

Verantwortlicher Schriftleiter: Privatdozent Dr. Hans Stäger, Zürich, Grütlistrasse 50, Tel. 27 43 05. — *Redaktionskommission:* Prof. Dr. A. Dumas (Materialprüfungswesen); Prof. Dr. R. Durrer (Metallurgie); Dr. iur. A. R. Egli, dipl. Ing. (Gewerblicher Rechtsschutz); Prof. Dr. G. Eichelberg (Maschinenbau); Prof. Dr. A. Engeler (Faserstoffkunde); Dr. P. Moser (Verein schweizerischer Dampfkesselbesitzer); Prof. A. Imhof (Elektrotechnik); Prof. Dr. P. Niggli (Technische Kristallkunde); Prof. Dr. M. Ros (Materialprüfungswesen); Prof. Dr. P. Schläpfer (Werkstoffkunde und technische Chemie); Prof. Dr. A. v. Zeerleder (Leichtmetalle und Elektrometallurgie). — *Ständige Mitarbeiter:* Dr. W. Amrein, Ingenieurbureau, Zürich; Privatdozent Dr. R. Bertschinger an der ETH., Zürich; Prof. Dr. E. Brandenberger, Röntgenabteilung des Mineralogischen Institutes der ETH. und der Eidg. Materialprüfungsanstalt, Zürich; Prof. Dr. A. Dumas, Direktor der Materialprüfungsanstalt, Lausanne; Prof. Dr. R. Durrer, Professor für Metallurgie an der ETH., Zürich; Dr. iur. A. R. Egli, dipl. Ing., Patentanwalt, Zürich; Prof. Dr. A. Engeler, Direktor der Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt, Hauptabteilung C, St. Gallen; Dr. Ed. Gubler, Bundesgerichtskorrespondent, Lausanne; Dr. C. Keller, Leiter der Forschungsabteilung der Escher Wyss Maschinenfabriken AG., Zürich; Dr. M. Koenig, Ingenieurbureau, Zürich; Prof. Dr. P. Niggli, Vorstand des Mineralogischen Institutes der ETH. und der Universität Zürich; Prof. Dr. M. Ros, Direktionspräsident der Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt, Zürich; Privatdozent Dr. R. Sängler, Abteilung für industrielle Forschung des Institutes für technische Physik der ETH., Zürich; Prof. Dr. P. Schläpfer, Direktor der Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt, Hauptabteilung B, Zürich; Dr. W. Siegfried, Gebrüder Sulzer AG., Winterthur; Privatdozent Dr. H. Stäger, Zürich; Dr. H. Thiemann, Abteilung für industrielle Forschung des Institutes für Technische Physik an der ETH. Zürich; Dr. W. Traupel, Gebrüder Sulzer AG., Winterthur; Prof. Dr. A. v. Zeerleder, Professor für Elektrometallurgie und Leichtmetalle an der ETH., Zürich; Dipl. Ing. H. Zschokke, AG. Brown, Boveri & Co., Baden (Schweiz); Obering. M. Zwicky, Gebrüder Sulzer AG., Winterthur.

Questions fondamentales en matière de constructions soudées¹⁾

Par F. Campus

DK: 624.014.25

Dès avant l'accident survenu le 14 mars 1938 au pont-route soudé de Hasselt, les ateliers de constructions métalliques et l'administration des Ponts et Chaussées de Belgique avaient, depuis 1932, réuni un ensemble d'observations au sujet de difficultés constatées dans l'exécution des constructions soudées.

En 1936, un consortium de constructeurs décida de faire procéder, en commun avec l'Administration précitée, à une enquête dont l'auteur fut chargé.

Les résultats de cette enquête établissent la nécessité de procéder à un vaste programme d'essais sur le retrait, les déformations et les tensions de soudure.

L'accident de Hasselt et ceux qui suivirent permirent d'autres constatations et donnèrent lieu à des discussions qui soulevèrent en outre les questions de résistance statique et dynamique des soudures, des formes de rupture des constructions soudées et de la soudabilité des aciers, enfin de la sécurité des constructions soudées et des précautions à prendre pour l'assurer.

Invité en mai 1938 par le Professeur M. Ros à prendre part au colloquium international sur les accidents survenus à des constructions soudées, qu'il avait organisé à Zurich, l'auteur s'abstint à cette réunion de faire connaître son opinion sur les causes de l'accident du pont de Hasselt, parce qu'elles n'étaient pas élucidées à cette époque.

Les recherches effectuées par l'auteur dès 1937 et poursuivies pendant la guerre au sujet des questions fondamentales énumérées ci-dessus ont été consignées dans un ouvrage récent²⁾.

Leurs résultats permettent d'apporter actuellement des réponses certes encore incomplètes, mais cependant documentées et réfléchies.

I. — Retrait transversal des soudures

Il constitue un phénomène d'importance primaire dans les constructions soudées. Sa connaissance est encore très imparfaite. Au point de vue théorique, elle est tout à fait insatisfaisante. Des formules élémentaires sommaires ont été proposées. (Wortmann et Mohr, S. B. Z. 1932. — Malisius 1936.) Une importante contribution a été apportée à la connaissance expérimentale statistique du phénomène. L'influence de nombreux facteurs a été mise en évidence, établissant que les lois du phénomène sont complexes.

Dans les éprouvettes soudées bout à bout et entièrement libres de se déformer, le retrait est étroitement limité à une région très voisine de la soudure, de telle sorte que le résultat est sensiblement indépendant de la longueur de la base de mesure. A première vue, il paraît proportionnel à la section réelle de la soudure pour une épaisseur donnée. On peut le rapporter à la section théorique du joint pour une épaisseur donnée, telle qu'elle résulte du plan, ou, ce qui revient au même, à la largeur moyenne du joint. Pour des joints de

¹⁾ Résumé des conférences faites le 8 février 1947 à l'Association Suisse pour l'essai des matériaux et le 10 février 1947 à la section du Génie civil de l'Ecole Polytechnique fédérale de Zurich.

