'angle à l'acier est d'autant plus forte que la soudure d'angle est plus faible; cela aussi parce que le cisaillement latéral τ' croît; or τ' a une influence sur la fatigue car il entre dans l'expression de la contrainte de comparaison résultant de la théorie de la constance de l'énergie de déformation

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + 3(\tau^2 + \tau'^2)}$$

Cette contrainte est déterminante.

IV. Coefficient de sécurité.

Les coefficients de sécurité théoriques calculés en se basant sur les valeurs données dans les chapitres II — Essais du L.F.E.M. — et III — Contraintes admissibles — sont donnés dans le tableau suivant:

Tableau 8.

Ponts

— Soudures bout à bout sollicitées à la traction — (fig. 16 et 17)

Genre de sollicitation	Tensions en kg/cm ²		Coefficient de sécurité n_r
	σ admissible	σ fatigue	
fatigue par oscillation harmonique ($\sigma_{\max} = +\sigma_D$, $\sigma_{\min} = -\sigma_D$)	σ_D 500	900	1,80
fatigue par efforts répétés ($\sigma_{\max} = +\sigma_U$, $\sigma_{\min} = 0$)	σ_U 850	1400	1,65
fatigue par efforts répétés ($\sigma_{\max} = +\sigma_W$, $\sigma_{\min} = +\frac{1}{2}\sigma_W$)	$\frac{1}{2}\sigma_W$ 1020	2000	1,95
$\frac{A}{B} = 1$ (écoulement σ_f)	σ_f 1200	2400	<u>2</u>
		Moyenne:	1,85
			$\sim 1,8$

Charpentes métalliques

— Soudures bout à bout sollicitées à la traction — (fig. 16 et 17)

Genre de sollicitation	Tensions en kg/cm ²		Coefficient de sécurité n_r
	σ admissible	σ fatigue	
fatigue par oscillation harmonique ($\sigma_{\max} = +\sigma_D$, $\sigma_{\min} = -\sigma_D$)	σ_D 600	900	1,50
fatigue par efforts répétés ($\sigma_{\max} = +\sigma_U$, $\sigma_{\min} = 0$)	σ_U 1000	1400	1,40
fatigue par efforts répétés ($\sigma_{\max} = +\sigma_W$, $\sigma_{\min} = +\frac{1}{2}\sigma_W$)	$\frac{1}{2}\sigma_W$ 1200	2000	1,65
$\frac{A}{B} = 1$ (écoulement σ_f)	σ_f 1400	2400	<u>1,72</u>
		Moyenne:	1,57
			$\sim 1,5$

Pour les zones de pénétration de la fusion (zones de transition), les coefficients de sécurité sont pratiquement du même ordre de grandeur. A titre de comparaison, le tableau suivant donne les coefficient de sécurité n_r pour la rivure.

Tableau 9.

Ponts

— fig. 15 —

Genre de sollicitation	Tensions en kg/cm ²		Coefficient de sécurité n_r
	σ admissible	σ fatigue	
fatigue par oscillation harmonique ($\sigma_{\max} = +\sigma_D$, $\sigma_{\min} = -\sigma_D$)	σ_D 840	1300	1,55
fatigue par efforts répétés ($\sigma_{\max} = +\sigma_U$, $\sigma_{\min} = 0$)	σ_U 1200	1900	1,58
fatigue par efforts répétés ($\sigma_{\max} = +\sigma_W$, $\sigma_{\min} = +\frac{1}{2}\sigma_W$)	$\frac{1}{2}\sigma_W$ 1380	2400	1,75
$\frac{A}{B} = 1$ (écoulement σ_f)	σ_f 1560	2600	1,67
		Moyenne:	1,64
			$\sim 1,6$

Charpentes métalliques⁴

— fig. 15 —

Genre de sollicitation	Tensions en kg/cm ²		Coefficient de sécurité n_r
	σ admissible	σ fatigue	
fatigue par oscillation harmonique ($\sigma_{\max} = +\sigma_D$, $\sigma_{\min} = -\sigma_D$)	σ_D 980	1300	1,33
fatigue par efforts répétés ($\sigma_{\max} = +\sigma_U$, $\sigma_{\min} = 0$)	σ_U 1400	1900	1,36
fatigue par efforts répétés ($\sigma_{\max} = +\sigma_W$, $\sigma_{\min} = +\frac{1}{2}\sigma_W$)	$\frac{1}{2}\sigma_W$ 1610	2400	1,50
$\frac{A}{B} = 1$ (écoulement σ_f)	σ_f 1820	2600	1,43
		Moyenne:	1,41
			$\sim 1,4$

De cette comparaison des coefficients de sécurité calculés pour les rivures et les soudures, il résulte que les coefficients de sécurité des soudures sont en moyenne de $\sim 10\%$ supérieurs à ceux des rivures; on peut donc les considérer comme pratiquement équivalents.

* * *

La différence entre le coefficient de sécurité *réel* et le coefficient de sécurité théorique calculé dépend des facteurs suivants:

- degré de concordance des hypothèses de calcul statique et dynamique et des conditions réelles de travail (forces extérieures, système, tensions),
- agencement constructif des détails,
- qualité et caractéristiques mécaniques des matériaux employés,
- sévérité du contrôle pendant l'exécution,
- bienfaisance de l'exécution elle-même.

Le coefficient de sécurité réel ne peut donc être jugé que dans chaque cas individuellement.

V. Méthode de calcul.

Nous développons une méthode de calcul qui permet de déterminer exactement la contrainte produite par des composantes de tension isolées (σ_1 , σ_2 et τ) dans un élément d'un corps sollicité suivant plusieurs axes, tel par exemple l'élément d'une soudure en forme d'hélice d'une conduite forcée ou d'une chaudière. — fig. 18 —

La théorie de la constance de l'énergie de déformation⁷ est valable pour l'acier doux, ainsi que des essais l'ont montré, jusqu'à des sollicitations voisines de la

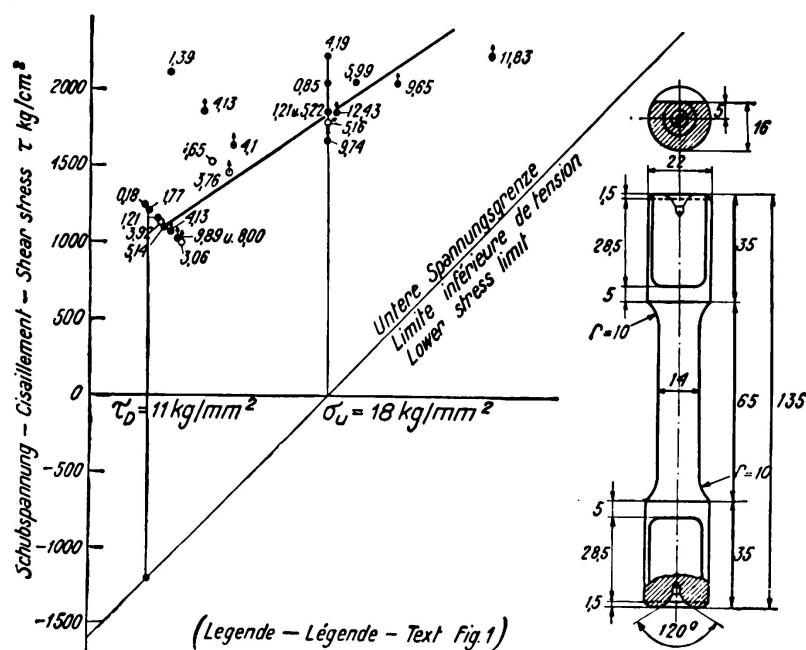


Fig. 12.

Torsion. Résistance à la fatigue.

résistance à la rupture; car l'acier doux est pratiquement homogène et quant à ses caractéristiques mécaniques — résistance, déformation — quasi isotrope, c'est-à-dire qu'il a la même résistance dans deux directions principales.

La contrainte de comparaison pour un élément sollicité suivant deux axes (σ_1 , σ_2 et τ — fig. 18 —) est donnée par l'expression⁸

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + 3\tau^2} \quad (1)$$

Dans un assemblage soudé, la résistance perpendiculaire au cordon de soudure et la résistance dans le sens longitudinal du cordon ne sont cependant pas égales;

⁷ M. Roš und A. Eichinger: „Versuche zur Klärung der Frage der Bruchgefahr, III Metalle“. Rapport N° 34 du Laboratoire fédéral d'essai des matériaux, Zurich, février 1929.

⁸ La théorie de la constance de l'énergie de déformation de *Huber-Mises-Hencky* qui est, ainsi que l'ont montré les essais du L.F.E.M. Zurich, la théorie généralisée de *Mohr*, est à la base du calcul de la contrainte d'éléments sollicités suivant un ou plusieurs axes dans la Nouvelle Ordonnance fédérale du 14 mai 1935 concernant le calcul, l'exécution et l'entretien des constructions métalliques placées sous le contrôle de la Confédération.

il faut, afin de se tenir à des principes uniformes, transformer l'expression de la contrainte fictive de comparaison, valable pour des corps quasi isotropes, de telle manière que l'anisotropie des assemblages soudés ne soit pas négligée. Le moyen

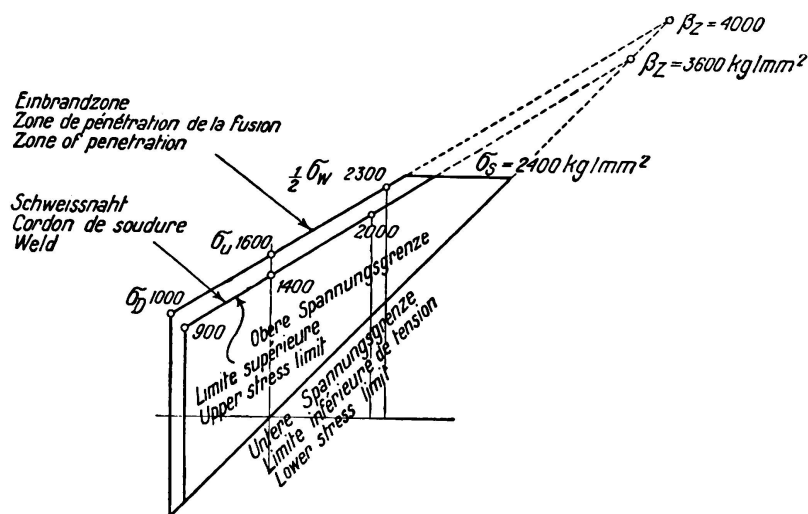


Fig. 13.

