

Ersetzt Ausgabe Februar 1988

Das Merkblatt ist als Hilfe für den Erzeuger und Verarbeiter von heißrißanfälligen Werkstoffen gedacht. Es soll die im Hinblick auf die Heißrißprüfung wesentlichen theoretischen Erkenntnisse in kurzgefaßter Form vermitteln. Ein wichtiger Komplex ist auch der Abschnitt „Begriffe“, der dazu beitragen soll, daß eine einheitliche Ausgangsbasis für Diskussionen entsteht.

Mitgeltende DVS-Merkblätter zum Bereich „Heißrißprüfung“ sind: 1004-2 „Heißrißprüfverfahren mit fremdbeanspruchten Proben“, 1004-3 „Heißrißprüfverfahren mit selbstbeanspruchten Proben“ und 1004-4 „Vergleiche zur Aussagefähigkeit der Heißrißprüfverfahren“.

Inhalt:

- 1 Begriffe
- 1.1 Heißrisse
- 1.1.1 Erstarrungsrisse
- 1.1.2 Wiederaufschmelzrisse
- 1.1.3 Risse durch Verformbarkeitsabfall, DDC
- 1.2 Heißrißprüfverfahren
- 1.3 Heißrißprüfverfahren mit selbstbeanspruchten Proben
- 1.4 Heißrißprüfverfahren mit fremdbeanspruchten Proben
- 2 Grundsatzaussagen von Heißrißbildungstheorien in bezug auf die Heißrißprüfung
- 3 Anwendung auf Schweißverbindungen
- 4 Beanspruchungsverhältnisse
- 5 Anwendung der Erkenntnisse auf neue Heißrißprüfverfahren
- 6 Schrifttum

1 Begriffe

1.1 Heißrisse

Heißrisse entstehen während des Schweißens bei Abkühlung am Übergang flüssig/fest. Heißrisse sind Materialabtrennungen, die entlang den Korngrenzen (Dendritengrenzen), also interkristallin (interdendritisch) verlaufen. Sie treten fast immer in Verbindung mit niedrigschmelzenden Substanzen auf den Korngrenzen auf.

Heißrisse werden nach Entstehungsform und Entstehungsort unterschieden. Im Schweißgut gebildete Heißrisse werden **Erstarrungsrisse** bezeichnet. Neben der Schweißnaht im Grundwerkstoff oder angrenzenden Schweißgut (Mehrlagenschweißen) unmittelbar an der Schmelzlinie vorkommende Heißrisse sind **Wiederaufschmelzrisse**. (Gelegentlich werden auch die Begriffe **Aufschmelzrisse**, **Aufschmelzungsrisse**, **Wiederaufschmelzungsrisse** gebraucht.)

In einiger Entfernung von der Schmelzlinie auftretende Heißrisse infolge Verformbarkeitsabfalls des Werkstoffes werden als **DDC (Ductility Dip Cracks)** bezeichnet. Wiederaufschmelzrisse und Ductility Dip Cracks werden zusammengefaßt auch als **Mikrorisse (Fissures, Microcracks)** bezeichnet.

Normalerweise sind Heißrisse klein und erstrecken sich nur selten über mehrere Millimeter bis sogar Zentimeter. Sie sind meist schwer aufzufinden. Das gilt insbesondere für Wiederaufschmelzrisse und DDC (Ductility Dip Cracks), die hauptsächlich als Mikrorisse vorkommen. Oft nicht bis an die Oberfläche heranreichend, sondern in Innen der Schweißnaht liegend. Ihre Auffindbarkeit mit zerstörungsfreien Prüfverfahren ist daher nur bedingt möglich.

