

Bruch durch Wasserstoff – Kaltrissigkeit

Unternahtrisse

Martin Möser, Schweißtechnik (Berlin) 35 (1985) S. 45-47

0. Einleitung

Die Orientierung der durch den Schweiß-Wasserstoff erzeugten Risse an der Naht wird im Bild 1 schematisch dargestellt: Die Rissbildung ist vorwiegend auf die Wärmeeinflusszone beschränkt, und dort ist offensichtlich die eigentliche Schwachstelle durch die Grobkornzone als maximal aufgehärteter Bereich gegeben.

Die im Bild 1 vorgenommene Unterteilung der Risslagen soll im Folgenden etwas vereinfacht werden, indem nur nach Unternaht- und Nebennahttrissen unterschieden wird, wobei als Bezug die Walzebene dient; Unternahttrisse liegen mehr parallel dazu, Nebennahttrisse mehr senkrecht. Erstere stellen sich ein, wenn die Schrumpfung senkrecht zur Grundplatte erfolgt. Sie finden sich demnach unter Kehlnähten und damit im Wesentlichen an T- und Kreuzstößen. Für Stumpfstöße (-nähte) bei denen die Schrumpfung in der Platte selbst anliegt, sind Nebennahttrisse typisch. Nach dieser Einteilung wäre der Kerbriss im linken Teilbild als Unternahttriss zu betrachten. Das gilt auch für den Wurzelriss, sofern man die Walzrichtung in dieser Platte als senkrecht zur Grundplatte verlaufend annimmt; anderenfalls wäre es ein Nebennahttriss. Was im rechten Teilbild als Unternahttriss bezeichnet wird, kann wegen der mehr senkrechten Lage zur Walzebene eher als Nebennahttriss angesehen werden.

Nach eigenen Erfahrungen sind Unternahttrisse das Hauptproblem. Gelegentlich finden sich auch Risse in der Naht selbst und zwar sowohl als Längsriss wie auch als Querriss.

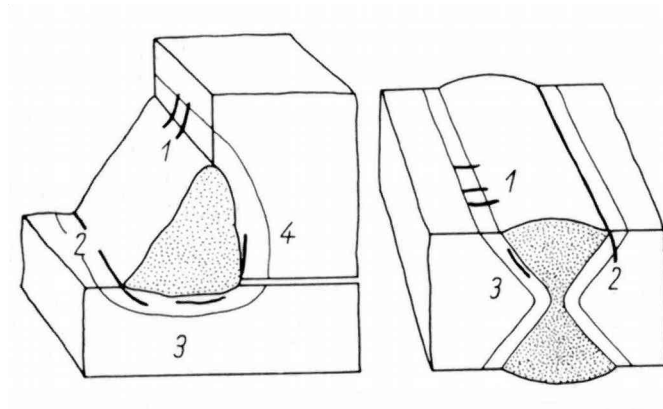


Bild 1:
Wasserstoffrisse an
Kehl- und
Stumpfnähten [1]
1 Querriss
2 Kerbriss
3 Unternahttriss
4 Wurzelriss

