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

Band: 6 (1960)

Artikel: Generalbericht

Autor: Dubas, Pierre

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-6958

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: 02.10.2025

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

Generalbericht

a) Schweißung

Die Forschung auf dem Gebiet der Schweißung hat in den letzten Jahren einen derartigen Umfang angenommen, daß es uns absolut unmöglich ist, hier auch nur eine summarische Übersicht zu geben. Wir beschränken uns daher auf die Probleme, welche in den sechs vorliegenden Abhandlungen behandelt wurden und welche besonders die Ingenieure des Brücken- und Hochbaus interessieren.

Der Einfluß der Längsspannungen in Kehlnähten

Die erste Abhandlung von F. FALTUS ist ein vorwiegend auf Versuchen basierender Bericht über den Einfluß der Längsspannungen in hauptsächlich auf Schub beanspruchten Kehlnähten. Es sei daran erinnert, daß dieses Problem am Kongreß von Lissabon von G. WÄSTLUND und L. ÖSTLUND angeschnitten wurde.

Die Probestäbe, welche F. FALTUS für seine Versuche verwendete, bestehen aus zwei gleichen Teilen, die 1 : 10 abgeschrägt, mit Flankennähten verbunden sind. Bei dieser Anordnung sollten die Längsspannungen praktisch konstant und die Schubspannungen gleichförmig verteilt sein. Diese Versuche würden also prinzipiell erlauben, die Wirkung des plastischen Ausgleichs der Schubspannungen auszuschalten und dadurch den Einfluß der Längsbeanspruchungen der Naht klarer aufzudecken. Die Streuung der Werte der Vergleichsspannung, berechnet nach der Hypothese von der Konstanz der Gestaltänderungsarbeit, ist bedeutend; dies läßt sich leicht erklären, wenn man bedenkt, daß sich diese Theorie auf den Fließzustand und nicht auf den Bruch bezieht. Die Versuchsergebnisse zeigen hingegen klar, daß die Längsspannungen die Schubfestigkeit der Kehlnähte merklich vermindern.

Die Sprödbrüche

Es ist sicher nicht notwendig, hier die Brüche in Erinnerung zu rufen, die in geschweißten Konstruktionen, vor allem in Brücken, Schiffen und Druckleitungen aufgetreten sind. Obschon die Zahl der schweren Schadenfälle im Vergleich zu den ausgeführten Bauwerken relativ klein ist, sind diese Brüche ebenso symptomatisch wie lästig: sie haben das Vertrauen, das man in die Schweißung setzte, stark erschüttert und dadurch unzweifelhaft ihre Ausbreitung verzögert. Die Untersuchungen zur Aufklärung der Ursachen dieser Schadenfälle haben indessen zu neuen Fortschritten der Technik beigetragen, indem sie das Problem der Sprödbruchanfälligkeit der Baustähle in den Vordergrund rückten; dieses ist hauptsächlich für die geschweißten Konstruktionen

von Bedeutung, obwohl es auch bei genieteten Bauwerken eine gewisse Rolle spielt. Diese Frage wird in der zweiten Abhandlung von F. FALTUS und in derjenigen von K. RÜHL behandelt.

In seinem Aufsatz gibt K. RÜHL eine allgemeine Übersicht der heutigen Kenntnisse auf dem Gebiet der Sprödbrüche; er weist auf die noch bestehenden bedeutenden Lücken hin, welche nur durch *systematische* theoretische und experimentelle Forschung ausgefüllt werden können.

Bekanntlich wird die Verformungsfähigkeit eines bestimmten Stahles gegebenen Mikrogefüges vor allem vom Spannungszustand, der Temperatur und von der Beanspruchungsgeschwindigkeit beeinflußt. Wenn sich einer dieser Faktoren ändert, so folgt die zur Herbeiführung des Bruches notwendige Energie im allgemeinen nicht einem regelmäßigen Gesetz; die Versuche, die sich hauptsächlich auf den Einfluß der Temperatur beziehen, zeigen, daß diese Arbeitsaufnahme — ausgedrückt durch die Kerbschlagzähigkeit — innerhalb einem engen Temperaturbereich einen plötzlichen Abfall, den sogenannten Steilabfall, auf einen sehr kleinen Wert erleidet. Diese Temperatur, welche als Übergangs- oder Versprödungstemperatur bezeichnet wird, trennt das Gebiet der Brüche mit großer Dehnung von dem der Sprödbrüche. Mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit und mit zunehmender Verschärfung des Spannungszustandes wird das Steilabfallgebiet zu höheren Temperaturen verschoben. Diese Eigenschaften des Stahles sind längst bekannt. Es genügt, wenn wir hier die Arbeiten von CONSIDÈRE, LE CHÂTELIER, FRÉMONT, ISOD, CHARPY usw., deren einige aus dem letzten Jahrhundert stammen, in Erinnerung rufen.

Über Ursachen und Gesetzmäßigkeit dieser Erscheinungen herrschen aber verschiedene Meinungen; ganz besonders gilt dies für den Zusammenhang zwischen der kritischen Temperatur und dem Spannungszustand. Wie K. RÜHL bemerkt, ist dies in der Praxis kaum von Nachteil, weil es sozusagen unmöglich ist, in jedem Punkt eines Bauwerkes den totalen Spannungszustand zu bestimmen, da dieser weitgehend von den Eigenspannungen abhängt, welche sich der Berechnung entziehen.

Die Untersuchung der verschiedenen, durch Sprödbrüche verursachten Schadenfälle beweist nach K. RÜHL, daß das Verhalten eines Bauwerkes als ganzes ähnliche Merkmale aufweist wie die Kerbschlagversuche. Auch hier erhält man entweder Sprödbrüche mit sozusagen kleiner Dehnung, die ohne vorherige Anzeichen auftreten, oder aber Brüche mit großer Dehnung. Andererseits gibt es auch hier, wie beim Kerbschlagversuch, zwischen den beiden Brucharten eine ziemlich eng begrenzte Übergangstemperatur.