²⁾ Recherches, études et considérations sur les constructions soudées. — Ed. Sciences et Lettres, Liège 1946.

15 mm. d'épaisseur et de 100 mm. de longueur, en V et en X, on a trouvé, pour deux séries d'essais faites par des soudeurs différents:

$$\sigma_m = 0,179 L_m \pm 14,4 \%$$

L_m étant la largeur moyenne du chanfrein théorique, σ_m le retrait moyen des deux faces de l'éprouvette.

Pour les deux séries séparées, on avait $\sigma_m = 0,19 L_m \pm 12 \%$ et $\sigma_m = 0,158 L_m \pm 9,2 \%$, ce qui montre l'influence personnelle considérable du soudeur. Cependant le coefficient 0,18 a été proposé par d'autres auteurs, notamment K. K. Madson (1937).

Les expériences montrent que K varie, pour un même joint, avec le nombre de passes, le diamètre des électrodes, l'intensité du courant, la forme du chanfrein, etc. Les grosses passes et les grosses électrodes diminuent le retrait pour les gros chanfreins en V. Les autres influences sont moins sensibles. L'effet de pauses dans la soudure et de refroidissement des éprouvettes est inférieur aux écarts accidentels de mesure.

L'unicité de la valeur de K relevée ci-dessus pour les joints en X et en V est toute fortuite pour les soudures des dimensions indiquées. En réalité, K est variable avec la longueur et l'épaisseur des soudures et varie d'une manière différente pour les joints en X ou en V; il dépend donc de la forme des joints. K augmente avec la longueur des joints. Pour des joints de 150 mm. de longueur, $K = 0,18$ (2^e soudeur) pour des épaisseurs inférieures à 30 mm.; au delà K augmente. Pour les joints en X, K ne cesse de décroître.

Lorsque l'épaisseur augmente, le retrait est dans ce cas à peu près constant pour des épaisseurs supérieures à 30 mm.

Les éprouvettes à joints en V subissent une déformation angulaire, croissante avec l'épaisseur et qui est très importante pour les très grosses soudures. Le retrait angulaire est moins régulier que le retrait linéaire; il est surtout influencé par l'exécution individuelle de la soudure. Pour les joints en X, symétriques et symétriquement soudés, il est faible et de sens variable.

Les relations géométriques simples que l'on peut établir entre le retrait linéaire sur les deux faces, le retrait angulaire et l'épaisseur, ne sont pas exactement vérifiées par l'expérience.

Lorsque l'on mesure le retrait sur des éprouvettes analogues aux précédentes, mais encastées aux deux extrémités dans un cadre rigide, le retrait linéaire est diminué, aussi bien à l'état d'encastrement qu'après la libération des éprouvettes (qui augmente légèrement le retrait). Le retrait angulaire, empêché à l'état d'encastrement, se manifeste faiblement pour les joints en V après libération. Le retrait est différent pour les joints en V et en X. Pour les éprouvettes encastées, le retrait n'est

plus indépendant de la base de mesure; il va en décroissant de la soudure vers les extrémités encastées, en raison de l'allongement élastique ou permanent des éprouvettes.

Dans des éprouvettes libres assemblées par double couvre-joint avec cordons d'angle frontaux ou latéraux, on a relevé des retraits sensiblement plus faibles que pour des soudures bout à bout.

II. — Déformations au voisinage des soudures

En traçant sur les éprouvettes des repères adéquats, on y relève des déformations proportionnelles importantes au voisinage des soudures et qui vont en s'atténuant lorsque la distance à celles-ci augmente. Ces déformations ne sont mesurables que sur les faces extérieures et les tranches des éprouvettes; elles existent cependant aussi suivant l'épaisseur.

Elles sont donc triaxiales. Sur les faces des éprouvettes, on les mesure longitudinalement (parallèlement à l'axe de la soudure) et transversalement (perpendiculairement à cet axe).

Pour les éprouvettes libres soudées bout à bout, ces déformations obéissent à des lois définies présentant une certaine régularité, mais variant avec la forme du joint (en V ou en X) et avec l'épaisseur. Cette dernière influence se manifeste avec intensité pour des épaisseurs supérieures à 20—25 mm. Les contractions longitudinales maxima au voisinage des soudures atteignent 0,2 % (joints en X), voire 0,5 % (joints en V). Ces contractions, qui ne varient pas beaucoup tout le long du joint, produisent un retrait longitudinal global sur toute la longueur du joint, maximum suivant l'axe de la soudure. Les déformations transversales mesurables au plus près de la soudure sont en général des allongements, presque toujours supérieurs aux contractions longitudinales et atteignant jusque 2 % et plus sur les éprouvettes très épaisses. Donc les contractions transversales, qui donnent lieu au retrait transversal global des éprouvettes libres, sont très étroitement limitées à la soudure et à ses bords, où les déformations transversales ne sont pas mesurables.

Ces déformations se produisent à chaud, à l'état malléable du métal. Elles sont considérablement supérieures aux déformations élastiques à la température ordinaire (allongement à la limite apparente d'élasticité env. 0,12 %; palier d'étirage de l'acier I à 2,5 %). C'est pourquoi il n'y a pas de rapports réguliers entre les déformations transversales et longitudinales. Le retrait longitudinal défini ci-dessus est moins régulier que le retrait transversal; il paraît dépendre surtout de l'opération individuelle de soudure.

Les facteurs influençant le retrait transversal n'agissent pas régulièrement dans le même sens sur les déformations.

Si le retrait angulaire influe peu sur le retrait transversal global, il exerce par contre beaucoup

d'effet sur la répartition et la grandeur des déformations transversales.

Dans le cas des éprouvettes encastrées, aux déformations voisines de la soudure se superposent des déformations générales d'encastrement, qui sont principalement des allongements transversaux uniformément répartis sur toute la longueur des éprouvettes (mesurée normalement à l'axe de la soudure) et de plus faibles contractions longitudinales. Par la libération de l'éprouvette, on supprime les déformations élastiques d'encastrement, mais les déformations permanentes d'allongement transversal subsistent. Le retrait transversal total est diminué, par contre les déformations transversales sont doublées, voire triplées par rapport aux éprouvettes libres analogues.