1. Beispiele für Unternahtrisse

Fall A

Die im Bild 2 gezeigte, von Rissen durchsetzte bzw. unterfahrene Kehlnaht, entstammt einem Behälter, dessen Havarie in [2] kurz beschrieben wurde (Deckelabriss nach der Druckprobe). Ein Zusammenhang mit der Havarie konnte jedoch nicht hergestellt werden. In mehreren Lagen war geschweißt worden, der Unternahttriss ist jedoch auf eine der ersten beschränkt. Er scheint aus vielen Einzelanrissen zu bestehen, die terrassenartig aneinander gefügt sind. Die Einzelanrisse liegen in der Walzebene, geführt wird aber der Riss als Ganzes durch die Schmelzlinie, genauer durch die Grobkornzone als Bereich maximaler Aufhärtung. Im Prinzip handelt es sich um einen Parallellfall zur Lamellarrissigkeit (Lamellar- bzw. Terrassenbruch): Für Baustähle ist ein Gehalt an Schwefel von 0,04 Prozent zugelassen. In der Schmelze bindet sich Schwefel mit Eisen und dem eigens dafür zugegebenen Mangan (Schmelzpunkterhöhung) als entsprechendes Sulfid ab. Stahl wird allgemein mit Aluminium desoxidiert (beruhigt), woraus sich außer der Kornfeinung noch als weiterer Nebeneffekt ergibt, dass sich das Sulfid nicht globular wie bei der Beruhigung mit Silizium, sondern lamellar abscheidet. Ort der Abscheidung sind die Korngrenzflächen. Beim Walzen werden die Sulfidlamellen noch etwas verstreckt, vor allem aber parallel zur Walzebene ausgerichtet.

Bricht man einen Unternahttriss auf – meist genügt schon ein Hammerschlag – erhält man für den Restquerschnitt Lamellarbruch. Betrachtet man diesen im Rasterelektronenmikroskop, ergibt sich der Eindruck, als bestünde der Stahl vorwiegend aus Einschlüssen (Bild 3), wobei es sich nicht nur um Sulfide, sondern auch um Eisenoxid handelt. Die Matrix wird nur in Form von Zwischen-

stegen bzw. Scherstufen sichtbar. Deren Wabenstruktur beweist, dass der Stahl an sich duktil (fließfähig) ist. Dieses kommt jedoch wegen der Einschlüsse makroskopisch nicht zum Tragen, und deshalb ist der Stahl den Schrumpfdehnungen, die sich unter T- und Kreuzstößen in Dickenrichtung einstellen, oft nicht gewachsen. Während also das Fließvermögen in Dickenrichtung insgesamt sehr abgemindert ist, kann die Festigkeit – wenn man das gesamte Bauteil bzw. größere Flächenanteile betrachtet – über die nun auf Scherung beanspruchten Ligamente durchaus gehalten werden; lokal kann die Festigkeit jedoch sehr niedrig sein. Erfahrungsgemäß liegen die echten Lamellarrisse nicht in der meist aufgehärteten und damit auch festeren Wärmeinflusszone, sondern im unbeeinflussten Grundwerkstoff (Bild 4 bzw. [4 bis 7]). So kann man an der Risslage im Schliiff erkennen, ob Wasserstoffbruch vorliegt oder Lamellarbruch (als Sonderform des Fließbruchs).

Nachdem im vorliegenden Fall die Risse aufgebrochen worden waren, wurde die Bruchfläche mit inhibierter Salzsäure von ihrer Zunderschicht befreit. Darunter kam ein sehr gut erhaltenes Bruchgefüge zum Vorschein, wie im Bild 5 zu sehen ist. Es hat sich genauso transkristallin und feinfacettiert ausgebildet, wie in [8] für Fischaugen beschrieben. Anstelle von Schlackenhohlräumen, Kaltstellen und Poren sind hier die Einschlüsse bzw. die sich durch sie ergebenden Hohlräume als Wasserstoffspeicher und damit als Riss-Starter wirksam geworden; die Fischaugenbildung ist auf mikroskopischem Niveau abgelaufen.

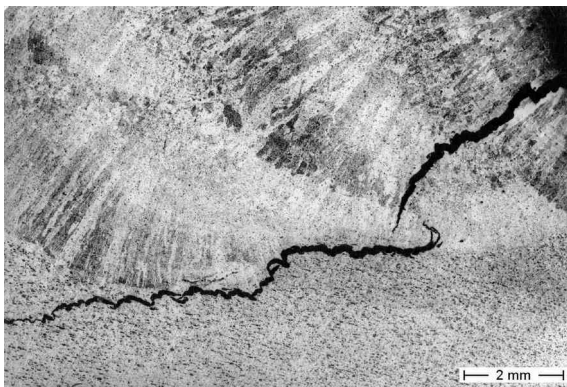


Bild 2. Rissbehaftete Kehlnaht [3], Stahl H 60: Der Nahtriss orientiert sich am Stengelkorn, der Unternahtriss an den Einschlüssen