Auf diesem Gebiet gibt es nur wenige Versuchsergebnisse. Deshalb wird man die Abhandlung von F. FALTUS mit Interesse lesen, welche sich auf den Einfluß von angeschweißten Knotenblechen auf die Sprödbruchempfindlichkeit der Biegeträger bezieht. Für die in den beschriebenen Versuchen verwendeten Stähle liegt die kritische Temperatur fast immer über $-40°$, welcher Form

die an die Zuggurte angeschweißten Knotenbleche auch seien. Erzeugt man aber durch punktweises Erhitzen innere Druckspannungen im Gebiet des Überganges, so treten Trennbrüche nur noch bei Knotenblechen ohne progressiven Übergang auf. Diese Versuche zeigen somit den Einfluß des Spannungszustandes, sei er nun durch Eigenspannungen oder durch konstruktive Unstetigkeitsstellen bedingt.

Es wäre lehrreich gewesen, wenn man für jede Knotenblechform und für jede verwendete Stahlsorte die Temperaturlage des Steilabfallgebietes von zähem zu sprödem Bruch festgestellt und diese Ergebnisse mit den kritischen Temperaturen aus den Kerbschlagversuchen verglichen hätte.

Diese Seite des Problems interessiert in der Tat besonders den Konstrukteur, welcher die für ein geschweißtes Bauwerk zu verwendende Stahlgüte zu bestimmen hat. Wohlverstanden ist es aus Wirtschaftlichkeits- und Konkurrenzgründen ausgeschlossen, nur Sonderstähle allerbester Qualität zu verwenden: Man wählt daher aus den verschiedenen Qualitäten, welche in den Normen aufgeführt sind oder von den Stahlwerken angeboten werden, diejenige aus, welche bei den gegebenen Bedingungen gerade ausreichend gut ist.

Die heute verfügbaren Baustähle werden normalerweise, was ihre Sprödbruchanfälligkeit betrifft, mit Hilfe der Ergebnisse von Kerbschlagversuchen klassiert. Dabei spielen zwei hauptsächliche Parameter eine Rolle: die Temperatur und die Art der Kerbe, welche die Schärfe des räumlichen Spannungszustandes bestimmt. Man kann demnach mit variablen kritischen Temperaturen bei einer bestimmten Kerbform oder mit Kerben zunehmender Schärfe bei einer bestimmten Temperatur arbeiten; die beiden Systeme lassen sich auch kombinieren. Für weitere Einzelheiten wird z. B. auf die Empfehlung der Kommission IX des International Institute of Welding (Vorschlag BONHOMME), auf die neue deutsche Norm DIN 17100 oder auf die englische Norm B.S. 2762 verwiesen. Es sei hier nur festgehalten, daß der Begriff der kritischen Temperatur n den Vorschriften nicht explizit enthalten ist; man hat sich damit begnügt, für die Kerbzähigkeit einen relativ kleinen Wert festzusetzen, welcher bei gegebener Temperatur noch erreicht werden muß.

Um die geeignete Stahlgüte wählen zu können, sollte man natürlich den Zusammenhang zwischen der Sprödbruchneigung des geschweißten Bauwerkes — oder des Bauteiles — und derjenigen des durch Versuche an Probestäben charakterisierten Werkstoffes genau kennen. Um dies zu erreichen, kann man z. B. untersuchen, welche Probenform die gleiche Übergangstemperatur aufweist wie der in Frage stehende Bauteil. Dieses Verfahren wendet H. M. SCHNADT an. K. RÜHL dagegen schlägt vor, nur eine Probenform zu verwenden und die Bauteile nach der Differenz zwischen ihrer Übergangstemperatur und derjenigen der Probestäbe zu klassieren. Im einen wie im andern Fall wird implizite angenommen, daß der Zusammenhang zwischen den Bauwerken und den Kerbschlagproben, welche zu deren Klassierung dienen, von der Stahlgüte unabhängig ist, was aber keinesfalls bewiesen ist.

Die wirkliche Schwierigkeit liegt also nicht im Klassieren der Stähle, sondern im Klassieren der Bauteile. Unserer Meinung nach genügen die experimentellen Grundlagen noch nicht, um eine einwandfreie Lösung des Problems zu erlauben. Unsere Kenntnisse über die Übergangstemperaturen der Bauwerke sind in der Tat sehr fragmentarisch, und man ist noch darauf angewiesen, den Einfluß der Hauptfaktoren abzuschätzen, die sowohl von der allgemeinen Gestaltung als auch von der Fertigungstechnik abhängen: Die Dicke, die Anordnung und die konstruktive Ausbildung, die Kaltverformungen während der Herstellung (Alterung), die verwendeten Elektroden, die angenommene Schweißreihenfolge (Schrumpfspannungen) und die bei der Ausführung angewendeten Vorsichtsmaßnahmen, das Spannungsfreiglühen, die Größe der Betriebsspannungen, vor allem der ständigen Spannungen usw. Allein schon die allerdings nur unvollständige Aufzählung dieser Faktoren zeigt, daß das Problem komplex ist und sich kaum auf ein einfaches Schema reduzieren läßt.

Die Sprödbruchanfälligkeit ist übrigens nicht die einzige Eigenschaft des Stahles, die berücksichtigt werden muß; diejenigen Eigenschaften, die einen Einfluß auf die Neigung zur Rissebildung oder auf das Entstehen von schweren Fehlern in den Schweißnähten und ihren Übergangszonen haben, sind auch von Bedeutung; es muß nämlich vermieden werden, daß durch das Schweißen scharfe Kerben entstehen, von welchen jede die Ausgangsstelle eines Bruches sein könnte. Die Kaltrissigkeit des Werkstoffes hängt aber stark von seiner Neigung zur Aufhärtung und von der Zähigkeit der Übergangszone unter mehrachsigem Spannungszustand ab. Für die Warmrissigkeit des Füllgutes und für die Bildung von Poren oder Schlackeneinschlüssen spielen die Eigenschaften des Grundwerkstoffes ebenfalls eine Rolle. Grundsätzlich sollte daher die Prüfung der Kerbschlagzähigkeit des Grundwerkstoffes durch Versuche an der Schweißnaht und ihrer Übergangszone ergänzt werden. Für die schwach kohlehaltigen und praktisch nicht legierten Stähle kann man für die üblichen Bauwerke auf solche Versuche verzichten, unter der Bedingung, daß man das Problem kennt und daß man die notwendigen Vorsichtsmaßnahmen trifft, z. B. in der Wahl der Elektroden.