Soudures bout à bout. Limites de résistance à la fatigue.

le plus simple et le plus juste d'effectuer cette transformation consiste dans l'introduction du rapport des résistances α où

$$\alpha = \frac{\text{Résistance du cordon de soudure}}{\text{Résistance de l'acier(rivure)}}$$

et en tenant compte des facteurs β et γ multipliant les termes $\sigma_1 \cdot \sigma_2$ et τ ; ces facteurs sont déterminés expérimentalement.

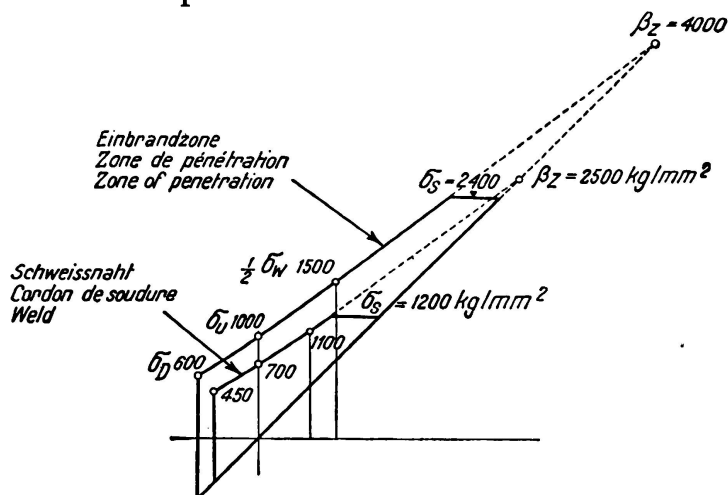


Fig. 14.

Soudures d'angle, soudures latérales et soudures frontales. Limites de résistance à la fatigue.

Soudures bout à bout.

Premier cas.

Les tensions normales σ_1 et σ_2 , perpendiculaires l'une à l'autre sont les deux ou des sollicitations à la traction ou des sollicitations à la compression. On a

alors les expressions suivantes :

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\alpha_1}\right)^2 + \gamma \cdot \tau^2} \quad (2)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_2}{\alpha_2}\right)^2 + \gamma \cdot \tau^2} \quad (3)$$

— fig. 19 —

C'est la plus grande des deux valeurs qui est déterminante. — fig. 19 —

Deuxième cas.

Les tensions normales σ_1 et σ_2 ne sont pas de mêmes signes mais de signes contraires, alors on a :

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\alpha_2}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_1 \sigma_2}{\alpha_1 \alpha_2}\right) + \gamma \cdot \tau^2} \quad (4)$$

— fig. 19 —

Pour la sollicitation à la fatigue par efforts répétés variant entre $\sigma_{\max} = +\sigma_U$ et $\sigma_{\min} = 0$, on a les valeurs suivantes :

	Traction	Compression	
$\alpha_1 =$	0,7	1,0	— Voir tableau 4 —
$\alpha_2 =$	0,85	1,0	
$\beta =$		$\frac{1}{2}$	
$\gamma =$		3	

$\alpha_2 = 0,85$ pour la traction résulte d'essais exécutés au L.F.E.M.; pour des soudures bout à bout sollicitées dans le sens longitudinal, la résistance à la fatigue par efforts répétés variant entre $\sigma_{\max} = +\sigma_U$ et $\sigma_{\min} = 0$ est en moyenne de 1600 kg/cm², pour la rivure cette valeur est de 1900 kg/cm², par conséquent

$$\alpha_2 = \frac{1600}{1900} \approx 0,85$$

Les contraintes de comparaison ainsi déterminées peuvent être au plus égales aux tensions admissibles par efforts répétés variant entre $\sigma_{\max} = +\sigma_U$ et $\sigma_{\min} = 0$ fixées pour les assemblages rivés, soit

$\sigma_{o \text{ adm}} = 1200 \text{ kg/cm}^2$ pour les ponts
et $\sigma_{o \text{ adm}} = 1400 \text{ kg/cm}^2$ pour les charpentes métalliques⁹

— Tableau 9 —

Les mêmes procédés appliqués aux soudures d'angle et à la zone de pénétration de la fusion, toutefois en tenant compte des coefficients α s'y rapportant — voir tableaux 4 et 7 — aboutissent aux expressions suivantes :

⁹ Dans le cas de conduites forcées, les taux de fatigue $\sigma_{o \text{ adm}}$ suivants sont valables pour les soudures bout à bout et pour des sollicitations résultant de la pression en service, majorées de 10% afin de tenir compte des surpressions dues au coup de bélier.

		Qualité de l'acier	
Conduites forcées		M I	M II
		$\beta_z = 3500-4400 \text{ kg/cm}^2$	$\beta_z = 4100-4700 \text{ kg/cm}^2$
Conduite principale;	cordons longitudinaux	900	1050
	cordons en hélice	1050	1230
Embranchements:	cordons longitudinaux	800	930
	cordons en hélice	930	1080

Soudures d'angle.

Troisième cas.

Les tensions normales σ_1 et σ_2 sont les deux ou des sollicitations à la traction ou des sollicitations à la compression. La contrainte de comparaison est alors

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\alpha_1}\right)^2 + \gamma \cdot \tau^2} \leq \sigma_o \text{ adm} \quad (5)$$

et

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_2}{\alpha_2}\right)^2 + \gamma \cdot \tau^2} \leq \sigma_o \text{ adm} \quad (6)$$

— fig. 20 —

La plus grande des 2 valeurs de σ_g est valable.

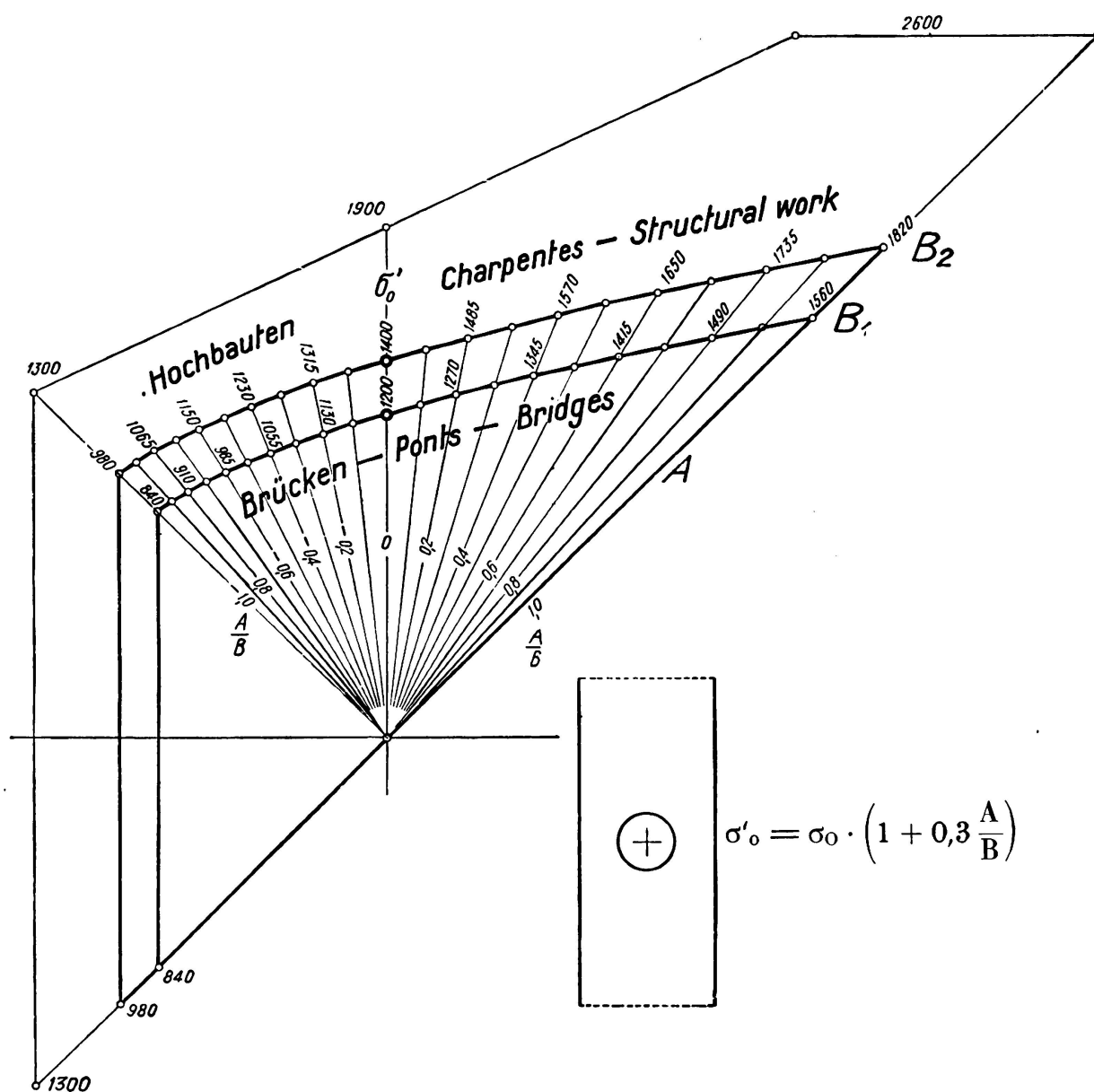


Fig. 15.

Rivure. Tensions admissibles.

Quatrième cas.