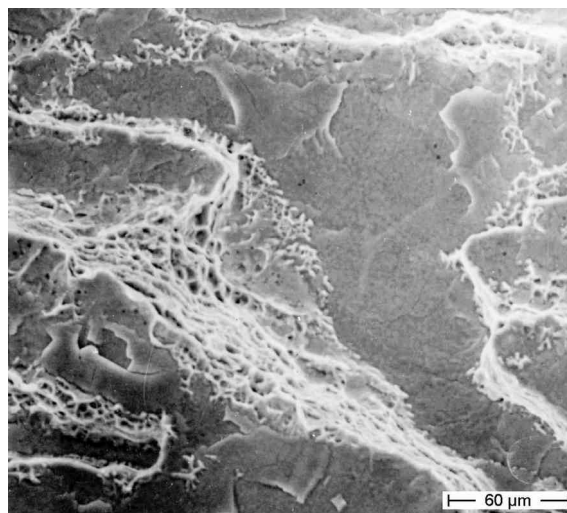


Bild 3. Lamellarbruch: flache Einschlüsse, dazwischen Wabenstruktur-

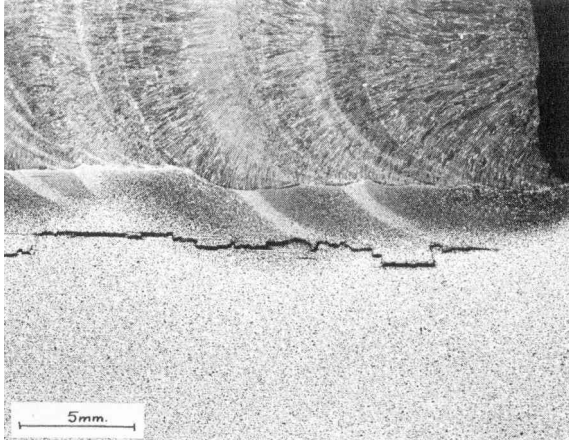


Bild 4. Lamellarrisse liegen außerhalb der Wärmeeinflusszone [4]