Qualität und Kontrollen

In ihren Abhandlungen befassen sich D. C. C. Dixon, Ch. Dubas und J. D. Thompson mit den Problemen, die sich bei der Fertigung geschweißter Bauwerke stellen. Es handelt sich dabei besonders um die Frage der Qualität und der notwendigen Kontrolle, um sie zu erzielen und beizubehalten.

Um eine geschweißte Konstruktion hoher Güte zu erhalten, muß man in erster Linie das geeignete Material verwenden. Heute wird diese Wahl vorwiegend durch Überlegungen betreffend der Sprödbruchanfälligkeit bestimmt. Dieses Problem wurde bereits angeschnitten, indem wir kurz die wichtigsten zu berücksichtigenden Gesichtspunkte angaben. Fügen wir hier nur noch bei,

daß die Wahl der Elektroden eine wichtige Rolle spielt; in gewissen Fällen erlaubt die Verwendung hochwertiger Elektroden, an den Stahl weniger strenge Forderungen zu stellen. Wir denken insbesondere an die basischen Elektroden, welche nicht zur Versprödung neigen und gegen Unreinigkeiten im Grundwerkstoff wenig empfindlich sind.

Im allgemeinen werden die Gütewerte des Stahles bei der Abnahme im Walzwerk bestimmt. Indessen verzichtet man im gewöhnlichen Stahlhochbau oft auf eine eigentliche Abnahme, und die Eisen gelangen zum Verbraucher ohne Prüfung durch eine unabhängige Organisation, manchmal selbst ohne Kontrolle durch das Stahlwerk. Man kann sich fragen, ob infolge der Bedeutung, welche die Frage der Sprödbruchsicherheit bei geschweißten Konstruktionen erlangt hat, die Stahlbauunternehmen nicht über ein kleines Versuchslaboratorium verfügen sollten; dieses würde ihnen erlauben, einfache chemische und metallographische Analysen auszuführen und die mechanischen Kennwerte des Stahles zu bestimmen, insbesondere die Kerbschlagzähigkeit. Zudem könnte der Werkstoff auch mit Ultraschallgeräten auf Doppelungen geprüft werden, welche leider in mit Aluminium beruhigten Sonderstählen häufig auftreten. In einigen Ländern sind schon verschiedene Unternehmen zu dieser Lösung übergegangen, insbesondere jene, welche auch im Großkesselbau tätig sind. Dieses Laboratorium würde wohlverstanden auch die destruktive und zerstörungsfreie Prüfung der Schweißnähte übernehmen, von welchen wir später sprechen werden.

Das technische Büro seinerseits wird die allgemeine Gestaltung und die konstruktiven Einzelheiten der Bauwerke unter Beachtung nicht nur der Vorteile, sondern auch der spezifischen Forderungen der Schweißung entwerfen müssen. Man wird insbesondere alles vermeiden, was zu Spannungsanhäufungen führen kann, da diese die Ermüdungsfestigkeit verringern und die Trennbruchgefahr vergrößern. Man wird alles unternehmen, um einen möglichst flüssigen Kraftfluß sicherzustellen und die plastische Selbsthilfe des Stahles zu erleichtern.

Beim Erstellen der Zeichnungen sollen die technischen Büros in enger Zusammenarbeit mit der Werkstattleitung stehen. Die Fertigung muß in der Tat möglichst einfach gemacht werden; dadurch verringert sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens schwerer Fehler. Oft ist es empfehlenswert und vorteilhaft, einen detaillierten Schweißplan aufzustellen, welcher die Eigenschaften der zu verwendenden Elektroden berücksichtigt. Dieser Plan kann im übrigen nichts anderes als ein Kompromiß sein, denn es gilt gleichzeitig zwei gegensätzliche Phänomene zu begrenzen: die Schrumpfspannungen und die Schrumpfungen.

Die Arbeitsvorbereitung wird sich ebenfalls mit der Frage der thermischen Behandlungen (Vorwärmen, Spannungsfreiglühen) befassen sowie mit dem Einsatz von Einrichtungen, welche die Ausführung aller Schweißnähte in günstiger Lage erlauben sollen (z. B. Dreheinrichtungen). Nach D. C. C. Dixon

ist eine gründliche Vorbereitung immer angezeigt; einerseits führt sie zu einer Gütesteigerung, andererseits hilft sie oft Arbeitsstunden einsparen.

Die Qualität einer geschweißten Konstruktion hängt natürlich weitgehend von der Güte der Werkstattarbeit ab. Zuerst müssen die einzelnen Elemente sorgfältig vorbereitet werden. Es ist vielleicht nicht unbedingt notwendig, die mechanische Bearbeitung vor dem Schweißen so weit zu treiben, wie es J. D. THOMPSON vorschlägt, aber Tatsache ist, daß saubere Schnitte und Anschrägungen die Arbeit beim Zusammenbau und Schweißen erleichtern und gleichzeitig die Gefahr von Porenbildungen verkleinern.

Die größten Anstrengungen müssen aber bei der Überwachung der eigentlichen Schweißarbeiten unternommen werden. Um dies zu erreichen, ist eine strenge Prüfung der Schweißer noch fast wichtiger als diejenige der Schweißungen. Die Kontrolle beginnt beim Schweißen, wobei auch das wurzelseitige Auskreuzen und Nachschweißen umfaßt werden muß. Es sei hier bemerkt, daß gewisse, zuerst unbedeutend scheinende Einzelheiten in Wirklichkeit für die Sicherheit entscheidend sein können; so kann das Zünden des Lichtbogens auf dem Werkstück eine Kerbe verursachen, welche bei sprödem Stahl schädlich ist. Diese Gefahr wird durch einen der Versuche von F. FALTUS unterstrichen.