1.1.1 Erstarrungsrisse (solidification cracks)

Sie entstehen bei der Erstarrung aus der flüssigen Phase und

Diese Veröffentlichung wurde von einer Gruppe erfahrener Fachleute in ehrenamtlicher Gemeinschaftsarbeit erstellt und wird als eine wichtige Erkenntnisquelle zur Beachtung empfohlen. Der Anwender muß jeweils prüfen, wie weit der Inhalt auf seinen speziellen Fall anwendbar und ob die ihm vorliegende Fassung noch gültig ist. Eine Haftung des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik e.V. und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

reichen im Normalfall bis zur Oberfläche des Schweißgutes. Sie lassen sich meist mit der Lupe oder dem Fernrohr auch mit bloßem Auge erkennen (Mittensrisse, Endratensrisse). Oberflächenrißprüfverfahren lassen sich anwenden.

1.1.2 Wiederaufschmelzrisse (reheat cracks)

Sie entstehen beim Schweißen in den an das Schmelzbad angrenzenden Wärmeeinflußzonen (WEZ) des Grundwerkstoffes während der Abkühlphase. Darüber hinaus können sich Wiederaufschmelzrisse auch im Schweißgut von Mehrlagenschweißungen herausbilden, wenn das bereits eingebrachte Schweißgut durch Folgeraupen, Wärmeeinwirkung beeinflusst wird. Sie sind fast immer direkt mit der Schmelzlinie verbunden und haben auch teilweise über die Schmelzlinie hinausgehende Ausläufer in das Schweißgut. Ihre Entstehung ist immer mit dem Auftreten flüssiger Phasen in den Korngrenzen verbunden.

1.1.3 Risse durch Verformbarkeitsabfall, DDC

Risse durch Verformbarkeitsabfall des Werkstoffes, die in der Wärmeeinflußzone infolge des Schweißens entstehen, liegen in einiger Entfernung von der Schmelzlinie. Sie sind interkristalline Trennungen, die im festen Zustand entstehen. Korngrenzen werden dabei nicht angeschmolzen. DDC (Ductility Dip Cracks) sind unmittelbar nach dem Schweißen vorhanden.

Sie sind zu unterscheiden von Wiedererwärmungsrisse (Reheat Cracks), die erst nach dem Schweißen durch Relaxation infolge Wärmnachbehandlung, z.B. Spannungsarmglühen oder Betriebseinsatz, bei entsprechenden höheren Temperaturen entstehen.

1.2 Heißrißprüfverfahren

Heißrißprüfverfahren dienen der Ermittlung der Heißrißneigung eines Werkstoffes. Man unterscheidet Heißrißprüfverfahren, mit denen der Grundwerkstoff, das reine Schweißgut und Schweißverbindungen untersucht werden können.

1.3 Heißrißprüfverfahren mit selbstbeanspruchten Proben

Bei diesen Heißrißprüfverfahren wird die Probenbeanspruchung während des Schweißprozesses durch die behinderte Schrumpfung der Proben selbst erzeugt. Sie liefern als Ergebnis eine Ja/Nein-Aussage (Heißrisse vorhanden ja oder nein). Diese Verfahren und ihre Anwendung werden im Merkblatt DVS 1004-3 beschrieben.

1.4 Heißrißprüfverfahren mit fremdbeanspruchten Proben

Bei diesen Heißrißprüfverfahren wird die Probenbeanspruchung von außen durch eine dafür geeignete Belastungseinrichtung aufgebracht. Die Prüfverfahren liefern quantitative und reproduzierbare Ergebnisse und ermöglichen die Vergleichbarkeit der Werkstoffe untereinander. Die Verfahren und ihre Anwendung werden im Merkblatt DVS 1004-2 beschrieben.

DVS, Technischer Ausschuß, Arbeitsgruppe „Prüfen von Schweißungen“

2 Grundsatzaussagen von Heißrißbildungstheorien in bezug auf die Heißrißprüfung

Eine gute Erklärung für den Mechanismus der Heißrißentstehung sind die Theorien von *Borland* [1] und *Prokhorov* [2].