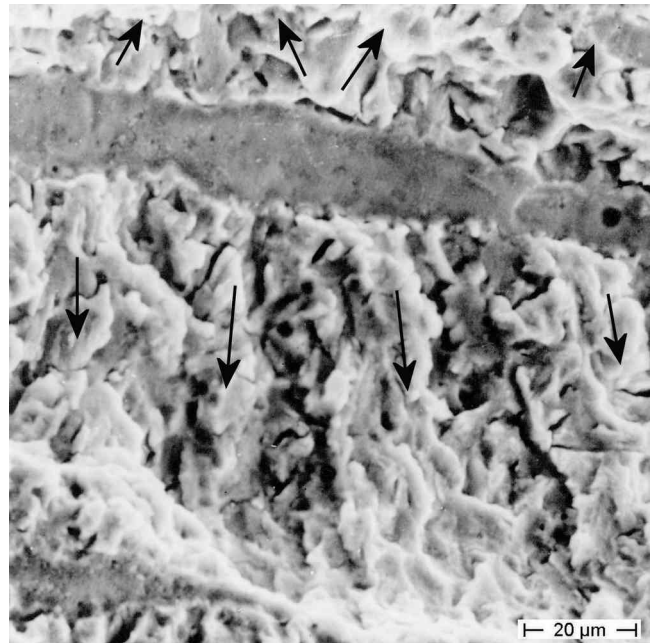


Bild 5. Aufgebrochener Unternaht mit feinfacettiertem Bruchgefüge

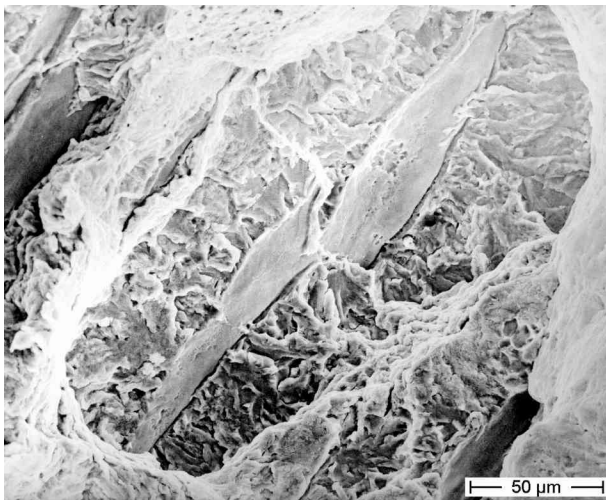


Bild 6. Kreuzformprobe: Minifischaug

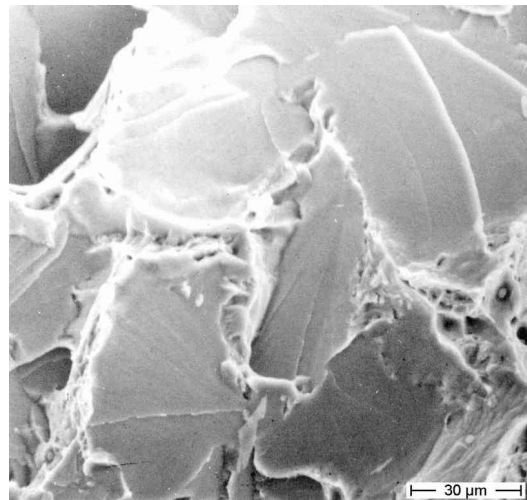


Bild 7. Transkristalliner Sprödbbruch mit Spaltflächen (H 60)

Die mikroskopischen Fischaugen unterscheiden sich von den makroskopischen dadurch, dass sie nicht von einer Gewaltbruchzone umgeben sind, vielmehr reihen sie sich lückenlos aneinander. Außerdem sind diese „Minifischaugen“ meist unsymmetrisch ausgebildet. Das liegt weniger daran, dass die Abstände der Einschlüsse verschieden groß sind, sondern ergibt sich mehr daraus, dass die Speicher besonders dann aufgefüllt werden, wenn sie von dem Spannungsfeld bzw. der

Verspannungszone des Hauptrisses erfasst werden. Damit wird offenbar eine Diffusionssperre aufgehoben, die darauf zurückzuführen ist, dass sich zunächst mit steigendem Innendruck um den Speicher radial eine Druckspannungskomponente aufbaut. Die einzelnen Risse entstehen also bevorzugt unmittelbar vor dem Hauptriss und vereinigen sich mit diesem relativ schnell. An etwas außerhalb der Bruchebene liegenden Speichern bilden sich die (Mini-)Fischaugen dagegen symmetrisch aus, wie das im Bild 6 gezeigte, das bei einer Kreuzformprobe gefunden wurde. Um einen Vergleich zwischen transkristallinem Wasserstoffbruch und dem entsprechenden „normalen“ Sprödbbruch zu haben, zeigt Bild 7 das Bruchgefüge des letzteren (Kerbschlagprobe): Die Körner werden entlang der $\{100\}$ -Ebene aufgetrennt, was charakteristische Spaltflächen, oft von Ferritkorngröße, hinterlässt [9].