Die Prüfung der fertigen Schweißnähte ist von ganz besonderer Bedeutung. Zuerst wird man die Abmessungen kontrollieren, welche mit den Angaben auf den Zeichnungen übereinstimmen müssen, und das äußere Aussehen der Schweißnähte beurteilen, welches einem geübten Auge viel verraten kann. Die wichtigsten Auskünfte wird man jedoch durch Röntgen, eventuell verbunden mit einer Kontrolle durch Ultraschall, erhalten. Es erlaubt die Schweißer zu erziehen und ihre Technik zu verbessern, was sich auch auf die nicht geprüften Werkstücke auswirkt.

Die destruktiven Prüfungen an Probestücken geben dagegen eher Anhaltspunkte über die Güte des Stahles und des Zusatzwerkstoffes und über ihre gegenseitige Verträglichkeit. Was die Belastungsproben (oder Druckproben) anbetrifft, so ist zu sagen, daß sie, obwohl sehr empfehlenswert, nur gewisse Fehler des Entwurfes und der Ausführung aufzeigen. Ihr Wert, welcher vorwiegend subjektiv und psychologisch ist, ist weit davon entfernt, absolut zu sein.

Erwähnen wir zum Schluß die Kontrolle der geometrischen Abmessungen der fertigen Stücke, welche zeigt, mit welcher Genauigkeit die Masse der Zeichnungen eingehalten wurden. J. D. THOMPSON behandelt die vorzusehenden Vorsichtsmaßregeln im einzelnen: Richten, vorgängiges Deformieren der Gurtungen, zusätzliche Überhöhungen, Ablängen usw.

Schlußfolgerungen

Wie alle Ingenieurbauten müssen die geschweißten Konstruktionen gleichzeitig Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsbedingungen erfüllen.

Was die Sicherheit anbelangt, so sind bei den geschweißten Bauwerken zwei Gesichtspunkte zu berücksichtigen; einerseits muß man sich gegen Sprödbrüche und andererseits gegen das Auftreten zu hoher Beanspruchungen schützen, welche ein Versagen des Bauwerkes herbeiführen können.

Die Frage der Sprödbruchanfälligkeit kann nur durch die Wahl eines geeigneten Stahles gelöst werden; dabei müssen auch die konstruktiven Gegebenheiten sowie der Einfluß der Herstellungsvorgänge berücksichtigt werden. Bemerken wir hier, daß es praktisch keinen Sinn hat, die zulässigen Spannungen zu vermindern; dies würde zu größeren Dicken führen und würde somit die Sprödbruchanfälligkeit nur vergrößern.

Der andere Gesichtspunkt der Sicherheit, d. h. derjenige, welcher sich auf die Beanspruchung infolge äußerer Lasten bezieht, ist den Ingenieuren vertrauter, denn er ist allen Konstruktionsarten gemeinsam. Ob es sich um einen plastischen oder um einen Ermüdungsbruch handelt, beide Male hängt die Festigkeit vor allem von den Betriebsspannungen und wenig oder gar nicht von den inneren Spannungen ab. Selbst bei geschweißten Konstruktionen ist es also im Prinzip gestattet, sobald einmal das Problem der Sprödbruchanfälligkeit gelöst ist, die Forderungen der Fabrikationskontrollen zu verringern und zu versuchen, die Auswirkung möglicher Fehler durch Begrenzung der zulässigen Spannungen auszugleichen. Man sieht indessen leicht ein, daß bei diesem Vorgehen die wirkliche Sicherheit des Bauwerkes stark vom Zufall abhängt. Ist dieses Vorgehen wenigstens *wirtschaftlich?* Wir glauben es nicht.

Im Vergleich zu den Einsparungen auf dem Werkstoff sind die durch strengere Forderungen entstehenden Mehrkosten in der Tat relativ bescheiden. Dies gilt sowohl für die Kosten der eigentlichen Kontrollen (Personal, Labor, Ausrüstung, Filme usw.) wie für eine etwaige Erhöhung der Arbeitsstunden infolge kleinerer Leistung. D. C. C. Dixon gibt hierzu interessante Angaben und betont, daß diese Verringerung der Leistung, welche bei der Einführung neuer Maßnahmen bedeutend sein kann, mit der Zeit bescheiden wird. In bestimmten Fällen ist es sogar möglich, daß durch die strengeren Kontrollen die Fabrikationszeiten verringert werden können; nach D. C. C. Dixon hatte das Konstruktionsbüro vorher die Tendenz, zu vorsichtig zu sein, indem es z. B. übertriebene Dicken und Längen der Schweißnähte vorschrieb. Bemerken wir noch, daß sich die Güteverbesserung in der gesamten Produktion bemerkbar macht: bei gegebener Organisation produziert eine Werkstätte eine bestimmte mittlere Qualität, unabhängig davon, welche Stücke wirklich geprüft werden.

Unserer Ansicht nach macht sich die Qualität auf die Dauer bezahlt, dies beweist die Erfahrung verschiedener Werkstätten. D. C. C. Dixon und Ch.

DUBAS betonen, daß die Diskrepanz, welche noch vor wenigen Jahren zwischen dem Großkesselbau und dem Stahlbau bestand, im Schwinden begriffen ist; die hohe Güte, welche für die Druckleitungen und die Druckkessel aus Sicherheitsgründen gefordert werden muß, hat ihre Vorteile auch im Gebiet des Brücken- und Hochbaues bewiesen.

b) Hochfeste Schrauben

Es ist nur wenig mehr als ein Jahrzehnt her, daß sich die Verwendung hochfester vorgespannter Schrauben (HV-Schrauben) in den Vereinigten Staaten auf das Gebiet des Brücken- und Hochbaues auszudehnen begann; in Europa ist ihre Anwendung noch jüngeren Datums. Es handelt sich also um ein verhältnismäßig neues Verbindungsmittel, welches zum erstenmal im Programm unserer Kongresse erscheint. Es sei aber festgehalten, daß die Maschinenfabrikanten seit langem Schrauben mit hoher Klemmkraft zur Aufnahme von Zugkräften und in bestimmten Einzelfällen zur Aufnahme von Scherkräften (vorgespannte Kupplungen) verwenden.