Les tensions normales σ_1 et σ_2 sont de signes contraires. La contrainte de comparaison devient:

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\alpha_2}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\alpha_1 \cdot \alpha_2}\right) + \gamma \cdot \tau^2} \leq \sigma_o \text{ adm} \quad (7)$$

— fig. 20 —

où l'on a:

	Traction	Compression
$\alpha_1 =$	0,35	0,5
$\alpha_2 =$	0,85	1,0
$\beta =$	$1/4$	
$\gamma =$	6	

— Tableau 4 —

La question de la valeur à donner à la contrainte admissible maximum est encore en suspens, les expériences acquises sur ce sujet sont également insuffisantes; de même, on n'a pas encore éclairci le comportement de soudures d'angle

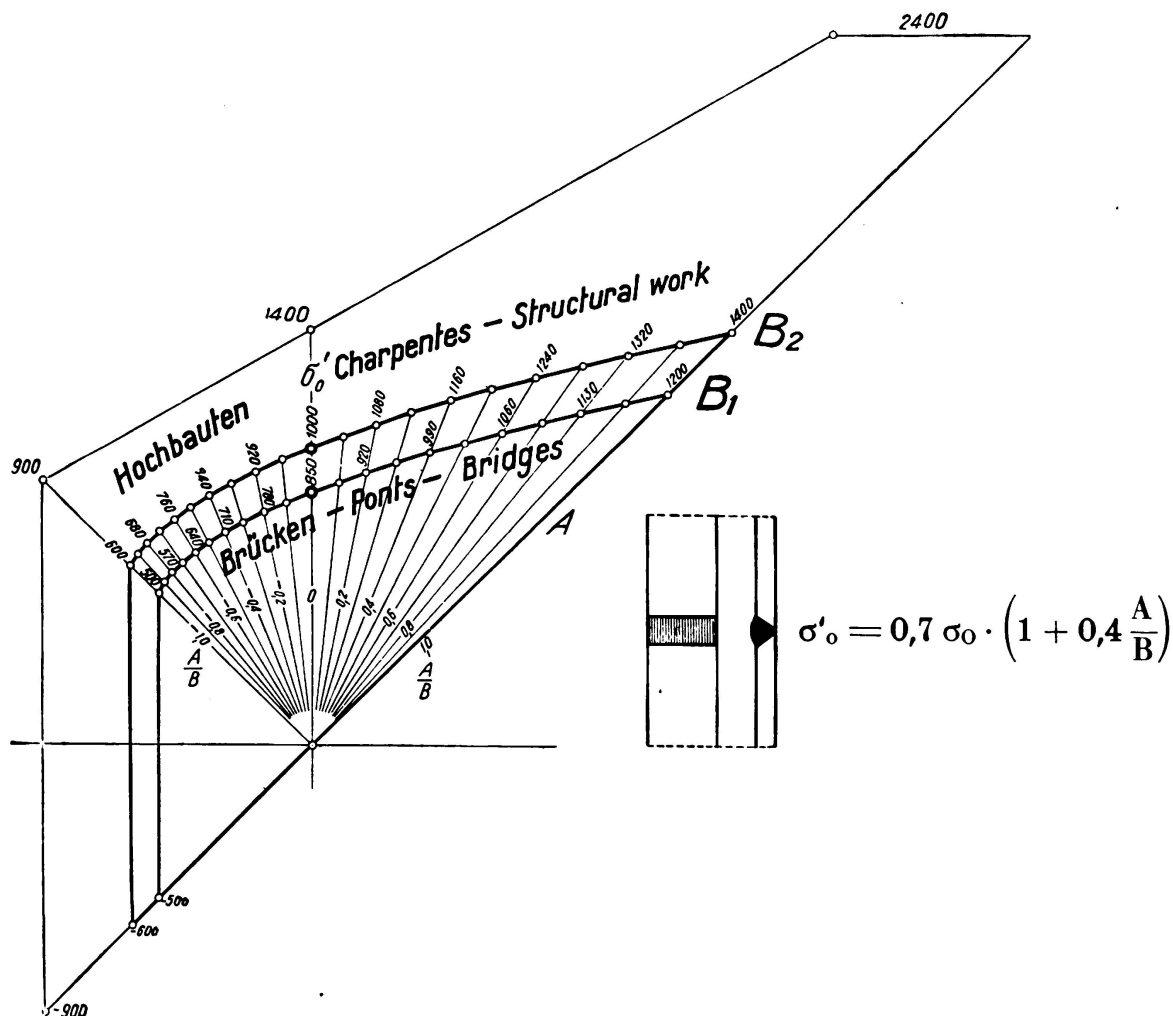


Fig. 16.

Soudure bout à bout. Tensions admissibles.

sollicitées à la fois à un effort longitudinal et au cisaillement (p. ex. soudures d'angle reliant l'âme et la membrure de poutres soudées, sollicitées à la flexion). Des essais sont indispensables pour déterminer la grandeur de l'influence exercée par l'effet de soulèvement de l'acier voisin de la soudure.

Zone de pénétration de la fusion.

Cinquième et sixième cas. — Soudure bout à bout. —

Si l'on fait abstraction de la différence relativement faible entre $\alpha_1 = 0,8$ et $\alpha_1 = 0,7$, on peut directement utiliser les expressions valables pour la soudure bout à bout elle-même. Cas 1 et 2 — fig. 19 —

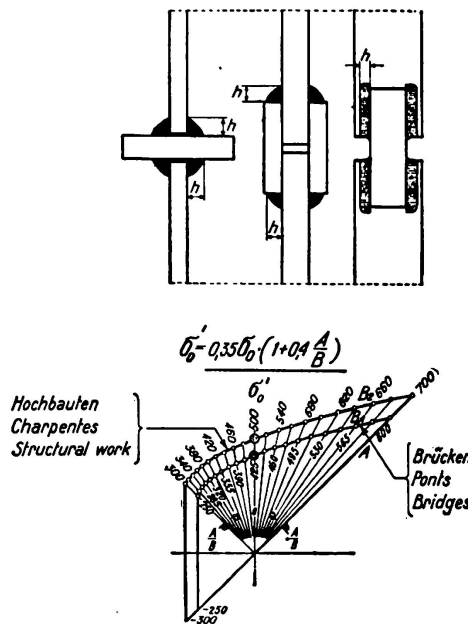


Fig. 17.

Soudures d'angle, soudures latérales et soudures frontales.
Tensions admissibles.

Septième cas. — Soudure d'angle. —

σ_1 et σ_2 sont les deux ou des sollicitations à la traction ou des sollicitations à la compression; on a

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\alpha_1}\right)^2 + \gamma \cdot \tau^2} \leq \sigma_{0 \text{ adm}} \quad (8)$$

et

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_2}{\alpha_2}\right)^2 + \gamma \cdot \tau^2} \leq \sigma_{0 \text{ adm}} \quad (9)$$

— fig. 21 —

Huitième cas. — Soudure d'angle. —

σ_1 et σ_2 sont de signes contraires, alors σ_g devient:

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\alpha_2}\right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_1 \sigma_2}{\alpha_1 \alpha_2}\right) + \gamma \cdot \tau^2} \leq \sigma_{0 \text{ adm}} \quad (10)$$

— fig. 21 —

où l'on a

	Traction	Compression
$\alpha_1 =$	0,6	0,9
$\alpha_2 =$	0,85	1,0
$\beta =$	$\frac{1}{3}$	
$\gamma =$	3,5	

— Tableau 7 —

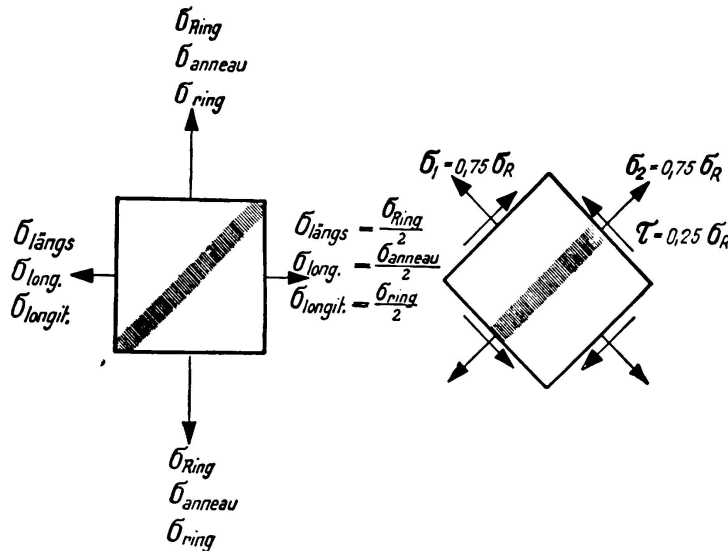


Fig. 18.

Soudure en forme d'hélice. Système des sollicitations.

Les avantages de la méthode de calcul du L. F. E. M. sont illustrés par quelques exemples :

Soudure bout à bout oblique — Tension principale σ_1 , uniaxiale. —

Position pratiquement la plus favorable du cordon de soudure : inclinaison de 45° par rapport à la direction de la force. On a

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \tau = \frac{\sigma_1}{2}$$

soit en utilisant l'équation (5)

$$\sigma_1 \sqrt{\left(\frac{0,5}{0,7}\right)^2 + 3 \cdot 0,5^2} = 1,12 \sigma_1 \leq \sigma_o \text{ adm}$$

$$\sigma_1 = 0,89 \sigma_o \text{ adm}$$

Avantage par rapport à la soudure bout à bout perpendiculaire à la direction de la force : $\frac{0,89}{0,70} \cong 1,27 \sim 27 \%$. Les majorations sont pour des cordons obliques de

30° 45° 60° par rapport à la perpendiculaire
à la direction de la force
de 8 % 27 % 23 %.

Soudure d'angle oblique — Tension principale $\frac{P}{h}$ uniaxiale. —

Position pratiquement la plus favorable du cordon de soudure: inclinaison de 60° par rapport à la perpendiculaire à la direction de la force.

On a $\sigma_h = \frac{P}{h} \sigma_1 = 0,25 \sigma_h$; — $\tau = 0,43 \sigma_h$ par unité de longueur
de longueur $\alpha_1 = 0,35 \quad \alpha_2 = 0,85$
 $h =$ hauteur du cordon de soudure.

De l'équation (6) — fig. 20 — on tire

$$\sigma_h \cdot \sqrt{\left(\frac{0,25}{0,35}\right)^2 + 6 \cdot 0,43^2} = 1,28 \sigma_h \leq \sigma_o \text{ adm.}$$

$$\sigma_h \leq 0,78 \sigma_o \text{ adm.}$$

Par rapport à $\sigma_h \leq 0,35 \sigma_o \text{ adm}$ pour un cordon de soudure d'angle perpendiculaire à la direction de la force, le gain est de 100 %.

Cordon de soudure en forme d'hélice de réservoirs, chaudières et conduites forcées.

Le système de sollicitation suivant deux directions agissant sur un élément de la soudure est représenté par la fig. 18 (La troisième tension principale qui n'est autre que la pression intérieure pour un élément situé sur la paroi, à l'intérieur, peut être négligée). De l'application de l'équation (5) résulte

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{0,7}\right)^2 + 3 \tau^2} \leq \sigma_o \text{ adm.}$$

$$\sqrt{\left(\frac{0,75 \sigma_{\text{anneau}}}{0,70}\right)^2 + 3 (0,25 \sigma_{\text{anneau}})^2} = 1,15 \sigma_{\text{anneau}} \leq \sigma_o$$

d'où

$$\sigma_{\text{anneau adm}} = 0,87 \sigma_o \text{ adm.}$$

Par rapport à une soudure longitudinale, parallèle à l'axe du cylindre, pour laquelle $\sigma_{\text{anneau adm}} = 0,70 \sigma_o \text{ adm}$, le gain est de

$$\frac{0,87}{0,70} = 1,25 \text{ soit } 25 \text{ \%}.$$

Pour des soudures bout à bout recuites au four afin de faire disparaître les tensions internes,¹¹ on peut fixer la tension annulaire admissible $\sigma_{\text{anneau adm}}$ à $0,8 \sigma_o \text{ adm}$; les récipients, dont les soudures sont en forme d'hélice et ayant subi en entier un recuit, ont ainsi la même résistance que les récipients sans soudures, en se basant sur $\sigma_o \text{ adm}$ pour les rivures.¹²

En choisissant judicieusement la forme et la disposition des cordons de soudure, on obtient des avantages appréciables qui militent en faveur des assemblages soudés.