Nach Bild 2 unterfährt der Unternahrtriss die Lage, die am tiefsten in die Grundplatte eingreift und die man deshalb als die eigentliche Wurzel ansehen könnte. In diese schwenkt der Riss sogar etwas ein. Vor diesem Schwenk, im rechten Drittel, klafft er ziemlich stark. Daraus lässt sich schließen, dass der Riss beim Schweißen der Folgelage nicht nur schon vorhanden war, sondern dass er auch bis zur Oberfläche durchgetreten ist. Die Folgelage hat ihn zugedeckt, außerdem wurde er durch den neu eindringenden Wasserstoff in den nun zur Wärmeeinflusszone gehörenden Bereich der Wurzelnaht vorgetrieben.

Einer Sichtprüfung ist dieser Unternahrtriss also nicht zugänglich gewesen. Von dem Nahtriss kann man das allerdings nicht sagen.

Fall B

Ein Stützbock (Tagebau) aus H52 knickte bei der ersten Belastung zusammen. Die Makroaufnahme der Bruchfläche (Bild 8a) zeigt zum einen die Lamellenstruktur und zum andern, dass die Kehlnaht von einem Riss (dunkler Bereich) unterfahren war, der nicht bis zur Oberfläche durchgetreten ist. Hier waren die feinen Bruchstrukturen allerdings weggezündert.

Im Restbruch ließ sich kaum (metallische) Matrix finden. Der Schliff (Bild 8b) zeigt die für Wasserstoffbruch typische Risslage.

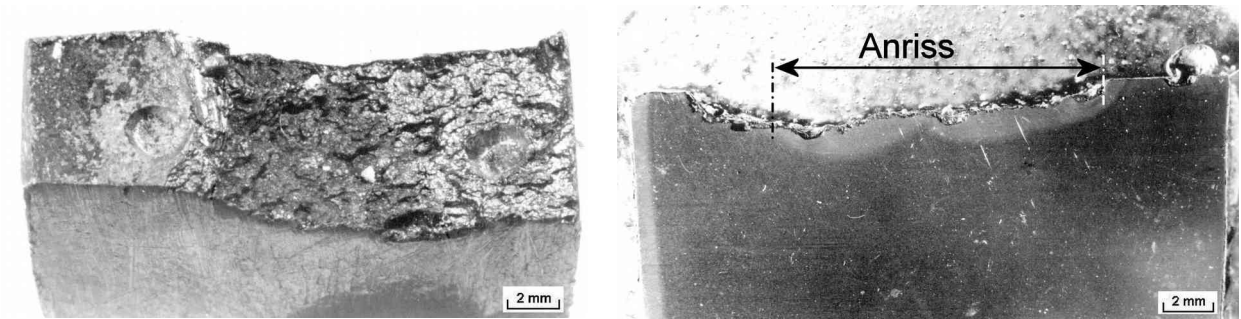


Bild 8. Stützbock: gebrochener T-Stoß

a) Makroaufnahme der Bruchfläche: kleinerer Anriss als dunkle Zone

b) Bruchstelle im Makroschliff [10], Anriss hier fast durchgehend

Fall C

Nach der Havarie eines Tagebau-Großgeräts aus H52 hatte man zum Versteifen Bleche aufgeschweißt, die man später durch Schneidbrennen wieder entfernte. Beim Abschleifen der Nahtreste traten Risse zutage, von denen man zunächst vermutete, es seien Ermüdungsrisse. Dagegen sprach aber schon die Lamellenstruktur der Bruchflächen, d.h., es konnte nur Lamellar- oder Wasserstoffbruch sein, denn beide sind, wie gezeigt, „einschluss-sensibel“. Dagegen wird ein Ermüdungsriss streng in der Normalspannungsebene geführt, weshalb sein Verlauf kaum durch Einschlüsse oder andere Gefügebesonderheiten beeinflusst wird.

Bild 9 zeigt die Lage des Risses im Schliff; der Riss hat die gesamte Wärmeeinflusszone durchlaufen. Die mikroskopischen Bruchstrukturen waren noch einigermaßen erhalten, die Minifischaugen konnten eindeutig als solche erkannt werden.