Dans le cas des éprouvettes libres assemblées par double couvre-joint et cordons d'angle, on observe des déformations généralement très faibles, sauf des pointes de déformations concentrées sous les cordons d'angle frontaux et aux collets.

III. — Tensions de soudure

La connaissance des tensions engendrées par la soudure est plus imparfaite que celle des déformations, tant au point de vue théorique que statistique.

Les déformations considérées plus haut suggèrent l'existence de tensions, mais sont sans rapport avec elles, car il s'agit de déformations en majeure partie permanentes et produites à l'état de malléabilité du métal, à chaud. Cependant, il y a eu des confusions entre déformations de soudure et tensions de soudure, des mesures incorrectes de tensions et même des appareils incorrects (extensomètre de Mathar, p. ex.).

Les mesures de tensions de soudures doivent être faites selon les règles correctes de l'élastisométrie. Elles demandent en général en chaque point au moins deux, de préférence trois ou quatre mesures. La méthode la plus usitée est celle du découpage de l'éprouvette ou de la trépanation (pour déterminer les tensions en un point isolé d'une construction). Cette méthode est très limitée dans ses résultats; elle ne permet que des mesures de tensions à la surface. Les auteurs les plus compétents en matière de mesures de tensions de soudure par diffraction des rayons X (*John T. Norton* et *D. Rosenthal*, *Experimental Stress Analysis*, Vol. I. N° 2) reconnaissent les difficultés et imperfections de l'application de cette méthode, d'usage exceptionnel et limité. Il en résulte que les tensions de soudure sont peu accessibles à la mesure et ont été effectivement peu mesurées. L'auteur a établi les formules théoriques pour la mesure des tensions propres par forage d'un trou cylindrique.

Des mesures faites au laboratoire de l'auteur montrent que les tensions longitudinales et transversales au voisinage des soudures bout à bout sont assez irrégulières. Les plus fortes tensions

sont longitudinales et atteignent la limite d'élasticité dans la soudure même et à son voisinage immédiat; ce sont des tractions. Transversalement, il existe des tractions dans la partie centrale des éprouvettes et des compressions sur les bords. Leurs valeurs maxima sont inférieures à celles des tensions longitudinales.

Ces tensions directes de soudure sont étroitement localisées au voisinage des soudures et leurs valeurs décroissent rapidement lorsque la distance au joint augmente.

Elles existent seules dans les éprouvettes libres. Dans les éprouvettes encastrées, l'empêchement de retrait fait naître des tensions indirectes de soudure, qui sont des tractions transversales générales dans toute l'étendue de l'éprouvette. Ces tensions se composent au voisinage des soudures avec les tensions directes, suivant les lois de la plasticité ou de l'élasticité, selon que la limite élastique est atteinte ou non. En cas d'encastrement étroit et de joints soudés de dimensions ordinaires, même modérées, la tension indirecte de soudure atteint presque toujours la limite élastique. Elle se mesure facilement par libération de l'éprouvette. La mesure des tensions résiduelles directes de soudure, après libération de l'éprouvette, établit que ces tensions sont du même ordre de grandeur que dans une éprouvette libre, lorsque la tension indirecte de soudure est inférieure à la limite élastique.

Lorsqu'elle lui est égale, ces tensions résiduelles indirectes sont considérablement réduites, surtout dans le sens longitudinal. Une détente plastique s'est donc produite dans la région de la soudure sous l'effet de la tension générale transversale élevée. Une déformation permanente transversale diminue donc les tensions directes de soudure, après libération bien entendu. Le retrait est diminué mais les déformations sont augmentées.

À l'état d'encastrement, les tensions résultantes de soudure sont naturellement élevées dans toute l'étendue de l'éprouvette. Ces tensions indirectes élevées sont beaucoup plus dangereuses que les tensions directes.

Elles engendrent fréquemment des ruptures ou des fissures.

Les deux catégories de tensions maissent progressivement pendant le refroidissement de l'éprouvette. L'étude des variations de ces tensions en cours de soudure n'est guère possible par l'expérience, eu égard à la nature des méthodes de mesure. En raison de la variation des propriétés mécaniques des aciers en fonction de la température, il est possible que ce ne soient pas les valeurs finales qui soient les plus dangereuses et que les fissures ou ruptures se produisent avant refroidissement complet.

IV. — Résistance des soudures

Après l'accident du pont de Hasselt, d'assez nombreux articles purement spéculatifs ont énu-

méré toutes sortes d'hypothèses sur les causes de la rupture, telles que défaut de ductilité de l'acier, mauvaise résistance au choc ou aux chocs répétés, fragilité, endurance insuffisante, etc.

Il a été procédé sur les aciers du pont de Hasselt à de très nombreux essais mécaniques de toutes natures: traction statique, choc unique de traction, choc répété de traction ou de flexion, choc sur barreau entaillé, endurance, pliage, etc.

Ces épreuves ont été faites sur des éprouvettes prélevées en divers endroits de l'ouvrage, loin ou près des soudures, dans des pièces cintrées, en long, en travers et suivant l'épaisseur.

Ces essais ont été faits avec une investigation approfondie et inusitée des déformations et de leur répartition, les éprouvettes étant divisées. La ductilité, dont les critères ont les allongements moyens et maxima, mais surtout la striction, a été invariablement reconnue grande, tant en cas de rupture par traction statique que par choc unique ou répété. Les effets de cette ductilité ont été particulièrement mis en évidence dans les éprouvettes hétérogènes, c'est-à-dire contenant une soudure. La limite d'étrirage de la soudure étant plus élevée que celle de l'acier de base, la soudure n'est pas sollicitée dangereusement et la rupture se produit en dehors d'elle, à la traction statique, même si la soudure contenait des défauts graves. Dans le cas de la traction par choc unique, il en est de même si la soudure ne contient pas de défauts graves. En cas de traction par choc répété, qui soumet l'éprouvette à une épreuve d'endurance autant que de choc, il y a une grande sensibilité aux défauts de la soudure, mais en cas de soudure correcte, les effets de la ductilité de l'acier de base restent sensibles.