* * *

¹¹ Un revenu exécuté sur des soudures d'angle afin d'éliminer les tensions internes améliore la résistance de la zone de pénétration de la fusion, mais pas la soudure d'angle elle-même.

¹² La résistance à la fatigue de récipients complètement dépourvus de joints est plus grande que celle de récipients rivés; les récipients sans joints sont par conséquent supérieurs aux récipients soudés, à cordons disposés en hélice.

Lorsqu'il s'agit de sollicitations à la fatigue suivant plusieurs directions, on peut admettre comme taux de fatigue (contraintes de comparaison) pour tout le domaine s'étendant des résistances aux efforts par oscillation harmonique à la limite apparente d'élasticité, pour les soudures bout à bout, le groupe des soudures d'angle et les zones de pénétration de la fusion, les valeurs correspondant aux données du tableau 3 — fig. 15, 16 et 17 —, mais en tenant compte des relations exprimées par les équations (2) à (10) — fig. 19, 20, 21 —.

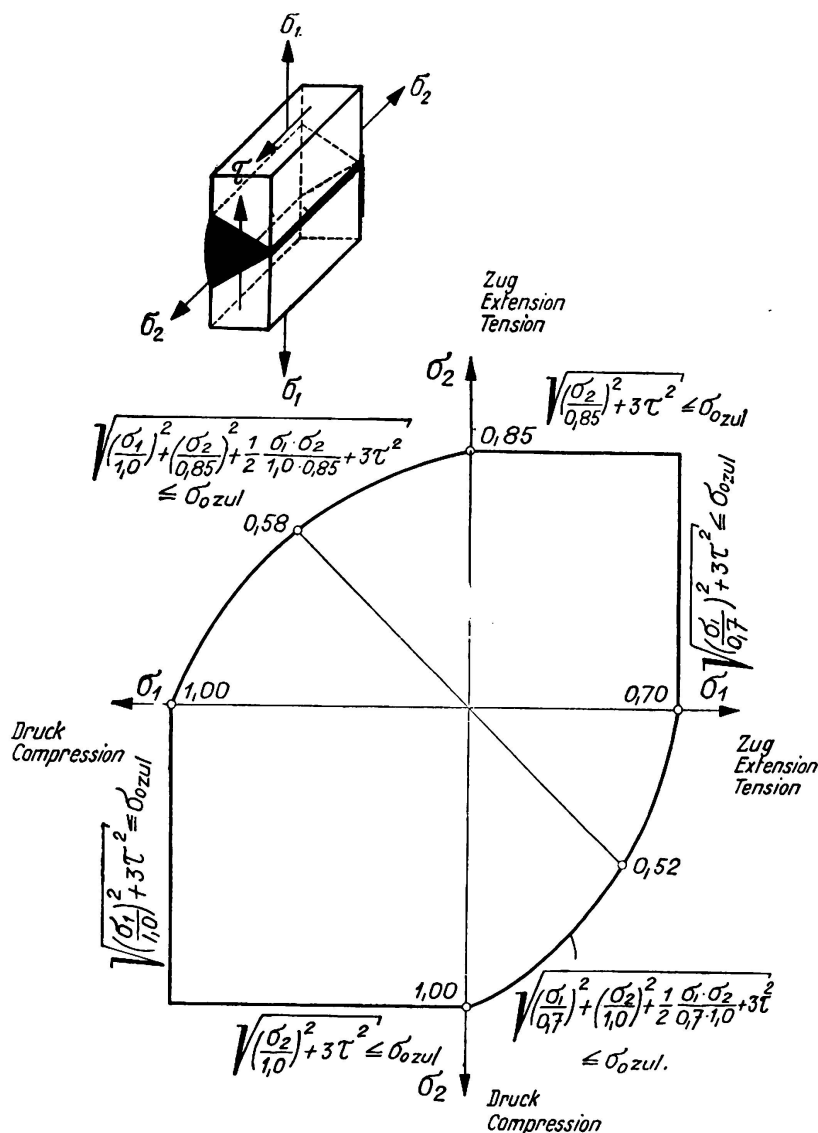


Fig. 19.

Soudures bout à bout, sollicitées suivant deux axes. Systèmes de sollicitation admissibles.

VI. Expériences acquises.

C'est la construction des *réceptacles* et *réservoirs* qui possède les plus anciennes expériences; elles ont donné entière satisfaction tant que l'exécution était faite selon les règles du métier et que l'on vouait toute son attention à la disposition des détails.

Les expériences les plus récentes, faites dans la construction des *conduites forcées* ont été, à part quelques échecs, en général satisfaisantes. Dans ce genre de construction, on s'est mis ces derniers temps à souder des parois épaisses et des *aciers à teneur élevée en carbone*; on n'a pas encore d'expériences suffisantes à ce sujet; ces procédés seront couronnés de succès à condition que le

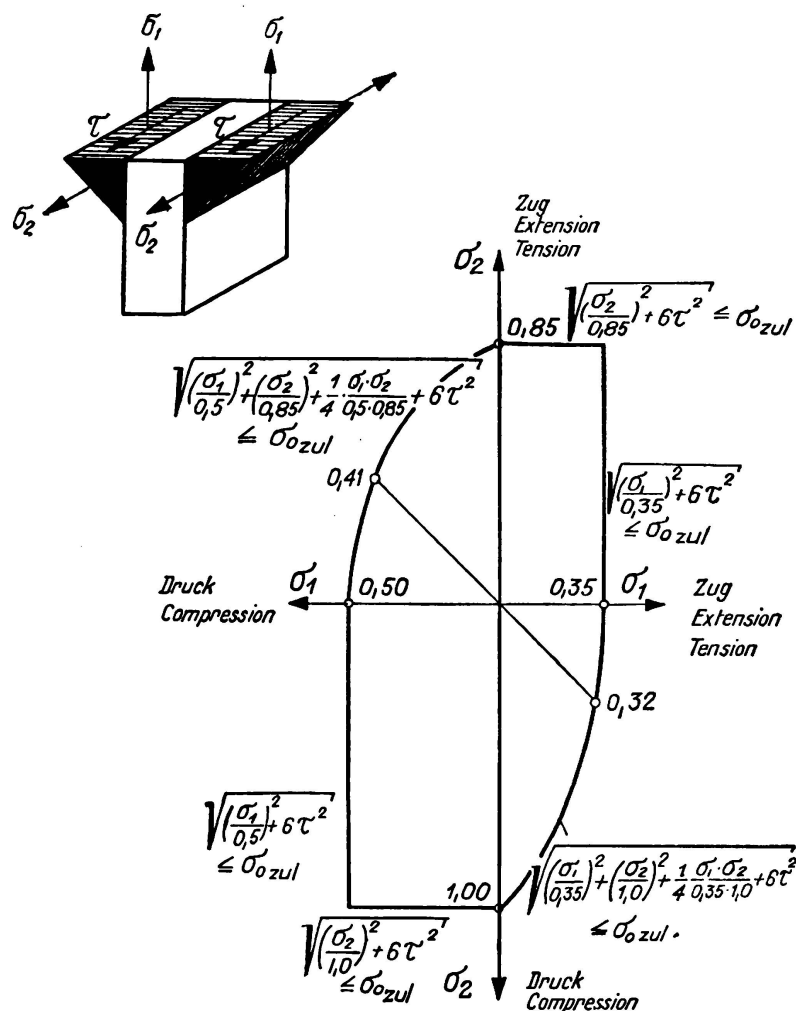


Fig. 20.

Soudures d'angle, soudures latérales et soudures frontales, sollicitées suivant deux axes.
Systèmes de sollicitation admissibles.

procédé métallurgique soit approprié et que la construction et la disposition des détails soient irréprochables.

La soudure d'aciers à teneur élevée en carbone et d'aciers spéciaux enregistre des succès et des échecs. La résistance à la fatigue d'aciers à teneur élevée et très élevée en carbone et d'aciers spéciaux n'est, lorsque la tension initiale est faible, pas beaucoup ou même pas du tout plus grande que celle de l'acier doux normal de construction. Ce n'est que lorsque la tension initiale augmente que la résistance à la fatigue de ces aciers croît plus rapidement que celle de l'acier de construction normal, et que par conséquent les avantages des aciers de qualité apparaissent au premier plan.

On doit donner la préférence à l'emploi d'*électrodes* de section pas trop forte et à l'exécution de couches pas très épaisses, le traitement thermique est ainsi plus efficace que si l'on employait des électrodes de section trop grande et si l'on appliquait des couches très épaisses, parce que lors du refroidissement rapide, il se forme la structure moins déformable de Widmannstätten. On peut seulement l'éviter en chauffant au-dessus de la température supérieure de transformation, ce qui est le cas pour les couches intérieures, mais qui par contre ne peut se produire pour les couches extérieures, que par un recuit au four ou au chalumeau.

Les *tensions internes* ne menacent les constructions soudées que si de fines fissures se produisent, soit parce que la soudure est exécutée d'une manière inappropriée lors de l'assemblage des pièces, soit parce que les pièces ou les éléments de construction sont trop rigides; les tensions internes peuvent aussi menacer la construction lorsqu'elles sont excessivement grandes.

Si le mode de fabrication et de construction, de même que l'exécution le permettent, il est vivement à recommander de procéder à un recuit des cordons de soudure au chalumeau, au-dessus de la température supérieure de transformation, suivi d'un revenu de toute la pièce jusqu'à une température suffisante en-dessous de la température inférieure de transformation. Cette opération a pour but d'une part la normalisation des couches de soudure extérieure fragiles, refroidies trop rapidement, ce qui permet d'améliorer leur capacité de déformation, d'autre part l'élimination ou au moins la réduction des tensions internes. Un revenu faisant disparaître les tensions internes est expressément à recommander partout où il est possible de l'exécuter.

On reconnaît comme causes des succès signalés jusqu'à présent:

l'emploi d'aciers inappropriés, à haute teneur en carbone, contenant des impuretés, des inclusions, etc. (structure paillée, doublures);

le traitement mécanique inapproprié de l'acier — fort écrouissage et pliage à froid de profils rigides;

le traitement thermique inapproprié — réchauffement préalable négligé, revenu d'aciers écrouis dans la zone de recristallisation;

l'emploi d'une flamme non suffisamment réductrice et d'électrodes inappropriées, non protectrices et non réductrices;

le point de vue constructif négligé — détails constructifs peu appropriés — découpages au chalumeau oxy-acétylénique — changements brusques de section provoquant des concentrations de tensions et

de trop grandes fatigues réelles.