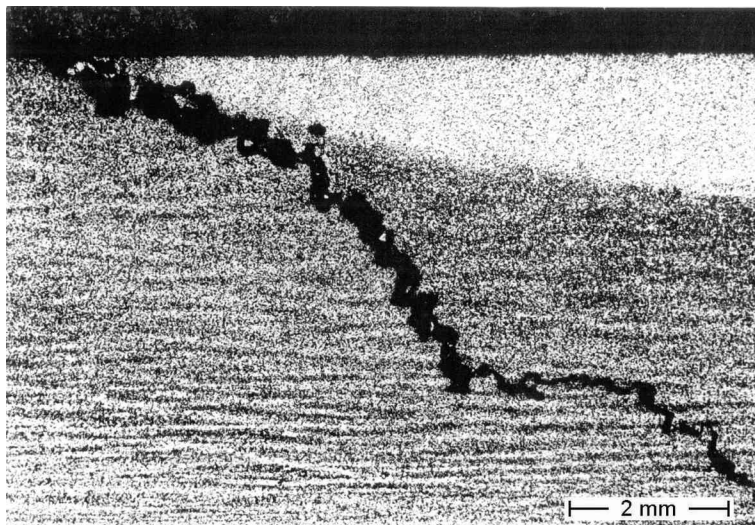


Bild 9.

Riss unter abgeschliffener Kehlnaht [10]

Fall D

Von der Kehlnaht einer Mannlochverstärkung geht ein Unternahriss aus, der sich als Lamellarriss weit in die Grundplatte fortsetzt (Bild 10).

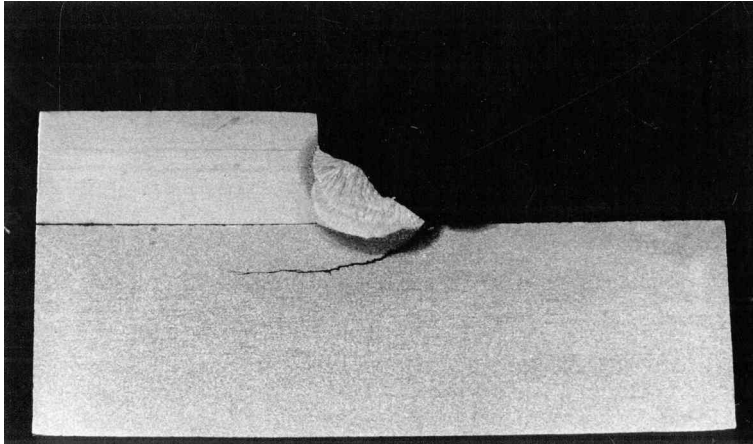


Bild 10
Ein Unter-nahttriss setzt sich als
Lamellarriss fort [3]

Fall E

Bild 11 zeigt eine Stutzeinschweißung aus H52. Stutzenseitig ist die Wurzellage durch einen Riss unterfahren worden. Die Schmelzlinie verläuft parallel zur Walzebene bzw. zu den Einschlüssen, so dass durch die dort ablaufende Fischaugenbildung der Riss nicht von der Schmelzlinie abgelenkt wurde, sondern in deren unmittelbarer Nähe verbleiben konnte. Die beiden „günstigen“ Bruchpfade Grobkornzone und Walzebene haben sich also überlagert.