Les caractères physiques de ductilité des aciers ont été aussi mis en évidence au cours des très nombreux essais, par les amorces multiples de striction (surtout dans les éprouvettes hétérogènes rompues par traction statique ou par choc unique de traction) et par les amorces multiples de rupture (fissures et gerçures, surtout en cas de rupture par chocs répétés et même par fatigue).

L'analyse détaillée des déformations des éprouvettes de traction statique permet d'établir le commencement de la striction et de suivre son développement. En rapport avec la striction, on observe la diminution plus ou moins prononcée de la charge finale de rupture par rapport à la valeur maximum de la charge. On peut, selon cette remarque, définir le travail de striction à partir du diagramme de traction; c'est le critère mécanique le plus défini de la ductilité.

V. — Endurance des soudures

En ce qui concerne l'endurance, de nombreux essais ont établi des caractéristiques tout à fait régulières des aciers des ponts accidentés et une

susceptibilité nullement excessive aux effets d'entailles.

Les éprouvettes contenant une soudure bout à bout sans défauts se rompaient dans la soudure, ainsi qu'il est usuel et leur endurance correspondait à celle d'un barreau homogène affecté d'une légère entaille.

C'est un fait déjà bien connu que des défauts graves dans une soudure bout à bout diminuent très considérablement l'endurance. Selon les expériences de l'auteur, l'endurance des assemblages à cordons d'angles bien conditionnés est bien supérieure à celle des soudures bout à bout affectées de défauts graves et équivalente à celle des soudures bout à bout comportant des défauts modérés.

Au point de vue de la sécurité à la fatigue, ce qui précède correspond à la conception usuelle d'une tension minimum invariable, égale à la tension permanente (p. ex. 6 kg./mm²) et d'une tension maximum variable. L'écart des deux rapports à la tension variable en service semble définir le coefficient de sécurité par rapport à la partie variable de la sollicitation.

En fait, dans des constructions soudées telles que des ponts, on a mis en évidence des tensions généralisées de soudure (de la nature des tensions indirectes précédemment définies) atteignant des valeurs très élevées, égales à la limite élastique, éventuellement majorée. Des tensions permanentes du même ordre peuvent exister indépendamment de la soudure, du fait du laminage, du montage, etc. Il est certain que les tensions permanentes peuvent, dans des régions étendues, être supérieures aux valeurs calculées; elles sont d'ailleurs en général inconnues. Les tensions variables sont, par contre, aisément mesurables et elles ont été fréquemment mesurées. Dans la plupart des cas, elles correspondent aux calculs d'une manière satisfaisante et elles restent toujours modérées.

Pour des ouvrages sollicités de cette manière, telle que des ponts, dont les sollicitations dynamiques sont limitées, modérées et bien connues, tandis que les tensions permanentes peuvent être élevées et inconnues, la notion de sécurité d'endurance doit être logiquement envisagée à écart de tensions extrêmes constant et égal à la tension variable. Les expériences réalisées par l'auteur à écart constant de tensions extrêmes égal à 4 kg./mm² ont montré que la répétition des efforts exerçait une influence très faible, sauf dans le cas de défauts graves de soudure. En d'autres termes, une construction supporte la répétition indéfinie d'une tension variable limitée et modérée, superposée à une tension permanente élevée, dépassant la limite élastique, même si cette construction comporte des défauts modérés, tels que des entailles peu importantes, des soudures bout à bout peu défectueuses, ou des cordons d'angle peu défectueux, etc. Mais si la soudure, même bout à bout, est très défectueuse, la répétition de cette tension variable limitée et modérée entraîne une rupture assez rapide

même sous l'action d'une tension permanente assez faible, de l'ordre de grandeur assigné par le calcul. Comme on a relevé dans des ouvrages soudés rompus de graves défauts de soudure dans des régions subissant d'ailleurs des tensions permanentes élevées en raison des effets du retrait empêché, on comprend que des ruptures aient pu se produire un certain temps après la mise en service et en dehors de tout effet de surcharge importante.

On conclut de là à la nécessité d'éviter les tensions permanentes élevées et inconnues dues aux empêchements de retrait en cas de soudure, aux contraintes de montage, de laminage, etc., d'éviter les surtensions dues aux discontinuités de formes et enfin d'éviter les défauts graves de soudures, agissant comme des discontinuités aiguës et dont les plus nocifs sont les fissures de diverses grandeurs, qui sont toutes les conséquences du retrait.

VI. — Ruptures sans striction

La première observation faite communément sur le pont de Hasselt après sa rupture et sur d'autres cas analogues concernait l'aspect des cassures, dépourvues de toute striction et rappelant les cassures de fonte. D'où la présomption de fragilité énoncée dans les nombreuses publications de caractère dialectique qui ont paru après l'accident avant toute étude effective.

Il a été indiqué au paragraphe IV que cette présomption de fragilité n'était pas justifiée. Elle ne s'est pas vérifiée non plus après avoir soumis les aciers à divers traitements thermiques et mécaniques, tels que revenu avec refroidissement lent (au four) ou rapide (à l'air), trempe vive, écrouissage, vieillissement artificiel, etc.

Les seuls phénomènes observés ont été la diminution considérable de résilience des aciers aux températures très basses et sous l'effet du vieillissement artificiel. Ces phénomènes, d'ailleurs connus pour les aciers de cette nature, n'ont pas de rapports avec les ruptures sans striction. Par contre, des ruptures sans striction ont été constatées accidentellement, en dehors de toute intervention de soudure, dans des laminés de grandes dimensions. La cause en résidait incontestablement dans des tensions élevées de laminage.