Résumé.

Les *caractéristiques mécaniques*: *Résistance et déformation* — résistance à la traction et coefficient de pliage — ainsi que les *taux de fatigue* résultant des essais statiques et des essais de fatigue (endurance), exécutés avec des assemblages soudés au Laboratoire fédéral d'essai des matériaux à Zurich de 1927

à 1935 ont été admis dans la Nouvelle Ordonnance fédérale concernant le calcul, l'exécution et l'entretien des constructions métalliques placées sous le contrôle de la Confédération.

Les *contraintes admissibles* se basent sur les résultats des résistances à la fatigue qui caractérisent la qualité technique des cordons de soudure d'une manière beaucoup plus nette et plus exacte que les résistances statiques.

Le *coefficient de sécurité* choisi pour les assemblages soudés est pratiquement du même ordre de grandeur que celui des assemblages rivés.

La *méthode de calcul du L.F.E.M.* est valable pour des sollicitations suivant une ou plusieurs directions; elle se base sur l'hypothèse de la constance de l'énergie de déformation et tient compte des valeurs relatives des résistances des soudures par rapport aux rivures; cette méthode est en mesure d'encourager le développement des assemblages soudés exécutés selon les règles de l'art et de favoriser l'évolution des formes correctes de ces assemblages.

Les *connaissances théoriques et expérimentales* de même que *l'expérience* acquise ont exercé une influence prépondérante sur le développement des électrodes, la soudure d'aciers spéciaux de qualité appropriés, la disposition générale et les détails constructifs, les mesures et précautions à prendre lors de l'exécution, la méthode de calcul et le contrôle de constructions soudées.

Leere Seite
Blank page
Page vide

III a 3

Influence de la forme des assemblages soudés sur leur résistance.

Einfluß der Gestalt der Schweißverbindung auf ihre Widerstandsfähigkeit.

**Influence of the Form of Welded Connections
to Strength and Resistance.**

O. Graf,

Professor an der Technischen Hochschule Stuttgart.

Les conceptions sur la conformation appropriée des assemblages soudés, surtout des assemblages qui subissent principalement des sollicitations souvent répétées, se sont largement modifiées depuis 1931 dans tous les pays qui s'occupent de la question. Cela a fortement influencé la conformation des ouvrages soudés, leur disposition constructive et leur exécution. Jusqu'à l'époque indiquée, on n'avait pas tenu compte dans les prescriptions officielles des connaissances et des observations sur la résistance à la fatigue des éléments de construction.¹ Il fut démontré en 1931, par quelques essais,² que les usages pour l'exécution des assemblages soudés pour les machines et les ponts ne pouvaient être conservés ou en tous cas devaient être limités. C'est alors qu'au premier plan de l'art de la soudure s'est placée la tâche de fournir à l'ingénieur constructeur et surveillant les principes qui lui permettent de construire d'une façon appropriée à l'emploi de la soudure et d'exécuter des ouvrages dimensionnés et réalisés d'une manière adéquate.

Les questions que nous nous sommes posées et que nous nous posons encore sont les suivantes:

1° Comment doit être exécutée une soudure lorsque dans les cordons bout à bout, frontaux ou latéraux, elle est soumise à des sollicitations souvent répétées ou à des sollicitations immobiles, jusqu'aux limites possibles actuellement?

2° Quel type d'assemblages soudés (Soudure bout à bout, latérale, etc.) est spécialement propre à supporter des surcharges souvent répétées (traction, compression, traction et compressions alternées, flexion, cisaillement, etc.)?

3° Comment faut-il appliquer les résultats de 1 et 2 à la conformation des éléments de construction, entre autres à l'assemblage des barres tendues, aux joints des poutres, aux renforcements de poutres par des semelles, aux assemblages des entretoises aux poutres-maîtresses, etc.?

¹ cf. *Graf*: Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe und der Konstruktionselemente, Edition Julius Springer, Berlin 1929.

² cf. entre autres *Graf*: Dauerfestigkeit von Stählen mit Walzhaut, ohne und mit Bohrung, von Niet- und Schweißverbindungen, Edition VDI, 1931.

4° Quelle importance faut-il attribuer aux contraintes qui se produisent pendant et après le soudage?

Il est possible de répondre en principe à ces questions d'après les connaissances actuelles; dans le détail, il existe encore bien des questions particulières qui intéressent souvent l'ingénieur constructeur et surveillant et qui n'ont pas encore été assez étudiées pour que l'on puisse sans autre appliquer les connaissances actuelles.

a) Comme première question faisons remarquer ce qui suit: Beaucoup d'anciens essais à la fatigue ont montré que des éléments de construction, qui doivent supporter des charges souvent répétées, doivent être prévus avec raccords adoucis entre sections différentes, afin d'éviter autant que possible les variations brusques de contrainte. A ce sujet il fallait s'attendre à ce que des soudures bout à bout, qui sont chargées à la traction ou à la compression, soient moins résistantes lorsqu'elles présentent, suivant la fig. 1, des irrégularités au bords ou

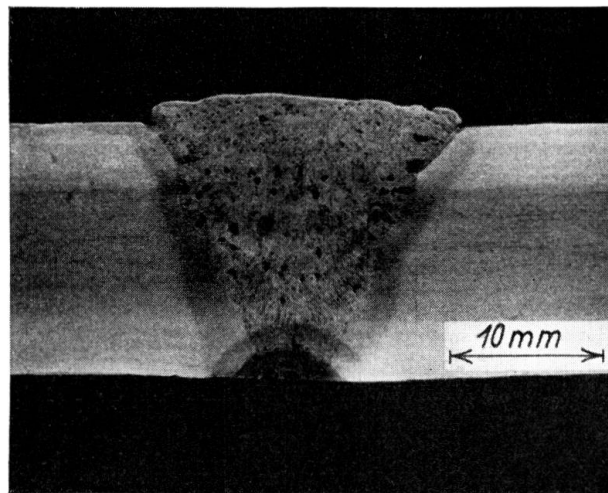


Fig 1.

dans la racine ou lorsqu'elles contiennent des fautes de liaison. Les essais ont naturellement démontré que cette conception est exacte et que des soudures possédant peu de pores, avec reprises à la racine et avec soudures raccordées progressivement possèdent une beaucoup plus grande résistance à la fatigue que les soudures suivant la fig. 1.

Dans les soudures d'angle il fallait aussi déterminer l'influence de la forme du cordon. Des soudures suivant la fig. 2 n'ont qu'une faible résistance tandis que des soudures suivant la fig. 3 sont très résistantes.³

Il en résulte la condition que l'exécution d'assemblages soudés fortement sollicités doit dépendre d'un contrôle approprié du soudeur chargé de ce travail et des matériaux que l'on veut utiliser. Les ouvriers doivent connaître à fond l'exécution des soudures. *Pour les matériaux et pour les électrodes employés, principalement pour les matériaux à haute résistance, il faut contrôler d'une façon tout-à-fait objective qu'une soudure bonne à l'intérieur et à l'extérieure peut être exécutée et le fournisseur doit donner d'une façon univoque quelle*

³ cf. entre autres Graf: „Der Stahlbau“, 1933, p. 81 et ss, et Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1934, p. 1423 et ss.

doit être la composition du métal de base et de quelle façon l'on doit ou l'on peut procéder si l'on veut ou si l'on doit obtenir une bonne soudure.

Celui qui doit garantir que des soudures fortement sollicitées sont suffisamment résistantes, doit avoir à sa disposition des moyens de reconnaître la qualité de la soudure; ce n'est que sur la base de déterminations sur des soudures terminées qu'il peut contrôler qui est capable d'exécuter des soudures suffisamment bonnes; il doit vérifier si les ouvriers qui exécutent ces travaux prennent complètement la responsabilité qu'exigent de tels travaux.

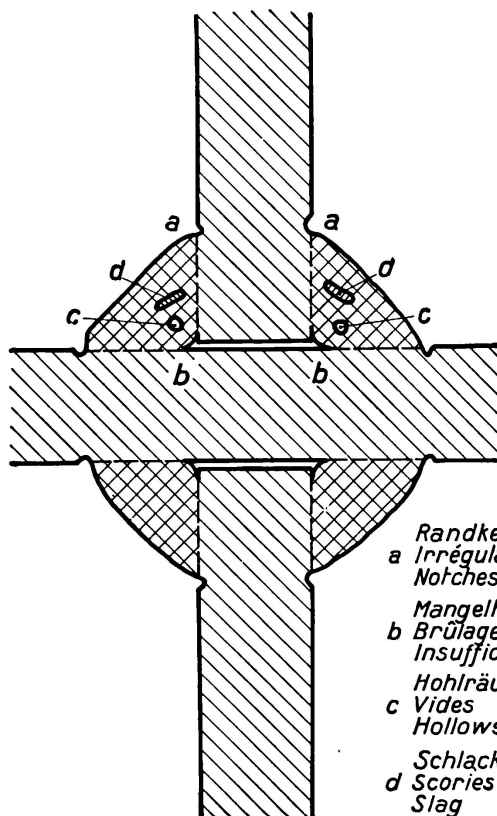


Fig. 2.

Randkerben
a *Irrégularités aux bords*
Notches
Mangelhafter Einbrand
b *Brûlage défectueux*
Insufficient inroad
Hohlräume
c *Vides*
Hollows
Schlacken
d *Scories*
Slag

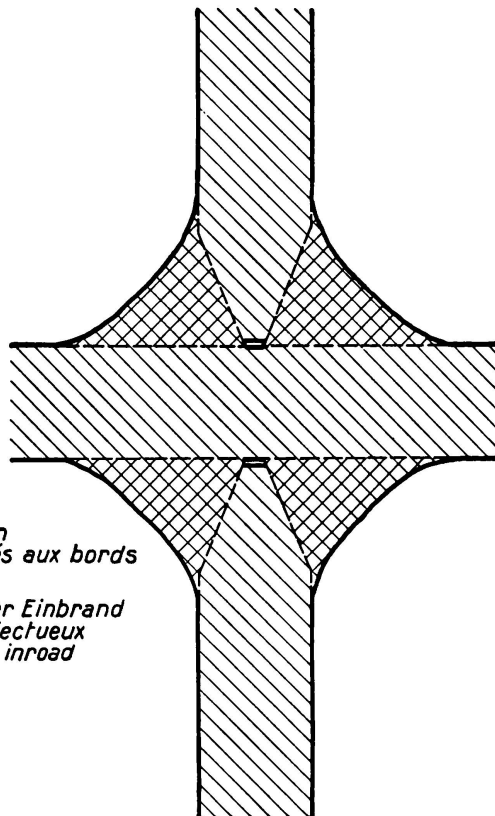


Fig. 3.