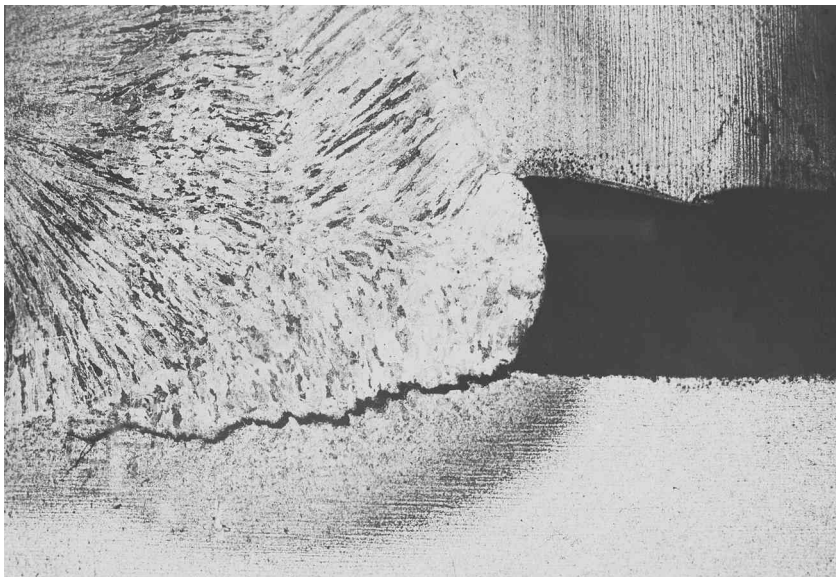


Bild 11
Stutzenseitiger Unter-nahttriss mit
starker Bindung an die
Schmelzlinie [3]

In den 5 Beispielen für Unternahttrisse war es durch diese Risse nur einmal, gewissermaßen bei der Probelastung, zum Schaden gekommen, wobei die extrem hohe Einschlussdichte sicherlich ausschlaggebend war. In den anderen Fällen wurden sie zufällig oder bei Inspektionen gefunden. Die Risse beschränken sich, so weit sich das erkennen ließ, fast ausschließlich auf die Wurzellage, so dass beim Mehrlagenschweißen gewöhnlich

- genügend tragender Querschnitt verbleibt, vorausgesetzt, der Lamellencharakter des Stahls ist nicht ausgeprägt
- korrosive bzw. wasserstofftragende Medien nicht eindringen können.

Daraus ergibt sich eine gewisse Harmlosigkeit, sofern eine im Wesentlichen statische Beanspruchung vorliegt. Bei Wechselbeanspruchung können jedoch solche Risse, selbst wenn sie an nur untergeordneten Nähten auftreten, katastrophale Folgen haben, wie folgendes Beispiel [11] zeigt:

Bohrinsel „Alexander L. Kielland“

Diese Bohrinsel war 1976 in Dünkirchen (Frankreich) als Halbtaucher gebaut worden und wurde in der Nordsee als Unterkunft eingesetzt. Am Abend des 27. März 1980, in schwerer See, brach eine ihrer 5 Schwimmersäulen. Die Insel kippte zur Seite und kenterte nach 20 Minuten. Dabei fanden 123 Menschen den Tod. Dem Bruch der Schwimmersäule vorausgegangen war der Bruch einer Horizontalstrebe, bei der es sich um ein Rohr mit 2,60 m Dmr. und 25 mm Wanddicke handelte. Dieses Rohr war über 2 Drittel seines Umfangs durch Ermüdungsbruch aufgetrennt worden, der seinen Ausgang beidseitig eines kleinen eingeschweißten Stützens genommen hatte.

Den Nahtbereich dieses Stützens zeigt Bild 12. Die Kehlnaht wird auf der Stützensseite fast vollständig von einem Riss unterfahren, der wieder von der Wurzellage ausgegangen sein dürfte, denn dort liegt er der Schmelzlinie am nächsten. Wie im Fall E verläuft die Schmelzlinie fast parallel zur Walzebene; die Naht greift kaum in den Stützen ein. Auffällig war die hohe Einschlussdichte. Sie betrug bis zu 0,3 Prozent bei einem Schwefelgehalt von 0,02 Prozent, d. h., es muss viele Oxideinschlüsse gegeben haben. Näheres zur Havarie findet sich auch in [12, 13].