L'auteur est parvenu à engendrer des ruptures sans striction dans les aciers du pont de Hasselt en soumettant à la traction statique des barreaux portant de légères entailles de 1 mm. d'ouverture et de 1,2 ou 5 mm. de profondeur, simples ou doubles (opposées).

Les résultats de deux séries de 60 barreaux sont les suivants:

	épaisseur	20 mm.	45 mm.
ruptures sans striction .	6 mm.	48 mm.	
ruptures mixtes . . .	6 mm.	8 mm.	
ruptures avec striction .	48 mm.	4 mm.	

La caractéristique mécanique de la rupture sans striction est que la charge maximum est aussi la charge de rupture.

Le crochet descendant de la courbe de traction disparaît, ce qui corrobore les remarques faites au sujet de la striction au paragraphe IV.

Des ruptures sans striction ont pu être engendrées aussi, mais avec une moindre fréquence, en soumettant à la traction statique des barreaux sur lesquels on a déposé des cordons longitudinaux de soudure assez durs.

L'auteur a aussi cherché à engendrer des ruptures sans striction par des essais de traction excentrique.

Dans beaucoup de cas, la ductilité de l'acier a été telle que les barreaux se sont déformés jusqu'à être sollicités axialement et la rupture s'est produite comme en traction axiale avec striction. Il s'est produit aussi des ruptures avec striction dans des barreaux pour lesquels l'excentricité était réalisée par des entailles très profondes. Mais il s'est produit aussi plusieurs ruptures sans striction, non seulement pour des aciers Thomas ordinaires (non calmés), mais aussi pour des aciers Siemens-Martin calmés, que certains considèrent à l'abri de telles ruptures.

Les ruptures sans striction ne dépendent pas essentiellement de la nature de l'acier, mais de circonstances de forme (épaisseur notamment), de sollicitations (entailles, excentricité) et de structure. Les expériences précitées montrent que diverses formes de ruptures sont possibles et se produisent avec des fréquences diverses.

VII. — Soudabilité des aciers

La notion de soudabilité est devenue populaire à partir de 1936, après les premiers accidents retentissants survenus à des ponts soudés en Allemagne. On a trouvé comme explication que l'acier insoudable était cause des désordres survenus et l'on a conçu par extension la notion de l'acier soudable, qui ne présenterait aucune sensibilité aux effets de la soudure. Cette notion est fallacieuse car, à supposer que toute autre sensibilité puisse être supprimée, il subsiste inévitablement le retrait et ses effets. Mais, en méconnaissance totale des règles de la mécanique appliquée, on semble croire que les aciers soudables jouiraient d'une sorte de ductilité sélective qui leur permettrait de résorber les tensions de soudure, tout en étant rigide à l'égard des sollicitations connues. Des imaginations de cette nature existent aux débuts de toutes les techniques; il y en a eu d'analogues à l'origine du béton armé.

En fait, il s'agit uniquement d'aciers de construction, qui sont tous soudables. Mais on est arrivé, par les notions qui précèdent, à la conception de degrés de soudabilité différents, d'après l'élaboration métallurgique. Cela revient à envisager que le degré d'altération par la soudure de divers

aciers de même nuance peut varier d'après la nature de l'élaboration de l'acier.

Cela n'est pas absolument établi, car il n'y a qu'un critère sensible, c'est celui de la résilience, dont la signification est mystérieuse. On s'est naturellement ingénié à proposer d'autres critères, mais ils ne prouvent que ce qu'ils veulent prouver et sont tout aussi mystérieux que la résilience.

Les ruptures sans restriction ont donné lieu à la notion d'insoudabilité et par antithèse, un acier idéalement soudable ne devrait pas pouvoir se rompre sans restriction.

Or, il semble résulter des essais de l'auteur que tous les aciers de constructions sont susceptibles de se rompre sans restriction dans certaines circonstances. L'auteur propose comme définition de la soudabilité d'un acier son aptitude à subir sans insécurité les effets du retrait dans les conditions de l'application. C'est donc une notion très complexe, puisque les effets du retrait sont variables et mal connus et que les conditions d'application sont très diverses. Les critères sont donc aussi très nombreux, variables et complexes, d'ailleurs incertains.

L'opinion de l'auteur est que, pratiquement, la soudabilité ou plutôt les accidents de soudure sont surtout conditionnés par les défauts de matière et d'exécution, aussi de conception, plutôt que par la nature des aciers, qui sont des produits industriels et non des corps définis.

Les constructions soudées sont cependant plus sensibles, à cause du retrait, aux défauts des aciers.

De ce fait, elles requièrent des aciers mieux élaborés et plus soignés, de meilleure qualité industrielle que les autres constructions et ce d'une manière variable d'après le type de construction et d'autant plus que les effets du retrait sont plus importants. Au point de vue métallurgique, il s'agira en tous cas d'aciers qui ne prennent pas la trempe et qui ne se fissurent pas par soudure. Un contrôle attentif du soin de l'élaboration et une réception très sérieuse semblent les plus sûrs garants de la soudabilité.

VIII. — Sécurité des constructions soudées

La sécurité d'une construction quelconque est entièrement dépendante de l'exactitude de la prévision des sollicitations qu'elle subira et de la prévision de son comportement à l'égard de ces sollicitations. Dans le cas de certaines constructions soudées, il y a eu imprévision quant au comportement et même quant à la sollicitation.

Le coefficient de sécurité n'est qu'un coefficient d'imprévision et il n'est sûr que si l'imprévision est uniforme. En d'autres termes, la sécurité d'une construction doit être la même dans toutes ses parties. Si l'on fait abstraction de la stabilité de flambage, les constructions périment le plus souvent par les assemblages, considérés trop souvent comme des détails sans importance et négligés.

Or ces points singuliers sont les points les plus délicats, les plus dangereux, donc les points essentiels des constructions. Dans les constructions soudées, les soudures qui constituent les assemblages sont les éléments les plus délicats, les plus dangereux, donc les points essentiels. C'est sur leurs effets mécaniques et leur comportement que porte l'imprévision; c'est le retrait et tous ses effets, insuffisamment connus, qui créent l'imprévision et engendrent l'insécurité.