Auch im Stahlbau war der günstige Einfluß der Reibung auf das Verhalten der Verbindungen wohlbekannt, und man konnte grundsätzlich die Übertragung von Kräften durch Reibung allein, dank einer starken Quervorspannung, ins Auge fassen. Indessen bedurfte es jahrelanger Versuche zur Überwindung der Hauptschwierigkeit, d. h. der wirtschaftlichen Erzeugung einer überprüfbaren und dauerhaften Klemmwirkung, verbunden mit einer möglichst großen Reibung.

Dieses Problem scheint heute zum größten Teil gelöst; es wurden Vorschriften aufgestellt, und die HV-Schrauben haben ein bedeutendes und vielfältiges Anwendungsgebiet erobert. Mit Hilfe der vier vorliegenden Beiträge wollen wir versuchen, eine kurz gefaßte Übersicht unserer heutigen Kenntnisse zu geben; dabei sollen die wichtigsten Versuchsergebnisse und die Besonderheiten bei der Ausführung in Erinnerung gerufen werden.

Wirkungsweise der hochfesten Schrauben

Es ist allgemein bekannt, daß der Schaft der korrekt gesetzten Niete infolge der verhinderten Verkürzung bei der Abkühlung Zugspannungen ausgesetzt ist, welche die Streckgrenze übersteigen. Dadurch können gewisse Kräfte durch Reibung übertragen werden. Das Anziehen der gewöhnlichen Schrauben, seien es schwarze oder gedrehte, hat die gleiche Wirkung. Da aber die Streckgrenze der gewöhnlichen Niete und Schrauben relativ niedrig liegt, sind diese Klemmkräfte bescheiden. Ihr tatsächlicher Wert, welcher in der Praxis übrigens sehr schwer zu bestimmen ist, schwankt je nach Ausführung in sehr weiten Grenzen. Im Laufe der Zeit kann es sogar vorkommen, daß gewisse, dynamischen Beanspruchungen unterworfene Anschlüsse vollständig locker werden.

Bei den klassischen Verbindungen wäre es also unvorsichtig, die Reibung in die Berechnung einzuführen; vielmehr berücksichtigt man nur das Abscheren der Schäfte und die Lochleibung, d. h. die beiden Faktoren, welche nach der Überwindung der Reibung allein maßgebend sind.

Bei den HV-Verbindungen sind die Rollen vertauscht: die Klemm- und Reibungskräfte dienen als Bemessungsgrundlage, und die Gleitgrenze ist die maßgebende Größe zur Bestimmung der Sicherheit. Abscheren und Lochleibungsdruck dagegen spielen erst im Augenblick des Bruches eine Rolle. Um den Berechnungsannahmen Genüge zu leisten, muß demnach die Klemmkraft überprüfbar und dauerhaft sein und der Reibungskoeffizient einen bestimmten Mindestwert erreichen. Wir werden im folgenden sehen, wie man sich bemüht, diese notwendigen Bedingungen zu erfüllen.

Die hochfesten Schrauben können auch zur Übertragung von parallel zu ihren Achsen wirkenden Zugkräften herangezogen werden. Sie wirken dann grundsätzlich wie gewöhnliche Schrauben; ihre hohe Festigkeit und die beträchtliche Vorspannung verleihen ihnen aber gewisse Vorteile.

Form und Eigenschaften der hochfesten Schrauben

Da die Reibungskoeffizienten in den auf Reibung wirkenden Verbindungen wesentlich unter 1 liegen, müssen die hochfesten Schrauben, um gleiche oder größere Kräfte als die gewöhnlichen Niete oder Schrauben übertragen zu können, sehr stark vorgespannt werden. Wie es ihr Name andeutet, besitzen die HV-Schrauben sehr hohe mechanische Kennwerte. Je nach Land schwanken die vorgeschriebenen Werte für die Bruchfestigkeit zwischen 70 kg/mm² (B.S. 1083, R 45/55) und 120 kg/mm² (DIN 267, 12 K) und für die Streckgrenze zwischen 53 und 108 kg/mm². Der Gedanke liegt nahe, Schrauben mit sehr hoher Festigkeit zu verwenden; man darf aber nicht vergessen, daß ihre Bruchdehnung klein ist, was beim Einbau zu Schwierigkeiten führen kann.

Äußerlich unterscheidet sich eine HV-Schraube kaum von einer gewöhnlichen. Der Übergangsradius zwischen Schaft und Kopf wurde indessen vergrößert, weil die Erfahrung lehrte, daß sich dort ein schwacher Punkt befand. Zudem wird die HV-Schraube immer mit zwei Unterlagsscheiben verwendet: eine unter dem Kopf, die andere unter der Mutter. Diese Unterlagsscheiben sind aus gehärtetem Stahl; sie verteilen die Klemmkräfte und verhindern so zu große plastische Verformungen, welche sonst mit der Zeit eine spürbare Verminderung der Vorspannung verursachen würden. Besondere Vorsichtsmaßnahmen um ein Lösen der Muttern zu verhüten sind nicht notwendig. Der Durchmesser der Schraubenlöcher kann ohne weiteres größer sein als jener des Schaftes, weil die HV-Schrauben normalerweise weder auf Abscheren noch auf Lochleibung beansprucht werden; das Spiel beträgt im allgemeinen 1 bis 1½ mm; es erleichtert das Bohren und gestattet unter Umständen, auf das Aufreiben auf Montage zu verzichten.