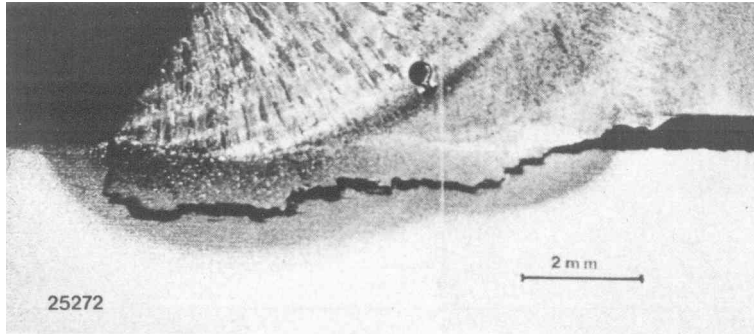


Bild 12
Bohrinsel: Stutzensseitiger Unternahtriss
[12, 13]

2. Zusammenfassung

Durch den beim Schweißen eingebrachten Wasserstoff sind bei den höherfesten Baustählen vor allem die Kehlnähte bzw. deren Wurzellagen gefährdet; es bilden sich Unternahtrisse. Die Rissbildung läuft nicht anders ab als bei (Makro-)Fischaugen. Der Wasserstoff sammelt sich molekular und unter Druck an Einschlüssen und bringt in Überlagerung mit der Außenlast die Speicherwände zum Fließen. Durch Tribosorption gelangt der Wasserstoff dann atomar in die Gleitbänder, wo er nach erneuter Rekombination die Gleitung blockiert.

Literatur

- [1] Coe, F.: Welding steels without hydrogen cracking. (Schweißen ohne Wasserstoffbruch). Abington 1973: The Welding Institute.
- [2] Möser, M.: Zur Wasserstoffrissigkeit nach dem Schweißen. ZIS-Mitt., Halle (S.) 25 (1983) 3, S. 261-268.
- [3] Berichte des Staatlichen Amtes für Technische Überwachung.
- [4] Farrar, J. C. M.: Some applications of the SEM with reference to cracking problems in welded steels. (Anwendung des Rasterelektronenmikroskops auf Probleme der Rissbildung an geschweißten Stählen). Proc. 3. Annual Scanning Electron Microscope Symposium, Chicago 1970, S. 289-296.
- [5] Dorn, L.; Lai Choe Kming, L. K. T.: Metallurgische Einflüsse auf den Lamellenbruch von Walzstahl. Schw. Schn., Düsseldorf 30 (1978) 2, S. 57 bis 61.
- [6] Schäfer, G.: Möglichkeiten zur Vermeidung von Lamellar- oder Terrassenrissen in Schweißkonstruktionen. ZIS-Mitt., Halle (S.) 25 (1983) 3, S. 237 bis 246.
- [7] Köthe, A.; Richter, J.: Über den Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse auf die Eigenschaften hochfester Baustähle. Freiburger Forschungsheft B 199: Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung höherfester Baustähle, Leipzig: Verlag für Grundstoffindustrie 1978.

- [8] Möser, M.: Bruch durch Wasserstoff – Kaltrissigkeit. *Schweißtechnik* (Berlin) 34 (1984) 11, S. 521-524.
- [9] Möser, M.: Elektronenmikroskopische Fraktographie. In: *Elektronenmikroskopie in der Festkörperphysik*. Hrsg. Bethge, H., und Heydenreich, J., Berlin 1982: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften und Heidelberg: Springer-Verlag 1982, S. 341-358.
- [10] Berichte des Instituts für Bergbausicherheit Leipzig.
- [11] Norwegian Public Reports (NOU 1981: 11) The „Alexander L. Kielland“- accident. Oslo 1981: Ministry of Justice and Police.
- [12] Hobbacher, A.: Schadenuntersuchungen zum Unglück des Halbtauchers „Alexander L. Kielland“. *Maschinenschaden*, München 56 (1983) 2, S. 42-48.
- [13] Hoefeld, J.: „Alexander L. Kielland“ – Ursachen und Folgen eines Bohrinselfalls. *HANSA*, Hamburg 119 (1982) 9: S. 601-604.