Les conditions essentielles de sécurité des constructions soudées sont la connaissance suffisante des effets de la soudure, surtout du retrait et de ses manifestations diverses, permettant leur prévision.

Subsidiairement, la connaissance des méthodes et moyens d'exécution permettant d'agir sur ces effets dans un sens ou un autre, considéré comme favorable à la sécurité, et ce d'une manière permettant autant que possible le contrôle des prévisions. Il est même permis d'envisager des dispositions qui tireraient du retrait, un parti favorable à la sécurité de la construction.

De là l'utilité d'une large étude expérimentale statistique du retrait et de ses effets, en dépit de son caractère ingrat. Elle pourra conduire à une connaissance scientifique de la question, à tout le moins permettre une prévision suffisante pour les besoins de la pratique. Aussi cette étude devrait-elle être plus généralement pratiquée qu'elle ne l'a été jusqu'à présent. Des contributions réunies de divers laboratoires et ateliers de constructions on doit aboutir à établir des méthodes suffisantes de prévision. On doit bannir des considérations de sécurité la notion fautive de la résorption naturelle des tensions de soudure, qui ne se produit dans aucun acier doux de construction.

Discussion

Après les conférences et à la suite de la discussion qui a suivi celle du 8 février, l'auteur a reçu la lettre suivante, dont la reproduction paraît nécessaire, parce qu'elle exprime précisément le contre-pied des opinions de l'auteur. Elle émane de M. F. Buehler, ingénieur-diplômé, de Bâle.

«Zur Frage der Ursache des Einsturzes der Brücke Hasselt insbesondere bezüglich der Stahlqualität hat L. Reeve am Institute of Welding 3 (1940) einige Bruchstücke untersucht und dabei folgende Resultate erhalten:

Lamelle des Untergurtes 300 × 55.

Chemische Analyse: 0,2 C + 0,49 Mn + Sp Si + 0,064 S + 0,054 P + 0,008 O + 0,011 N, wovon 0,0075 O als Fe O und MnO.

Makrogefüge: Ausgesprochene Steigerungen, nicht metallische Einschlüsse, Gefüge grobkörnig und etwas stengelig.

Mechanische Eigenschaften: Streckgrenze

$$\sigma_s = 20,5 \text{ kg/mm}^2.$$

Zugfestigkeit $\sigma_z = 42,5 \text{ kg/mm}^2.$

Bruchdehnung $\lambda_{100 \text{ mm}} = 23 \%$.

Brucheinschnürung $\varphi = 25 \%$.

Kerbschlagfestigkeit $\mathfrak{R} = 2,4 \text{ mkg/cm}^2$ am Rande.

Anlieferungszustand $\mathfrak{R} = 1,5 \text{ mkg/cm}^2$ im Kern.

nach Alterung (15 % Reckung, $\frac{1}{2}$ Stunde auf 250° angelassen) $\mathfrak{R} = 0,3$ bis $0,5 \text{ mkg/cm}^2.$

Stahlguss-Keilstück des Ueberganges vom Pfosten zur Untergurtlamelle

Chemische Analyse: 0,17 C + 1,02 Mn + 0,095 S + 0,084 P

Metallographie der Schweissnähte

Einige erhebliche Mängel; Stoßschweissung zwischen Lamelle und Stahlguss viele Poren; Stossnaht der Gurtungslamelle viele Poren, von denen Mikronisse ausgingen. Bei einem andern Stück Kehlnaht mit Rissen, möglicherweise wegen schlechter Passung mit dünn ummantelten Elektroden geschweisst; Schweissgut mit Ausnahme der Kehlnaht gut; bedeutende Aufhärtungen wurden nicht festgestellt.

Darnach entsprach die Stahlqualität den Anforderungen nicht, die heute an einen gutschweisbaren Stahl gestellt werden, und zwar:

1. Der Stahl erfüllte die Bedingungen der belgischen Normenblätter CMA 152—154/11bis für keine der in diesen Blättern aufgeführten Stahlqualitäten A 37 SC, A 37 HS, A 42 SC und A 42 HS. Entweder ist der C-Gehalt zu gross oder der Stahl ist nicht beruhigt erschmolzen oder er hat zu niedrige Kerbschlagzähigkeiten.
2. Die Brucheinschnürung von $\varphi = 25 \%$ liegt wesentlich unter dem Mindestwert, wie er für einen guten Stahl festgestellt wird; dieser Mindestwert kann mit ca. 50 % oder auch noch mit 40 % angegeben werden, aber niemals 25 % erreichen. Die zu geringe Brucheinschnürung $\varphi = 25 \%$ (bei guter Gleichmassdehnung $\lambda_{100 \text{ mm}} = 23 \%$) weist auf einen Stahl un-zweckmässiger metallurgischer Behandlung; ein solcher Stahl neigt zu Spröbruch, da eine gute Gleichmassdehnung kein Mass für ausreichende plastische Reserven abgibt.
3. Das unter 2. Gesagte wird bekräftigt durch die niedrige Kerbzähigkeit und die Alterungsempfindlichkeit. Solche Stähle geben beim Zusammenwirken von Schrumpf- und Betriebsspannungen insbesondere bei konstruktiven oder ausführungstechnischen Kerben zu Durchreisens Anlass. Kerben können in absoluter Weise nicht vermieden werden, es werden immer grössere oder kleinere Kerben (innere oder äussere) vorhanden sein, so dass der Stahl von derartiger Beschaffenheit sein muss, dass er nicht zu Sprödrüchen Anlass gibt.

In diesem Zusammenhang ist auf die O- und N-Gehalte hinzuweisen sowie auf den besonderen Umstand, dass der O grösstenteils in der ungünstigsten Form FeO auftritt. Der N-Gehalt, wenn auch nicht besonders gross, ist immerhin gleich gross wie er im St 52 der Rüdersdorfer Brücke festgestellt wurde. Der N-Gehalt wird in vielen Fällen als die Ursache von Anrissen angesehen.