Untersuchungen zur Bestimmung der Klemm- und Reibungskräfte

Zur Vervollkommnung des neuen gleitfesten Verbindungsmittels waren zahlreiche Versuche und vertiefte Studien notwendig. Nachdem die diesbezügliche Forschung in den USA begonnen und während Jahren vorangetrieben wurde, wurde sie auch in Europa, speziell in Deutschland, aufgenommen. Die Abhandlungen von P. S. A. BERRIDGE, von D. T. WRIGHT und E. M. LEWIS und von O. STEINHARDT berichten über die geschichtliche Entwicklung, so daß wir uns begnügen können, hier die wichtigsten Versuchsergebnisse wiederzugeben. Zuerst behandeln wir die Versuche zur Bestimmung der Klemm- und Reibungskräfte.

Erste Aufgabe ist das *Messen der erzielten Vorspannkraft.* Zu diesem Zweck hat man die Beziehung zwischen dem auf die Mutter ausgeübten Anziehmoment M_t, welches relativ leicht zu bestimmen ist, und der dadurch im Schaft erzeugten Klemmkraft P ermittelt. Diese Formel lautet:

$$M_t = k \times d \times P.$$

d bezeichnet den Nenndurchmesser der Schraube und k einen dimensionslosen Koeffizienten. Wie aus der Abhandlung von P. S. A. BERRIDGE hervorgeht, hängt dieser Koeffizient gleichzeitig vom Gewinde und den inneren Reibungsverhältnissen, d. h. vom Werkstoff, der Oberflächenbeschaffenheit, dem Grad der Schmierung und selbst von der Form des Gewindes und der Herstellungsmethode ab. Indessen ist die Streuung der Versuchswerte von k für genügend gefettete Schrauben vom gleichen Typ annehmbar: sie beträgt 5 bis 10%. Da die Messung des Anziehmomentes ebenfalls mit einem Fehler behaftet ist, welcher bis 10% erreichen kann, wird man die wirkliche Vorspannung nie sehr genau kennen, wodurch sich eine gewisse Unsicherheit ergibt. Es gibt wohl Kontrolleinrichtungen, welche das richtige Einstellen der verwendeten Anziehschlüssel dadurch erlauben, daß man die Spannung einer Eichschraube mißt. Damit kann man einen Teil der Fehlerquellen eliminieren. Dennoch wäre es nützlich, ein einfaches Gerät zur direkten und genauen Messung der effektiven Klemmkräfte in den angezogenen Schrauben zu besitzen.

Man kann übrigens dieser Schwierigkeit ausweichen, indem man die genaue Messung der Kraft durch ein ungefähres Abschätzen der Dehnung ersetzt. Dies ist das Prinzip der sogenannten „part-torque part-turn"-Methode, welche von P. S. A. BERRIDGE und von D. T. WRIGHT und E. M. LEWIS erwähnt wird. Die Schraube wird zuerst bis zum „handfesten" Sitz angezogen, d. h. bis zu einem Wert zwischen $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ der Nennkraft. Anschließend dreht man die Mutter mit Hilfe eines Luftdruckschlüssels um $\frac{1}{2}$ bis 1 Drehung, was im Schaft höhere Spannungen als die konventionelle Streckgrenze (0,2%) erzeugt. Wie aus dem Diagramm in der Abhandlung von D. T. WRIGHT und E. M. LEWIS hervorgeht, hängen diese Spannungen infolge des plastischen Verhaltens des Stahls nur sehr wenig von der anfänglichen Vorspannnung beim „handfesten"

Sitz ab. Um den Bruch hervorzurufen, brauchte es noch 1 bis 2 zusätzliche Schraubendrehungen; die Sicherheitsmarge gegen Montageungenauigkeiten scheint somit groß genug.

Diese Vorspannmethode durch „Mutterdrehen" (turn of the nut), wird vor allem in den angelsächsischen Ländern angewendet. Sie besticht auf den ersten Blick, weil sie ohne teure Ausrüstung kräftige und relativ genaue Klemmspannungen ergibt. Eine Vorspannung, welche die Streckgrenze übersteigt, könnte indessen einen unangenehmen Einfluß auf die Sicherheit der Verbindung haben. Es ist zwar richtig, daß die warm geschlagenen Niete gleichartig beansprucht werden, aber sie sind weicher als die HV-Schrauben und besitzen eine wesentlich größere plastische Reserve. Was die Wirkung der Relaxation betrifft, so ist es unwahrscheinlich, daß sie sich auf die Dauer nicht als gefährlich erweist. Wie von D. T. WRIGHT und E. M. LEWIS bemerkt wird, scheint Vorsicht vor allem bei Verbindungen mit zur Schraubenachse parallelen Kräften angezeigt.

Um die Frage der zulässigen Vorspannung aufzuklären, scheinen somit weitergehende Forschungen notwendig; dabei ist der Einfluß der Relaxation oder des Kriechens zu berücksichtigen.

Die Scherkraft, welche eine HV-Schraube übertragen kann, hängt nicht nur von der Größe der Klemmspannung, sondern auch vom Reibungskoeffizienten der Berührungsflächen ab. In den Vereinigten Staaten hatte man am Anfang diesen Gesichtspunkt zu wenig beachtet. Das Ziel der Versuche war in der Tat sehr begrenzt: es galt nur zu bestimmen, unter welchen Voraussetzungen ein Niet durch eine entsprechende HV-Schraube ersetzt werden kann. Da die zulässigen Scherspannungen für Niete in den Vereinigten Staaten klein sind, genügt ein Reibungskoeffizient von 0,25 bis 0,30, vorausgesetzt, daß die Vorspannung 5 t/cm² beträgt. Reibungen dieser Größenordnung werden ohne weiteres erreicht, falls die Oberflächen sauber und frei von Öl, Farbe usw. sind.

In Deutschland dagegen hat man von Anfang an der Frage der Reibung besondere Aufmerksamkeit gewidmet, und man hat versucht, den Reibungskoeffizienten durch eine geeignete Oberflächenbehandlung zu erhöhen. Nach Angaben von O. STEINHARDT ergibt das Sand- oder Flammstrahlen die besten Ergebnisse, d. h. einen Mindestwert von 0,45 für St. 37 und von 0,60 für St. 52. Für St. 37 werden diese Werte durch Versuche aus andern Ländern bestätigt.