On a nettement amélioré les méthodes de contrôle de la qualité des soudures. Les installations pour le contrôle aux rayons X des assemblages soudés possèdent un meilleur rendement et sont devenues meilleur marché. Il est ainsi devenu possible d'exiger pour les soudures bout à bout importantes et fortement sollicitées un contrôle aux rayons X avant la livraison.⁴

b) Sur la deuxième question — *quel type d'assemblage est à préférer dans les différentes conditions pratiques* — on a fait des constatations beaucoup plus étendues que sur la première question, car le développement des principes pour la construction des ouvrages soudés est apparu comme beaucoup plus urgent.

On a souvent fait remarquer autrefois et encore aujourd'hui que la résistance des assemblages avec soudures latérales, soumis à la traction, est beaucoup moins atteinte par des fautes de soudage que la résistance des soudures bout à bout. La disposition des assemblages à soudures latérales est plus simple que lors

⁴ cf. Vorläufige Vorschriften für geschweißte, vollwandige Eisenbahnbrücken, Compagnie des Chemins de fer allemands, Berlin 1935, p. 11 et 13.

d'emploi des soudures bout à bout. C'est à partir de ces constatations que l'on a donné autrefois la préférence aux assemblages avec soudures latérales. Il faut ajouter que de bonnes soudures bout à bout, exécutées d'une façon appropriée, sont beaucoup plus résistantes aux efforts souvent répétés que les assemblages avec soudures latérales car, au début des soudures latérales, il se produit toujours de grandes variations brusques de contrainte, en tous cas toujours plus grandes que dans les soudures bout à bout.⁵ La rupture se produit suivant la fig. 4 dans un essai à la fatigue avec surcharge originelle; la comparaison avec la fig. 5, valable pour l'essai simple de rupture avec éprouvette identique

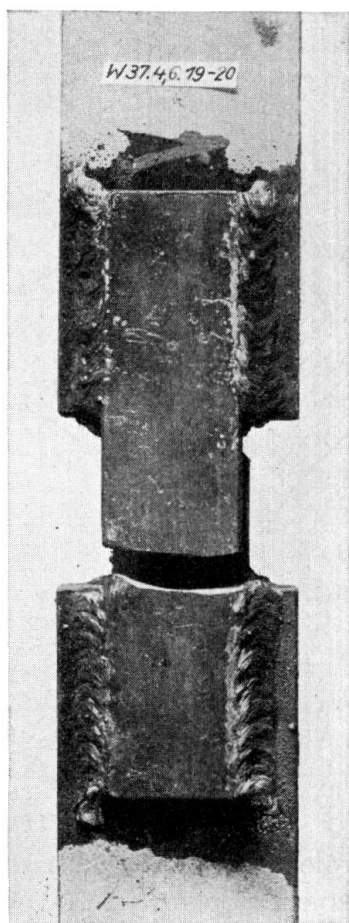


Fig. 4.

Assemblage avec soudures latérales après l'essai à la fatigue.



Fig. 5.

Assemblage avec soudures latérales après l'essai de rupture (dimensions avant l'essai comme dans la fig. 4).

et utilisable pour la détermination de la résistance aux charges immobiles, rappelle que l'essai de rupture ne donne aucun renseignement sur l'importance des sauts de contrainte. Les fig. 4 et 5 nous rendent attentifs au fait que *l'assemblage avec soudures latérales peut être utilisé avec avantage pour la transmission de charges immobiles, mais non pas pour la transmission de charges mobiles.*

Il faut observer en outre que l'exécution de bonnes soudures bout à bout

⁵ cf. entre autres „Stahlbau“ 1933, p. 81 et ss.

a été si fortement améliorée par le développement des transformateurs à souder, par la préparation d'électrodes appropriées, par l'instruction beaucoup plus poussée des soudeurs et des ingénieurs, par les progrès dans les méthodes de contrôle, etc., qu'il est possible actuellement d'exécuter de bonnes soudures bout à bout dans les ateliers bien organisés.

Avec cette distinction fondamentale sur la convenance du type d'assemblage et sur le domaine approprié d'application des différents types, il était nécessaire de rechercher si la résistance des assemblages aux tractions souvent répétées est déterminée sans restriction par la résistance à la traction répétée par rapport à l'origine.⁶ On a donc étudié si, pour une variation souvent répétée entre des forces de traction et de compression de même grandeur et aussi pour l'action simultanée de tractions immobiles et souvent répétées, l'amplitude d'oscillation qui peut être supportée, est exactement ou à peu près égale à la résistance à la traction répétée par rapport à l'origine. Plusieurs essais⁷ ont montré que la résistance à la traction répétée par rapport à l'origine donne d'une façon suffisante l'amplitude supportable pour le domaine pratique. C'est de là qu'est sortie la proposition⁸ d'appliquer au dimensionnement des assemblages soudés les directives simples qui suivent:

a) La limite d'écoulement du matériau est déterminante pour les charges immobiles et pour la surcharge totale.

b) Pour les charges mobiles il faut se baser sur l'amplitude qui peut être supportée pour des charges souvent répétées et qui peut être déterminée de la façon la plus simple en tant que résistance à la fatigue par rapport à l'origine.⁹

La fig. 6 montre comme exemple les résultats de l'essai d'une soudure bout à bout. La résistance à la charge immobile et à la charge totale est limitée par la résistance à la traction et par la limite d'écoulement. L'amplitude qui peut être supportée pour une charge souvent répétée est fixée, d'après la résistance à la fatigue par rapport à l'origine, à $S = 14,5 \text{ kg/mm}^2$ et, d'après la limite d'écoulement, à $S = 13,1 \text{ kg/mm}^2$.

On peut ainsi choisir la contrainte admissible pour la charge immobile et pour la charge totale et, indépendamment de cela, la contrainte admissible pour la charge souvent répétée. Si par exemple on fixe la contrainte admissible à 0,8 fois la résistance déterminée, on aurait dans le cas de la fig. 6 les contraintes admissibles:

a) pour charges immobiles et pour les charges totales,
 $37,8 \cdot 0,8 = \sim 30 \text{ kg/mm}^2$ et

b) pour charges souvent répétées, $14,5 \cdot 0,8 = \sim 11 \text{ kg/mm}^2$. La contrainte maxima admissible serait donc de 30 kg/mm^2 . De cette contrainte maxima, 11 kg/mm^2 devraient être engendrés par les charges mobiles.

D'après cela, on pourrait établir pour l'ingénieur un tableau simple qui donne avant tout les contraintes de traction admissibles pour les charges mobiles et ensuite les contraintes maxima pour efforts de traction immobiles et mobiles.

⁶ Efforts répétés variant de 0 à une valeur déterminée (Réd.).

⁷ cf. entre autres „Stahlbau“ 1933, p. 92 et ss, „Stahlbau“ 1935, p. 164 et ss.

⁸ cf. „Stahl und Eisen“ 1933, p. 1218 et ss.

⁹ Ici, ainsi que dans les explications qui vont suivre, on entend par résistance à la fatigue par rapport à l'origine, la charge qui peut encore juste être supportée après 2 millions de cycles.

permanentes locales d'où il résulte, lors de la décharge, des sollicitations de traction dans le fond de l'entaille. C'est pourquoi il se produit, dans les soudures bout à bout non travaillées, des fissures transversales, sous l'effet de compressions souvent répétées ainsi que sous l'effet de tractions souvent répétées, toutefois pour une sollicitation totale beaucoup plus élevée.¹¹ On peut admettre que la résistance à la fatigue par rapport à l'origine, des soudures bout à bout exécutées de façon courante avec acier St. 37, se trouve à peu près à la limite d'écrasement; c'est pourquoi l'on peut choisir de la même grandeur la contrainte de compression admissible des pièces en acier St. 37 sans et avec soudures bout à bout, dans les limites actuellement en usage.

D'autres observations conduisent finalement à la conception que les résultats des essais de traction et de compression sont aussi valables pour les zones de traction et de compression des profilés.¹²

Il fallait encore rechercher comment doivent être dimensionnées les soudures latérales et frontales lorsque les forces agissent comme forces de cisaillement. Dans les assemblages avec soudures latérales, d'après la fig. 4, qui, avec différentes longueurs de soudures étaient sollicitées par des forces de traction souvent répétées, on a pu évaluer la résistance à la fatigue aux efforts de cisaillement par rapport à l'origine au moins à 10 kg/mm^2 .¹³

Pour les barres assemblées au moyen de soudures latérales et chargées par des forces de compression souvent répétées, on a déterminé une résistance à la fatigue aux efforts de cisaillement par rapport à l'origine allant jusqu'à env. 12 kg/mm^2 .

Si l'on avait voulu dimensionner les soudures des assemblages avec soudures latérales sur la base de ces indications, on serait arrivé à des soudures plus petites que celles exigées actuellement. Ce résultat ne peut pas être appliqué sans autre aux assemblages souvent chargés, car les dimensions des soudures influencent les variations brusques de contrainte au début de la soudure. C'est pourquoi l'on a pour le moment une limitation du rapport de la contrainte de cisaillement de la soudure à la sollicitation de la barre fermée. Dans les pièces suivant la fig. 4, la résistance à la fatigue par traction par rapport à l'origine a augmenté avec la décroissance de $\rho : \sigma$; avec $\rho : \sigma = 0,5$ la valeur maxima de la résistance à la fatigue par traction par rapport à l'origine était à peu près atteinte.¹⁴

c) A la troisième question, qui se rapporte à l'application des déterminations fondamentales, il n'est possible de répondre que graduellement, car la conformation constructive des assemblages a des limites techniques et économiques.

Dans l'application des assemblages avec soudures latérales, il faut ou bien se contenter pour le moment du fait que ces assemblages sont moins appropriés à la transmission des charges souvent répétées et qu'il faut choisir une con-

¹¹ cf. Stahlbau 1936, p. 71 et 72.

¹² cf. entre autres Stahlbau 1934, p. 169 et ss. Nous présenterons spécialement un rapport sur les essais effectués sur des profilés de laminage assemblés par des soudures bout à bout.

¹³ Bautechnik 1932, p. 415.