Aus diesen und anderen Gründen kann der Ansicht nicht beigepflichtet werden, dass der Stahl einwandfrei gewesen sei und die schlechte Ausführung (die nicht beschönigt werden soll) der Schweissarbeit trage für sich allein die Schuld am Einsturze. Zur Frage der *Schweißschumpfspannungen* äussert sich *Reeve*, dass diese allein nicht schuld am Einsturz waren, was auch *Prof. Bierett* meint, wenn der Werkstoff 'gesund gewesen wäre'. Die angewendeten Schweissfolgen haben im Viereckel-Knoten von Hasselt grosse innere Spannungen erzeugt. Die Folgerung, dass der Frage der Schrumpfspannungen schlechthin grosse Nachteile beizumessen sind, kann wie folgt richtiggestellt werden: Sofern der Grundwerkstoff, der Zusatzwerkstoff, die konstruktive Durchbildung und die Ausführung der Arbeit einwandfrei sind, spielen Schrumpfspannungen auf die statische und auf die dynamische Festigkeit bei St 37 keine namhafte Rolle.»

Le rapport des membres du sous-comité R-11 sur la soudabilité des aciers à haute résistance du Conseil des recherches sur la soudure de l'Institut britannique de la soudure a été publié par M. L. Reeve dans le N° I des «Quarterly Transaction of the Institute of Welding» de janvier 1940. Les conclusions de ce rapport, que nous reproduisons textuellement ci-après, ne sont pas du tout conformes à celles de M. Buehler.

Auparavant, nous devons faire observer que le rapport de la Commission britannique témoigne d'une faiblesse d'ailleurs reconnue, qui résulte de la provenance inconnue des échantillons du pont de Hasselt dont la commission a disposé. Il en résulte qu'elle n'a pu procéder qu'à un nombre relativement faible d'essais et qu'elle a été gênée dans ses conclusions par l'ignorance de la position dans le pont des fragments essayés. Par exemple, une plaque de 10 mm. dont il est fait état n'a pu provenir que d'un étrésillon sans importance ou d'un gousset raidisseur de tablier.

L'auteur a procédé à des essais sur un tonnage important d'aciers du pont de Hasselt. Avec autorisation officielle, il en a envoyé des fragments importants, bien définis et caractéristiques à M. le Professeur Roš (L.F.E.M., Zurich) et à M. Mund, ingénieur en chef des Chemins de fer de l'Etat néerlandais. Enfin, les Allemands se sont emparés en Belgique, lors de l'invasion de 1940, de fragments du pont de Hasselt consignés par les experts judiciaires. Ils ont publié des résultats d'essais dans diverses revues (*Stahl und Eisen* 1942, VDI, 1943).

Les résultats de tous ces essais doivent être considérés autant que ceux du petit nombre d'essais anglais.

D'une manière générale, il y a bonne concordance entre les résultats de tous les essais comparables, sauf les points suivants.

M. Roš, M. Mund et les Anglais trouvent plus de P que l'auteur et que les Allemands, M. Mund et les Anglais plus de S . Il y a concordance pour le S et P de l'acier coulé, de mauvaise qualité. Des nombreux essais de contrôle de l'auteur, il résulte que la répartition du P et du S est assez variable, par suite notamment de la ségrégation.

Il y a des écarts nombreux et aberrants dans les résiliences, ce qui tient à la nature et aux modalités de l'essai.

Les Anglais emploient la méthode Izod. M. Mund employait l'éprouvette Charpy grand modèle, dont les résultats variaient tout à fait en sens inverse des nôtres, obtenus sur éprouvettes Mesnager ou Charpy, petit modèle.

En ce qui concerne les gaz, les analyses dont nous disposons décèlent peu de N et relativement beaucoup de O , ce qui est l'inverse des résultats publiés par les Anglais, qui n'y attachent d'ailleurs qu'une importance mitigée.

Le résultat le plus surprenant et d'ailleurs tout à fait unique, aussi parmi le petit nombre d'essais anglais, est la striction de 25 % seulement d'un acier dont par ailleurs la limite apparente d'élasticité est 20,5 kg./mm², la limite de rupture 42,5 kg./mm² et l'allongement moyen de rupture 23 %. A une striction de 25 % correspond un allongement maximum de 33,33 % qui paraît bien faible par rapport à un allongement moyen de 23 % sur 100 mm., alors que la limite apparente d'élasticité est inférieure à la moitié de la charge de rupture. Un des points faibles du rapport anglais est que ce résultat singulier ne fait l'objet d'aucun commentaire; on aurait aimé voir reproduire le diagramme de traction de cet essai. Faute de renseignements, nous ne pouvons apprécier la valeur qu'il faut attacher à ce résultat.

A supposer qu'il soit sans reproches, il constitue certes un accident dans l'ensemble des résultats d'essais dont nous disposons; il est même unique parmi le petit nombre de résultats anglais, bien que, d'une manière générale, ils soient plus «pessimistes», en ce qui concerne l'acier que tous les autres résultats connus.

Voici textuellement les conclusions du sous-comité Anglais:

Defined conclusions as to the causes of the collapse of the bridge are obviously impossible in this report in view of the small amount of technical evidence available. A final allocation of the responsibility for the failure is possible only by the Commission which has at his disposal all information regarding the design of the bridge, and its conditions of loading together with far more complete data on the mechanical, chemical and metal-

lurgical examination of specimens from it that can be obtained from a cursory examination of a few specimens chosen almost at random. Nevertheless the information obtained in the course of the examination of the available material is certainly illuminating and justifies at least some tentative conclusions. It is obvious that the failure must have been due to one more of the following causes:

- a) overstressing, either generally or locally due to incorrect design
- b) defective steel
- c) defective weld metal
- d) incorrect welding procedure and technique.

As regards the design of the bridge, no information was available, although it is understood that a number of bridges, of similar design are still giving satisfactory service. The matter is in any case outside the scope of the work of the Subcommittee.