Forschung in bezug auf die Festigkeit der Verbindungen

Zuerst betrachten wir die Verbindungen mit *senkrecht zur Schraubenachse* wirkenden Scherkräften, die durch Reibung praktisch ohne irgendwelche gegenseitige Verschiebung der Berührungsflächen übertragen werden. Die Verbindung ist also sehr starr und die Verteilung der Kräfte auf die verschiedenen

Schrauben wird alles andere als gleichmäßig sein: die äußersten Schrauben werden praktisch die ganze Kraft aufnehmen, während die andern unbeansprucht bleiben. Sobald die Reibungslast der ersten Schraube überschritten wird, wird die zweite zu tragen beginnen und so fort, bis die aufgebrachte Kraft mit den Reibungskräften der Schrauben im Gleichgewicht sein wird. Jetzt wird sich die Verbindung als Ganzes in Bewegung setzen und wird erst wieder zum Stillstand kommen, wenn der Lochrand am Schraubenschaft anliegt: man hat die kritische Gleitgrenze erreicht, deren Größe maßgebend ist für die Reibungsverbindung. Für eine größere Kraft wird sich die Wirkungsweise der HV-Schrauben derjenigen der gewöhnlichen Niete und Schrauben angleichen, und der *statische* Bruch wird grundsätzlich dem der klassischen Verbindungen gleichen; insbesondere wird die Bruchlast, welche im allgemeinen bedeutend höher liegt als die Gleitlast, weder von der ursprünglichen Vorspannung noch vom Zustand der Berührungsflächen abhängen.

Man weiß, daß die Festigkeit der auf *Ermüdung* beanspruchten Bauteile von der unvermeidlichen Spannungskonzentration in Unstetigkeitsstellen, Löchern und Kerben jeder Art abhängt. Bei den HV-Verbindungen werden die Scherkräfte durch Reibung der Berührungsflächen übertragen, was die Spannungsspitzen beträchtlich vermindert. Die Ermüdungsfestigkeit wird demnach größer sein als diejenige von gelochten Probestäben oder von genieteten Verbindungen. In der Großzahl der Versuche traten die Brüche im vollen Querschnitt auf.

Wie schon bemerkt, ist bei einer starren Verbindung — wie z. B. bei der gleitfesten Verbindung — die Kraftverteilung in der Längsrichtung durch eine Konzentration an den beiden Enden charakterisiert. Was die dynamischen Beanspruchungen betrifft, so kann man sich fragen, ob sich ein Ausgleich der Schraubenkräfte durch kleine „Setzungsrutschungen" wie bei einer statischen Beanspruchung einstellen kann. Der Einfluß dieser Verschiebungen auf den Wert der Reibung wäre übrigens zu untersuchen, da kürzlich in Ostdeutschland durchgeführte Versuche ein starkes Abfallen der Reibung bei Verbindungen zeigten, welche eine Reihe von Gleitverschiebungen erlitten hatten. Es wäre auch empfehlenswert, die Untersuchungen auf das für die Praxis so wichtige Gebiet der in mäßiger Zahl wiederholten Belastungen auszudehnen, damit der Zusammenhang mit den statischen Versuchen gefunden werden kann.

Die Verbindungen, bei welchen die Kräfte *parallel zur Schraubenachse* wirken, sind noch wenig erforscht. Als Folge der Vorspannung erzeugen die äußeren Zugkräfte nur eine schwache Erhöhung der Schraubenspannung, solange die Verbindung nicht klafft. Darauf ergibt sich eine bedeutende Verringerung der Formänderungen des Anschlusses und eine nennenswerte Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit. Die Forschung wird auf diesem Gebiet energisch vorangetrieben, und man wird sicher in kurzer Zeit interessante Ergebnisse erhalten.

Vorschriften

Wir beschränken uns hier auf die Bemerkung, daß sich die gegenwärtigen amerikanischen Vorschriften — wie die Versuche, die sie aufzustellen erlaubten — auf das Ersetzen von Nieten durch HV-Schrauben beziehen, während die deutschen Normen die HV-Schrauben als ein prinzipiell neues Verbindungsmittel betrachten. Diese Betrachtungsweise scheint uns angezeigter, und sie beginnt sich auch in den Vereinigten Staaten durchzusetzen.

Die Sicherheit der HV-Verbindung wird man im Verhältnis zur Gleitlast bestimmen. Für Elemente, welche statischen Beanspruchungen unterworfen sind, wird man die Reserve bis zur Bruchlast berücksichtigen können. Dabei darf aber nicht außer acht gelassen werden, daß die Gleitwege der HV-Verbindungen infolge des Spiels in den Löchern bedeutend sind und daß die Gesamtverformung der Bauwerke infolge dieser Verschiebungen in bestimmten Fällen unzulässig sein kann.

Ausführung und Ausrüstung

Um die Berechnungsannahmen zu erfüllen, ist es unerläßlich, daß die angenommenen Reibungskräfte auch wirklich erreicht werden; die Klemmkraft und der Reibungskoeffizient müssen also während der Montage sorgfältig geprüft werden.

Um eine bestimmte Vorspannung zu erzeugen, kann man, wie wir gesehen haben, entweder das Anziehmoment messen oder die Mutter um einen bestimmten Winkel drehen. Das erste Verfahren wurde von Anfang an angewendet; es ist immer noch sehr verbreitet und ist auf dem europäischen Kontinent das einzige statthafte. In seiner Abhandlung beschreibt P. S. A. Berridge im einzelnen die verschiedenen verwendeten Schlüssel, seien es Drehmomenten- oder Druckluftschlüssel. Erwähnt seien auch die neuen „Self-Reactor"-Schrauben: Die Reaktion des auf die Mutter angewendeten Drehmomentes wird auf eine Verlängerung des Schraubenschaftes übertragen, wodurch der Arbeiter entlastet wird. Durch eine kalibrierte Kerbe zwischen dem Schaft und seiner Verlängerung erhält man eine geschwächte Zone, welche auf Torsion bricht, sobald man ein bestimmtes Moment erreicht, welches von der tatsächlichen Festigkeit der Schraube abhängt. Die Kontrolle wird also durch die Schraube selbst ausgeübt; sie trägt den Namen „Torshear".