¹⁴ Bautechnik 1932, p. 415 et encore „Dauerversuche mit Schweißverbindungen“, Edition VDI 1935, p. 25.

trainte admissible plus petite que pour les assemblages avec soudures bout à bout, ou bien chercher, par le choix d'un matériau approprié ou par une modification constructive de l'assemblage, à réduire la variation brusque de contrainte. On a entre autres recherché la résistance des assemblages avec soudure latérale par une forme spéciale de la soudure et par différentes répartitions du métal d'apport, par exemple par une soudure raccordée graduellement, par une variation de l'épaisseur et de longueur de la soudure latérale, par le choix de différentes forme de section de la soudure. Mais on a trouvé que l'on ne peut pas arriver à grande chose avec les moyens donnés pour la construction métallique. On arrivera à un meilleur résultat par un choix spécial de formes de section des barres assemblées et par une disposition des soudures s'y rapportant. Dans une section rectangulaire des barres assemblées soumises à la traction, on relèverait la résistance à la fatigue par traction par rapport à l'origine si, au lieu de fers plats avec section 80,10 mm, on avait choisi de ceux de 50,16 mm ou des fers carrés et si, dans ce cas, on avait prévu la liaison au moyen de soudures latérales fortes et courtes.¹⁵ On a obtenu une résistance à la fatigue par traction par rapport à l'origine beaucoup plus élevée lorsque les assemblages étaient constitués de fers en \square et de soudures frontales; la plus haute résistance, 12 kg/mm², fut trouvée pour des assemblages suivant la fig. 7.¹⁶

Ainsi, la différence de résistance des assemblages soudés importants qui sont employés pour des assemblages soumis à une traction souvent répétée — la soudure bout à bout brute d'une part, les assemblages avec soudure latérale brute d'autre part — est devenue insensiblement plus petite. Alors que l'on peut admettre pour les bonnes soudures bout à bout une résistance à la fatigue par traction par rapport à l'origine de ~ 18 kg/mm² on peut s'attendre actuellement pour des assemblages constructivement bien développés, avec soudures latérales d'après la fig. 7, à une résistance allant jusqu'à 12 kg/mm². On ne peut garantir une telle résistance pour une soudure bout à bout que lorsque une radiographie l'a montré comme parfaite. L'emploi des rayons X n'est pas nécessaire pour les assemblages avec soudures latérales lorsque l'exécution fut faite par des soudeurs exercés et travaillant avec soin.

En conséquence de ces explications, on comprend qu'autrefois — lorsque l'exécution de bonnes soudures bout à bout était encore moins sûre — on ait remédié d'avance au manquement des soudures bout à bout, dans des cas importants, au moyen de *couvre-joints* qui étaient placés au dessus de la soudure. Il est ainsi nécessaire d'assurer la résistance aux charges mobiles de telle sorte que la résistance de la section fermée soit tout-à-fait suffisante dans un essai à la rupture. Lorsqu'il fallait transmettre des charges souvent répétées, le couvre-joint simple n'a apporté une amélioration que lorsque les soudures bout à bout étaient mauvaises. Avec de bonnes soudures bout à bout on obtient des ruptures pour les sollicitations indiqués à la fig. 8, parce qu'au début des couvre-joints il existait une forte variation de contrainte par suite de la variation brusque de section. On devait donc rechercher le genre de construction

¹⁵ Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1934, p. 1424.

¹⁶ Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1934, p. 1424.

des couvre-joints qui procure là même résistance qu'une bonne soudure bout à bout seule. On a d'abord obtenu cela avec des couvre-joints travaillés suivant la fig. 9. Dans le cas de la fig. 9 le couvre-joint est aussi large que possible, il est relié aux surfaces frontales par de fortes soudures d'angle *b* partant d'une manière douce et continue, il est fixé latéralement par des soudures plus faibles et usiné autant que possible de telle sorte que toutes les irrégularités en *c* sont éliminées, qui pouvaient avoir de l'importance dans le domaine de la transmission

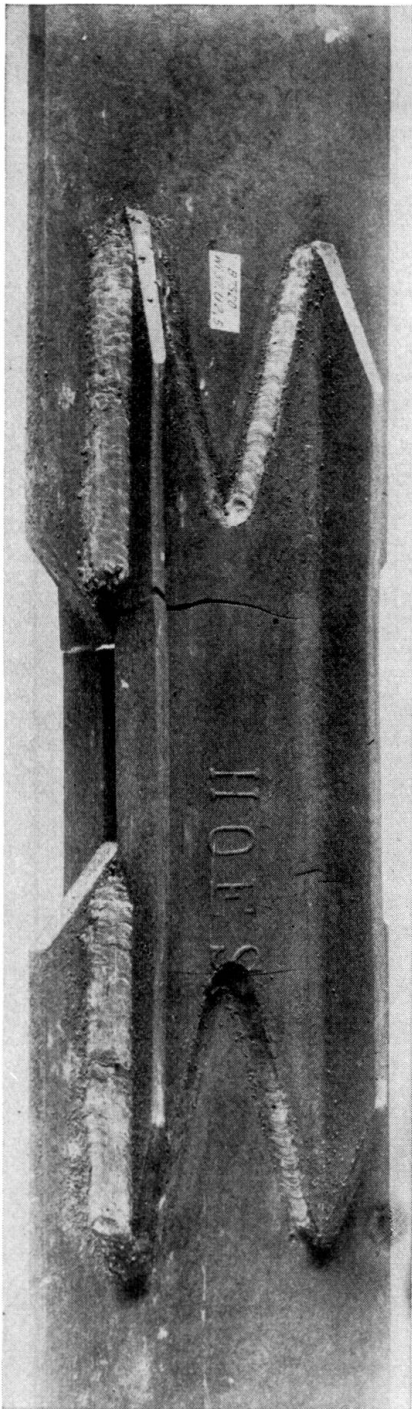


Fig. 7.



Fig. 8.

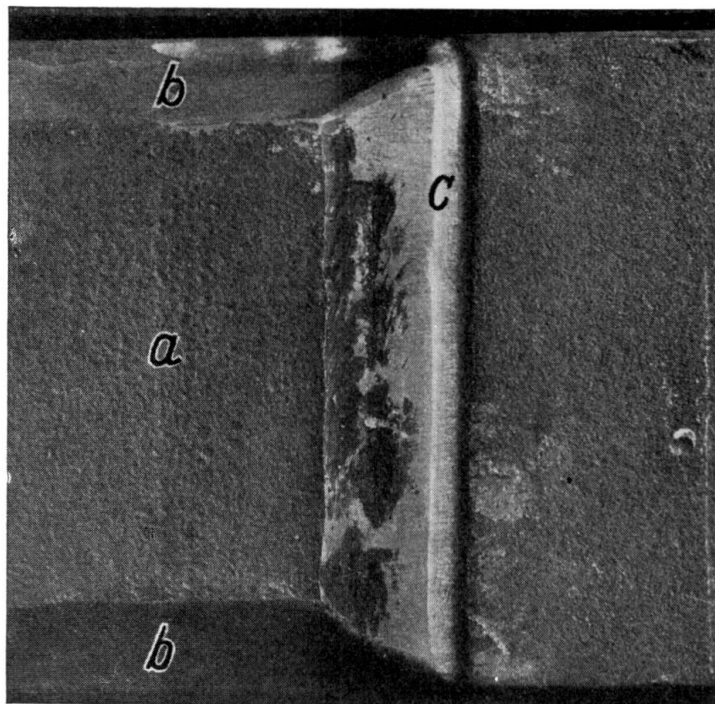


Fig. 9.

des forces.¹⁷ Ces conditions ne peuvent toutefois être remplies que lorsque l'on utilise de bonnes électrodes.

Ce que nous avons dit sur la conformation des couvre-joints est en principe valable pour le renforcement des semelles dans les poutres. Nous présenterons prochainement un rapport spécial sur les essais s'y rapportant.

De même, il faut observer, dans l'application de raidisseurs d'âmes, le fait que la membrure tendue perd de sa résistance aux efforts souvent répétés lorsque les raidisseurs sont soudés à la membrure tendue.¹⁸ Dans ce cas il est aussi à remarquer que les raidisseurs soudés peuvent aussi réduire la résistance de l'âme.¹⁸

Nous avons étudié aussi la résistance des soudures d'angle qui sont à dimensionner non seulement pour supporter un effort tranchant, mais aussi un moment de flexion.

Pour la construction des charpentes, on a exécuté des essais à Dresde.¹⁹ Pour la construction des ponts, on peut tirer des éclaircissements par des essais sur grands modèles, par exemple d'après la fig. 10. Les contraintes des

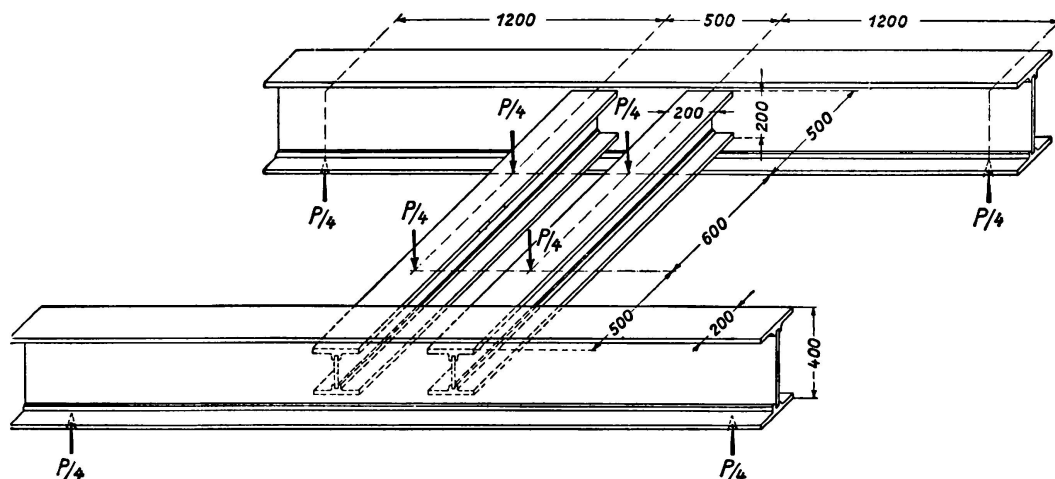


Fig. 10.

Essais sur des systèmes soudés.

entretoises ou des poutres-maîtresses sont à déterminer comme l'exige les prescriptions alors valables, ou comme on le propose pour de futures prescriptions. Dans le cas de la fig. 10 on avait une liaison avec soudures d'angle de tous les côtés et les renforcements habituels. La rupture se produisit dans les entretoises sous des sollicitations qui ne sont pas éloignées de celles que l'on constate dans une poutre sur appuis simples du même genre. Il est important de remarquer qu'il se produisit dans l'âme de la poutre principale, avant la rupture de l'entretoise, une fissure suivant la fig. 11, parce que dans la zone tendue de l'âme il existait une forte variation brusque de contrainte. Le fer en \perp que l'on voit à la fig. 11, était le raidisseur extérieur de l'âme.

¹⁷ Le rapport détaillé pour la Commission allemande pour la construction métallique est en préparation.

¹⁸ cf. Schulz und Buchholtz: Stahl und Eisen 1933, p. 551.

¹⁹ Schmuckler: Stahlbau 1931, p. 133 et ss, et Köppel: Stahlbau 1933, p. 14 et ss.