Nach *Borland* [1] spielen bei der Erstarrung die Mengenverhältnisse zwischen fester und flüssiger Phase eine entscheidende Rolle, Bild 1. Im Stadium 1 ist noch genügend Schmelze vorhanden. Heißrisse können nicht entstehen, da die wenigen gebildeten Kristalle von Schmelze umschlossen sind. Im Stadium 2 beginnen die Kristalle zusammenzuwachsen. Heißrißbildung wird möglich, ist jedoch unwahrscheinlich, weil noch genügend Schmelze vorhanden ist, um entstehende Trennungen wieder auszufüllen. Im Stadium 3, dem kritischen Erstarrungsgebiet, können, da nicht mehr genügend Schmelze vorhanden ist, rißartige Trennungen nicht mehr ausgeheilt werden. Im Stadium 4 ist alles erstarrt, der Werkstoff verhält sich duktil. Es tritt keine Heißrißbildung mehr auf.

Eine sehr wichtige Rolle spielt im Stadium 3 auch die Verteilung der flüssigen Phase auf den Korngrenzen, Bild 2. Eine filmartige Anordnung ist besonders negativ. Hat die flüssige Phase die Fähigkeit zu koagulieren (das ist der Fall, wenn sie sich kugelförmig in der Ecke zwischen beispielsweise drei Körnern anordnet), ist die Heißrißgefahr geringer. Kennzeichnend ist der Benetzungswinkel der flüssigen Phase auf der Korngrenze, auch Dihedralwinkel genannt. Je größer dieser wird, desto geringer ist die Gefahr der Bildung von Heißrisen.

Die Bildung von Erstarrungs- und Wiederaufschmelzrisen erfolgt durch Trennung in den flüssigen Filmen, was durch Rißflächenbetrachtungen im Rasterelektronenmikroskop nachweisbar ist.

Prokhorov [2] definiert ein Temperaturgebiet, in welchem Heißrisse vorkommen können. Dieses wird als „Temperaturintervall der Sprödigkeit (TIS) = Brittleness Temperature Range (BTR)“ bezeichnet. Für jeden einzelnen Werkstoff existiert ein solches charakteristisches TIS. Die obere Temperatur des TIS ist diejenige, bei der während des Erstarrungsvorganges die unbehinderte Zirkulation flüssiger Phasen um die Körner durch deren zunehmendes Zusammenwachsen behindert wird. Bei der unteren Temperatur, die unterhalb der Solidustemperatur der Matrix liegt, sind alle Korngrenzenfilme gerade erstarrt. Es ist der Zeitpunkt, bei dem die Festigkeit der gebildeten Korngrenzen ausreicht, um Verformungen aufzunehmen.

Die Temperaturspanne, in der Heißrisse vorkommen können, und die Minimalverformung, die nötig ist, um Heißrisse zu erzeugen, sind wichtige charakteristische Merkmale des TIS. Da die Heißrißbildung beim Schweißen ein dynamischer Vorgang ist, ist eine Minimalverformungsgeschwindigkeit erforderlich. Demnach ist das TIS eines Werkstoffes durch drei charakteristische Größen bestimmt:

- die Temperaturspanne, in der Heißrisse entstehen können (T des TIS),
- die Minimalverformung (kritische Dehnung),
- die Minimalverformungsgeschwindigkeit (kritische Dehngeschwindigkeit).

Eine schematische Darstellung des TIS enthält Bild 3. Prinzipiell ist jedes der drei Kriterien für eine quantitative klassifizierende Heißrißprüfung von Werkstoffen verwendbar.

3 Anwendung auf Schweißverbindungen

Beim Lichtbogenschweißen ist das flüssige Schweißbad hinter dem wandernden Lichtbogen in der Erstarrungs- und Abkühlzone einen Bereich, der dem Temperaturintervall der Sprödigkeit (TIS) entspricht und als „empfindliche Zone (REZ = Crack Susceptible Zone (CSZ)“ benannt wird, Bild 4. Die Ausdehnung der REZ hängt vom Schweißverfahren, den Schweißbedingungen und den Abkühlbedingungen ab. Von der Ausdehnung der REZ hängt somit auch die maximale Länge möglicher Heißrisse in der jeweiligen Schweißnaht ab. Je steiler der Abkühlungsgradient, desto geringer die Ausdehnung der REZ.