As regards the quality of the steel the evidence from the few specimens examined tends to show that while the steel employed was unsatisfactory in certain respects, the whole blame for the collapse of the bridge cannot with any justification, be placed upon the steel alone. The main cause for dissatisfaction is the comparatively low Izod value in the «as received» conditions of steel A and to a lesser extent of steel E.

The exact practical significance of low Izod value is difficult to state with any degree of certainty. In particular, there is no definite evidence that such low Izod can be the direct cause of the type of cracks known to have developed in this or similar welded bridges.

It has been suggested that a steel with a low Izod value would propagate a crack more rapidly once such a crack had been started by other causes. But even this requires confirmation and to support it in this particular case, it would have to be shown that the cracks in the bridge were associated with the steels of low Izod value.

While steels with such low Izods as reported cannot be regarded as entirely satisfactory, there is no definite evidence that had the Izod values been consistently above say 30 foot-pounds, this failure would not have occurred. With regard to the still lower Izod value produced in the steels by strain-ageing, it was concluded on page 8, that the special conditions required for producing such ageing were not present.

The micro-structure of the steel was unsatisfactory in some respects, and in certain cases (e. g. the coarse grain of plate A) may have been one of the causes of the unsatisfactory mechanical properties.

The chemical analysis of the steels showed that in some cases the sulphur and phosphorus contents were above normal specifications limits. Recent investigations indicate that the phosphorus content can be very much higher in low carbon steel than was formerly supposed without harmfully affecting the quality of the steel.

The sulphur and phosphorus content of the casting A 6, however, is without question too high for an important unit of a fusion welded structure.

The quality of the weld metal is also somewhat variable, as indicated by the few weld metal tests reported in Tables VIII and IX but again, with the possible exception of weld N° 7 it is improbable that actual mechanical failure could be ascribed to the weld quality as such.

There can be little doubt that the most unsatisfactory feature which has been exposed by the investigation is the defective nature of the welding procedure and technique which has resulted in such grave welding defects as described on pages 10 and 11 and shown in Figs. 13 to 18.

The defective butt weld shown in fig. 13 has already been discussed in some detail, but it is of interest to note that attention was also drawn to this (or a similar) weld in an article on the Hasselt bridge which appeared in «Engineering» for March 3d 1939 and was published originally in the February issue of «L'Ossature métallique». Fig. 19 which is reproduced from this article is similar at a—b to our specimen A and indicates the manner of its attachment to the lower chord of the bridge.

The following extracts from this article have a considerable bearing on the examination of specimen A.

«The first point of importance is that in five Vierendeel bridges, in which the welding technique was identical with that employed in the case of the Hasselt Bridge, it has been demonstrated that concentrations of high internal stress occur in the region in line with the joint between the flanges of the gussets and the lower chord of the bridge. This is the region a—b in the accompanying diagram, which shows where the initial fracture occurred in the Hasselt Bridge. In four of these bridges, fissures have been discovered either in the welds or in the gusset flanges in this region, and in certain cases distinct cracks have developed in the lower chord — as indicated by the line c—d in the diagram as a result of the rupture of the gusset flange.»

And later the article goes on:

«The examination of portions of the bridge recovered from the bed of the canal has led to the conclusions that the initial rupture occurred in a weld (at 'e' in the diagram). The failure taking place abruptly is considered to have caused a sudden re-distribution of the stress and brought about the failure of the lower chord as the result of shock.»

While the Sub-Committee does not necessarily agree with the mechanisms of failures suggested, it is of interest to point out that its independent examination of the weld shown in fig. 13 (corresponding to the above weld «e») confirms the presence of serious cracks in it. In the view of the Sub-

Committee these have been accentuated by the complete absence of fusion at the root as described and probably the high sulphur content in the attached casting which would favour cracking in the first head. There are considerable number of butt welds of this type in the bridge structure and, if they have all been executed in the same manner, it is not surprising that one of them failed completely.

The Sub-Committee has insufficient at its disposal to confirm or otherwise the further hypothesis that this failure led to complete collapse of the bridge as a result of stress re-distribution and shock. What has been shown is that a failure of a main butt weld of the type described is not an unreasonable hypothesis.

The question of the influence of internal stresses is, strictly speaking, outside the scope of this report, but the Sub-Committee takes the view that such stresses would have no practical significance if the deposited weld metal had been sound in the first place, and if the back of the weld had been cut out and sealed in the normal manner.

In addition to fig 13, there are other gross welding defects revealed in the remaining illustrations which may have been secondary factors contributing to the failure. If the above explanation of the causes of the failure is correct, the extreme importance of correct welding procedure is demonstrated in a most striking manner. It will be interesting to know in due course whether this is also the view of the investigating commission.

Ces conclusions sont très pertinentes, en dépit des lacunes d'investigations qui entachent nécessairement, pour les raisons indiquées plus haut, le travail du sous-Comité britannique. Un rapport officiel aurait seul pu porter remède à ces lacunes.

Le sous-Comité britannique n'a pas été informé des tensions de soudure qui ont été mises en évidence dans les pattes d'attache et de leurs effets.

L'auteur ne peut donc pas partager l'opinion exprimée dans les conclusions sur le peu de signification à attacher à ces tensions générales de soudure, opinion qui remonte d'ailleurs à 1940 et n'est peut-être plus «up-to-date». Sous cette réserve majeure et quelques autres de moindre importance, qui se rapportent aux conséquences des conditions anormales dans lesquelles a été faite l'investigation anglaise, l'auteur estime que les conclusions précitées sont modérées et raisonnables; elles concordent globalement avec celles que M. le Professeur M. Roš avait déduites et de ses essais et aussi avec celles de l'auteur.

A défaut de rapport d'enquête officiel, les conclusions britanniques ci-dessus sont les meilleures qui aient été publiées sur les causes de l'accident du pont de Hasselt. Mais l'auteur ne voit pas du tout comment M. Buehler peut en déduire et justifier les remarques finales de sa lettre.