Nach Angaben von O. Steinhardt ist die Größe des Reibungskoeffizienten auf der Baustelle ebenfalls meßbar.

Die Reihenfolge, in welcher man die Schrauben anzieht, muß mit Sorgfalt festgelegt werden. Andernfalls kann es vorkommen, daß die zuerst angezogenen Schrauben zum Schluß die gewünschte Klemmkraft nicht mehr besitzen.

Anwendung der hochfesten Schrauben

Die Abhandlung von P. S. A. BERRIDGE, welche zahlreiche Anwendungen der HV-Schrauben auf dem Netz der „British Railways" beschreibt, zeigt klar die Vielfalt der Möglichkeiten.

Einer speziellen Anwendungsart ist die Abhandlung von K. SATTLER gewidmet. Es handelt sich um die Verbindung von Betonplatte und Stahlträger bei Verbundkonstruktionen. Nach den Versuchen, welche von K. SATTLER beschrieben werden, ist es unter Beachtung gewisser Vorsichtsmaßnahmen möglich, die stets kostspieligen Dübel durch HV-Schrauben zu ersetzen, welche die Platte kräftig gegen den Obergurt pressen. Die Scherkräfte werden durch Reibung mit einem Koeffizienten von ca. 0,45 übertragen. Die statische Bruchlast liegt wesentlich höher als die Last, welche das Gleiten auslöst. Zusätzliche Versuche sind noch nötig, um das Verhalten bei Ermüdung dieser Verbindungen zu bestimmen.

Wie jedes Verbindungsmittel haben auch die HV-Schrauben charakteristische Eigenschaften, welche den Entwurf der Verbindungen und selbst der Bauwerke stark beeinflussen. Es zeichnet sich eine ähnliche Entwicklung wie bei der Schweißung ab, wenn auch in viel beschränkterem Maße, und die HV-Verbindungen erhalten ihre eigenen, von der Nietung abweichenden Ausbildungsformen. Im besonderen sei darauf hingewiesen, daß die große Starrheit der gleitfesten Verbindungen und die dadurch bedingte Konzentration der Kräfte in den Enden so kurze Anschlüsse wie möglich erfordern. Man wird ebenfalls die Verteilung der Kräfte in der Längsrichtung zu verbessern suchen, sei es durch eine besondere Ausbildung der Knotenbleche oder sei es durch Übertragung des Eigengewichts durch die inneren Schrauben allein.

Sprechen wir zum Schluß noch von den wirtschaftlichen Vorteilen, die man durch die Anwendung von HV-Schrauben erreichen kann. Im Augenblick sind die HV-Schrauben selbst teurer als die Niete. Indessen kann durch die einfachere Vorbereitung der Anschlußelemente in der Werkstätte sowie vor allem durch den schnelleren und weniger lärmigen Einbau mit einer kleinen Mannschaft und mäßigem Werkzeugbedarf auf der Montage der Unterschied mehr oder weniger ausgeglichen werden. So sind in den Ländern mit hohen Lohnkosten, wie z. B. in den Vereinigten Staaten, die Montageniete fast gänzlich verschwunden. Übrigens, so paradox es scheinen mag, hat die Schweißung der Ausbreitung der HV-Schrauben Vorschub geleistet, indem sie durch ihre Entwicklung den Mangel an qualifizierten Nietern verursachte.

Schlußfolgerungen

Mit den HV-Schrauben verfügt der Konstrukteur über ein neues Verbindungsmittel mit sehr interessanten Eigenschaften. Wir haben seine technischen und wirtschaftlichen Vorzüge kurz zusammengefaßt und dabei auf die Lücken

unserer Kenntnisse und auf die Schwierigkeiten hingewiesen, die mit einer korrekten Ausführung verbunden sind.

Unserer Meinung nach ist eine gewisse Vorsicht bei der Anwendung der HV-Schrauben noch am Platz. Es ist in der Tat nicht ausgeschlossen, daß sich im Laufe der Zeit die Klemmkräfte (Relaxation) und selbst die Reibungskoeffizienten mehr ändern werden, als es die Ergebnisse der bis jetzt durchgeführten relativ kurzfristigen Versuche vermuten lassen. Dieses Problem ist von höchster Bedeutung für auf Ermüden beanspruchte Verbindungen, bei denen die Tragfähigkeitsreserve zwischen Gleit- und Bruchlast sehr bescheiden ist.

General Report

a) Welding

Research on welding has become so extensive in recent years, that it is quite impossible to give even a brief outline in this report. We shall therefore merely discuss the problems dealt with in the six papers submitted and which are of particular interest to engineers concerned with bridges and structural engineering.

Effect of Longitudinal Stresses in Fillet Welds

The first paper by M. FALTUS is mainly an experimental study of the effect of longitudinal stresses in fillet welds, subjected principally to shear forces. It will be recollected that this problem formed the subject of a paper read by MM. WÄSTLUND and ÖSTLUND at the Lisbon Congress.

The tests described by M. FALTUS were carried out on test pieces consisting of two wedges joined by welding along their edges, inclined at 1 : 10. With this arrangement, the longitudinal stresses should be practically constant and the shear forces uniformly distributed. This test would thus make it possible, in principle, to eliminate the effects of plastic equalisation of the shear strains and hence reveal more clearly the effect of the longitudinal stresses in the weld. The scatter over the values of the comparative stress, calculated in accordance with the criterion of constant energy of distorsion, is undoubtedly quite considerable, but this is readily explicable if it is borne in mind that this theory relates to yielding and not to rupture. The experimental results, however, clearly show that the longitudinal stresses reduce the shear strength of the fillet welds to an appreciable extent.

Brittle Fracture

There is certainly no need to recall, in this report, the fractures which have occurred in certain welded structures, particularly bridges, ships and penstocks. Although the number of serious accidents is comparatively small in relation