4 Beanspruchungsverhältnisse

Heißrisse entstehen in der REZ einer Schweißnaht, wenn Verformungen hinreichender Größe mit hinreichender Verformungsgeschwindigkeit auftreten und auf die durch flüssige Filme benetzten Korngrenzen einwirken können. In einer Schweißnaht entstehen solche Verformungen durch Schrumpfbehinderungen bei der Erstarrung des Schweißgutes und der miterwärmten angrenzenden Werkstoffbereiche, das heißt durch die Selbstbeanspruchung der Schweißnaht infolge des Schweißprozesses.

Je nach Schweißverfahren, Wärmeführung und Duktilität des umgebenden Werkstoffs bzw. Bauteils können die resultierenden Verformungen sehr unterschiedlich sein. Infolge dessen sind die Heißrißbildungsbedingungen für Bauteile wegen der unklaren Beanspruchungsverhältnisse auch weitgehend unbekannt. Dennoch wurde bei einer großen Anzahl älterer Heißrißprüfverfahren versucht, die Selbstbeanspruchung der Schweißnaht für den Prüfprozeß zu nutzen. Diese nach dem „Selbstbeanspruchungsprinzip“ arbeitenden Heißrißprüfverfahren sind für allgemeine Untersuchungen nur bedingt geeignet. Im Hinblick auf den jeweils zu betrachtenden Anwendungsfall stellen sie jedoch ein wenig aufwendiges, für die Praxis ein wirksames Mittel zur Festlegung von Grundbedingungen dar.

5 Anwendungen der Erkenntnisse auf neue Heißrißprüfverfahren

Für grundlegende Betrachtungen sollten nur Heißrißprüfverfahren angewendet werden, bei denen die Probe durch kontrollierte äußere Belastung beansprucht wird, wobei die Selbstbeanspruchung der Probe durch Schrumpfbehinderung so klein wie möglich gehalten werden muß. Außerdem sollen unter Anliegen strenger Maßgabe folgende Grundanforderungen an fremdbeanspruchte Heißrißprüfverfahren erfüllt sein:

- definierte, einstellbare Beanspruchungsverhältnisse an der Probe,
- innerhalb dieser Grenzen variable Versuchsparameter,
- Reproduzierbarkeit,
- große Empfindlichkeit.

Wenn diese Anforderungen bei einem Heißrißprüfverfahren erfüllt ist, ist die quantitative Klassifikation der Werkstoffe nach Heißrißanfälligkeit gegeben.

Diese Erkenntnisse haben zur Entwicklung einer Reihe von Heißrißprüfverfahren mit fremdbeanspruchten Proben zur Ermittlung der

- kritischen Dehnungsgeschwindigkeit (Rißschwelle),
- kritischen Dehnung (Rißschwelle),
- werkstoffspezifischen Temperaturspanne (Gesamtrißlänge)

in Abhängigkeit von einer kontrollierten und definierten Probenverformung geführt. Solche Prüfverfahren sind im Merkblatt DVS 1004-2 beschrieben.

6 Schrifttum

- [1] Borland, J. C.: Suggested explanation of hot cracking in mild and low alloy steel welds. Brit. Welding J., 8 (1961), H. 11, S. 526/40.
- [2] Prokhorov, N. N.: Theorie und Verfahren zum Bestimmen der technologischen Festigkeit von Metallen beim Schweißen. Schweißtechn. (Berlin), 18 (1968), H. 1, S. 8/11.
- [3] Matsuda, F., u.a.: Fundamental Investigations on Solidification Crack Susceptibility for Weld Metals with Transverse Restraint Test. Trans. Japan Weld. Soc., 2 (1971), H. 2, S. 1/22.