Dans de telles investigations il y a deux problèmes partiels à traiter; il faut d'abord rechercher les formes de liaison appropriées; ensuite il faut décider de la grandeur du moment qui doit être supporté.

En ce qui concerne les formes d'assemblage il faut entre autres remarquer que les semelles des entretoises sont de préférence à assembler à la traction, c'est-à-dire que le plus simplement elles seront fixées à l'âme de la poutre maîtresse au moyen d'une soudure bout à bout. La fixation de l'âme des entretoises se fera avec de simples soudures d'angle dont on recherche actuellement l'épaisseur nécessaire. Lorsque les entretoises reposent directement sur la semelle tendue de la poutre-maîtresse et sont assemblées à cette semelle par soudure, il est évident qu'il apparaît dans la semelle tendue de la poutre-maîtresse,

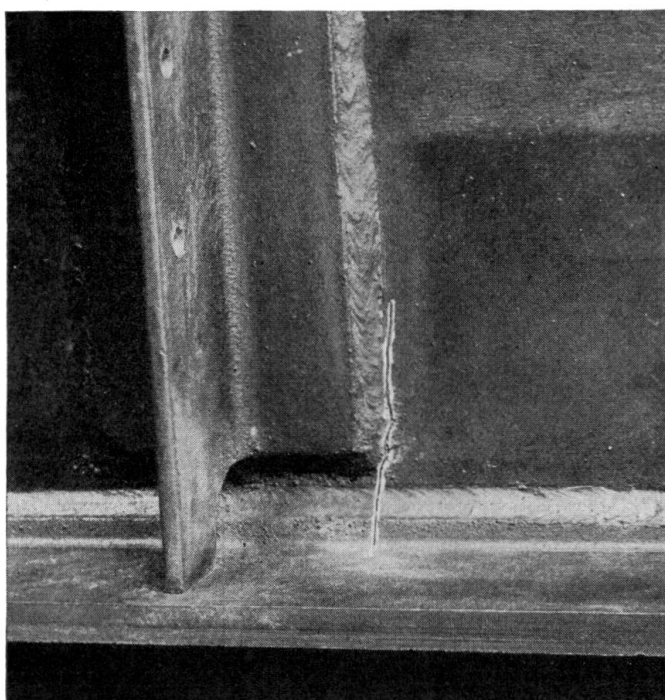


Fig. 11.

à l'endroit de la soudure pour l'entretoise, une variation brusque de contrainte qui réduit d'une façon appréciable la résistance aux charges souvent répétées. Cette réduction de la résistance de la zone tendue de la poutre-maîtresse doit souvent être prise en considération si l'on veut réaliser de bonnes liaisons pour les entretoises. La contrainte dans la poutre principale est à choisir en tenant compte de cela.

d) La quatrième question se rapporte à l'importance des *contraintes qui se produisent avec le soudage*. Nous ne voulons pas expliquer ici comment se développent ces contraintes; nous nous basons seulement sur les résultats des constatations faites jusqu'à ce jour. On sait qu'il se produit dans les soudures bout à bout et les soudures d'angle de fortes sollicitations locales qui peuvent aller jusqu'à la limite d'écoulement.²⁰ Ces sollicitations se répartissent dans les soudures bout à bout, exécutées sans interruption, de telle sorte qu'il se produit

²⁰ Graf: Stahlbau 1932, p. 181 et 182, et 1933 p. 93 et 94, ainsi que le Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1934, p. 1426.

au bord, perpendiculairement à la soudure, des contraintes de compression et au milieu des contraintes de traction.²¹ Les contraintes maxima règnent localement d'une façon strictement limitée; c'est pourquoi de petites modifications permanentes sont seules nécessaires pour réduire sensiblement les sollicitations qui se produisent localement.²² Beaucoup d'essais nous permettent d'estimer que les contraintes engendrées par le soudage (contraintes propres) restent sans influence importante sur la résistance des assemblages, aussi longtemps qu'il s'agit de pièces qui sont conformées comme barres tendues et qui étaient libres à leurs extrémités lors du soudage. On peut d'autre part influencer les contraintes propres par le procédé de soudage ainsi que par le métal de base.²³ L'apparition dont nous allons parler doit être plus importante que les contraintes propres.

Si une barre tendue est exécutée par une soudure bout à bout, il se produit des raccourcissements dans la soudure, parallèlement à la force agissant dans la barre, entre autres parce que le métal fondu dans le joint à souder se rétrécit en durcissant et en refroidissant; le coefficient de retrait croît avec la largeur du joint à souder et par conséquent aussi avec la grandeur de l'angle d'ouverture.²⁴ Si les barres tendues sont encastrées à leurs extrémités, le retrait de la soudure est plus ou moins entravé; en outre on peut remarquer les variations de volume qui se produisent par le chauffage et le refroidissement du matériau qui avoisine la soudure. Il se produit ainsi dans la soudure, en plus des contraintes propres dont nous venons de parler, des surcharges extérieures. Ces surcharges extérieures (charges de retrait) sont maxima lorsque les barres sont très courtes et lorsque l'encastrement est rigide. Le retrait doit alors être amorti avec une faible longueur de barre. Lorsque la barre est longue et l'encastrement plus ou moins élastique, la charge de retrait devient plus faible par suite de l'allongement plus grand de la longue barre et à cause de la déformation des éléments de construction qui doivent influencer l'encastrement. Si par exemple une barre a une longueur de 3 m et si les encastres ne cèdent pas pour un effort dans la barre de $\sigma = 1050 \text{ kg/cm}^2$, il se produit pour cette contrainte un allongement d'environ 1,5 mm. D'après nos connaissances actuelles le retrait d'une section de soudure d'env. 100 mm² serait égalisé. Si la longueur libre de la barre n'était que de 0,5 m et si l'encastrement était de nouveau rigide, la contrainte de retrait monterait au dessus de la limite d'écoulement pour égaliser un retrait de 1,5 mm.

Les charges de retrait calculées ainsi sont plus petites en réalité, car il se développe des déformations pendant le refroidissement du matériau, à côté de la soudure et dans la soudure elle-même. Toutefois les exemples nous montrent que lors de l'assemblage des ouvrages soudés, le choix de la succession des endroits de soudage exige la plus grande attention.

Il faut remarquer en outre que les charges de retrait dans la soudure, qui se produisent durant l'exécution de la soudure, peuvent engendrer de très fortes sollicitations, aussi longtemps qu'une partie de la soudure est exécutée et que

²¹ cf. *Bierett*: Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1934, p. 709 et ss.

²² *Bollenrath*: Stahl und Eisen 1934, p. 877.

²³ Ici s'ajoute encore la tendance à la fissuration, cf. *Bollenrath* et *Cornelius*: Stahl und Eisen, 1936, p. 565 et ss.

²⁴ cf. entre autres *Lottmann*: Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1930, p. 1340 et ss. *Malisius*: Elektroschweißung 1936, p. 1 et ss.

cette partie peut se refroidir. La charge de retrait n'est pas encore grande dans de tels cas mais l'élasticité des éléments est très petite, de telle sorte que le retrait doit presque complètement être supporté par la soudure partiellement appliquée. C'est pourquoi il faut autant que possible exécuter la soudure en une fois, en retardant le refroidissement; la première partie de la soudure doit aussi être très extensible.

Pour obtenir une image des charges de retrait effectives, l'auteur a entrepris en 1934 des essais pour la détermination des charges de retrait. Un tréteau d'après la fig. 12 porte à ses extrémités de fortes pièces transversales avec

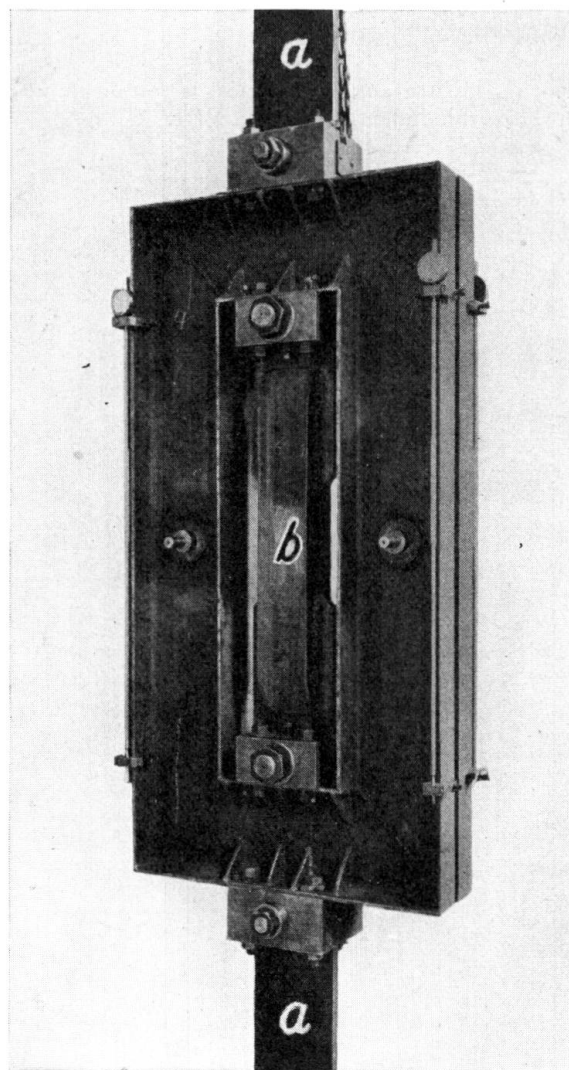


Fig. 12.

chacune un trou. Au moyens d'écrous qui sont placés dans ces trous et dont un a été usiné en forme de cône, il est possible d'encastrer, d'une façon pratiquement rigide, des fers plats très forts a—a. Les extrémités intérieures des fers plats seront assemblées par soudure dans le cas de la fig. 12 avec des fers en \sqsubset (b) au moyen de soudures latérales. Les essais exécutés jusqu'à ce jour ont fourni sous les rapports choisis, pour les soudures bout à bout, des charges de retrait d'env. 250 kg/cm.² D'autres communications sur ces essais suivront dans un rapport spécial.

Résumé.

L'application de la soudure en Allemagne, dans la construction des ponts et des charpentes, fut accompagnée de nombreuses investigations qui, avant tout, permettent de choisir le type des assemblages et leur conformation pour les problèmes qui se posaient alors. Des travaux spécialement vastes s'étendent à la détermination de la résistance des assemblages soudés et des éléments de construction soumis à des charges souvent répétées, comme cela se produit dans les ponts, les grues, etc.²⁵ De nombreux essais sont encore consacrés à la détermination des sollicitations qui persistent, après le soudage, dans l'assemblage lui-même et dans la construction.

²⁵ Voir entre autres parmi les travaux déjà cités la publication parue en 1935 „Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen“. Édition VDI.