

Title	Forschung in Bezug auf die Lotbrüchigkeit von Kohlenstoffstahl (Bericht 3) : Einfluß der Zuggeschwindigkeit auf die Lotbrilchigkeit(Materials, Metallurgy & Weldability)
Author(s)	Arata, Yoshiaki; Ohmori, Akira; Ogawa, Hirotaka et al.
Citation	Transactions of JWRI. 1986, 15(1), p. 85-91
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/4221
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

Forschung in Bezug auf die Lötbrüchigkeit von Kohlenstoffstahl (Bericht 3) †

– Einfluß der Zuggeschwindigkeit auf die Lötbrüchigkeit –

Yoshiaki ARATA*, Akira OHMORI**, Hiroataka OGAWA***, Toru YOSHIDA**** und Ikuo OKAMOTO*

Zusammenfassung

Eine Konstantlastprüfung und eine Prüfung mit konstanter Zugrate wurden an gekerbten Proben von Kohlenstoffstahl in Kontakt mit Flüssigmetallen wie Zn, Sn, Zn-50Sn-Legierung und Zn-50Cd-Legierungen unter sich ändernden Temperaturen durchgeführt, um die Wirkung des Zugrates auf die Flüssigmetallversprödung (LME) zu klären. In dieser Studie wurde die LME-Empfindlichkeit von Kohlenstoffstahl durch die Zeit bis zur maximalen Last, die Verschiebung zur maximalen Last und die durchschnittliche Penetrationsrate abgeschätzt.

Von den Ergebnissen der Temperaturabhängigkeit her wurde beobachtet, daß die LME von Kohlenstoffstahl in Kontakt mit flüssigem Zn bzw. Sn einen Übergang von plastischem zu sprödem Verhalten mit Zunahme der Temperatur bei Prüfung mit konstantem Zug (5 mm/min) verursachte, während dies bei Kontakt mit flüssiger Zn-50Cd- bzw. Zn-50Sn-Legierung nicht der Fall war. Es wird jedoch gezeigt, daß die Rückgewinnungstemperatur für die Dehnbarkeit mit der Zugrate der Prüfung für LME oder der Bildungsrate der Reaktionsschicht an der Schnittstelle zwischen festem und flüssigem Material zusammenhängt.

KEY WORDS: (Lötbrüchigkeit) (Zuggeschwindigkeit) (Kohlenstoffstahl) (Zn-Sn Legierung) (Zn-Cd Legierung)

1. Einleitung

In der vorhergehenden Veröffentlichung¹⁾ haben die Autoren die Temperaturabhängigkeit der Flüssigmetallversprödung (LME) von Kohlenstoffstahl durch Flüssigmetall-Zn-Cd-Legierung an Hand von Prüfungen mit konstanter Zugrate untersucht. Als Ergebnis haben sie gefunden, daß für Flüssigmetall-Zn-50Cd-Legierung und verschiedene Kohlenstoffstähle die LME des Stahls mit zunehmender Temperatur und mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt markant wird, während es für Flüssigmetall-Zn-95Cd-Legierung und verschiedene Kohlenstoffstähle ab etwa 450°C nur schwierig zu LME kommt. Da die Temperaturabhängigkeit der LME für verschiedene Kohlenstoffstähle durch Flüssigmetall-Zn-50Cd-Legierung eine sehr ähnliche Tendenz wie die Korrosion von Fe durch Zn zeigt, wird geschlossen, daß die Korrosion von Stahl durch Zn eine große Rolle bei der LME von Stahl durch Flüssigmetall-Zn-Cd-Legierung spielt. Da jedoch für die Korrosion von Stahl durch Zn die Bildung einer Reaktionsschicht an der Schnittstelle zwischen festem und flüssigem Material²⁾ angenommen wird, wird die eingehende Untersuchung des Einflusses der Verzerrungsgeschwindigkeit (Zuggeschwindigkeit) als wichtig für

die Klärung der für die Industrie wichtigen LME-Entstehung in Stahl durch Zn und der Korrosionseigenschaften von Flüssigmetall angesehen.

Als Forschung in Bezug auf die Verzerrungsgeschwindigkeit für ein Zn-Stahl system zeigen Tanaka et al.³⁾ eine Förderungstendenz für LME durch Zunahme der Verzerrungsgeschwindigkeit, während Nakasa⁴⁾ zu einem entgegengesetzten Ergebnis kommen, und die Ursache hierfür ist nicht klar. Diese Forschungen sind weiterhin bei konstanter Temperatur durchgeführt worden, und die oben angeführte Entstehung von LME und die Korrosionseigenschaften von Flüssigmetall werden nicht eingehend untersucht.

Diese Forschung untersucht nun die Korrosionskonstante unter Spannung, die durchschnittliche Verzerrungsgeschwindigkeit und die Bruchzeit durch Konstantlastversuche bei Temperaturänderung. Der Einfluß der Zuggeschwindigkeit auf das Zn-Stahl system wird auch untersucht. Weiterhin wird die Abhängigkeit von der Zuggeschwindigkeit für Stahl unter Verwendung von Sn untersucht, wofür genau wie bei Zn die Bildung einer Reaktionsschicht an der Grenzfläche erwartet wird, und es wird vergleichende Forschung durchgeführt.

† Received on May 7, 1986

* Professor

** Auberodentlicher Professor

*** Lektor, Meijo Universität, Nagoya, Aichi

**** Professor, Meijo Universität, Nagoya, Aichi

Transactions of JWRI is published by Welding Research Institute of Osaka University, Ibaraki, Osaka 567, Japan

2. Versuchsmethoden

2.1 Prüfungsmaterial und Proben

Die verwendeten Flüssigmetalle waren reines Zn, reines Sn, Zn-50Cd-Legierung und Zn-50Sn-Legierung. Das Stahlmaterial war SS34 (0.066% Kohlenstoffstahl).

Die für die Konstantlastversuche (Korrosionsversuch, Verzerrungsgeschwindigkeitsversuch und Bruchversuch) verwendete Probe ist in **Abb. 1** gezeigt. Da diese Proben hohen Temperaturen ausgesetzt werden, werden hitzebeständiger Anstrich und hitzebeständiger Kitt wie in der Abbildung gezeigt zusammen verwendet, um Korrosion zu verhüten und eine konstante Fläche zu erhalten. Das Gewicht der Proben für den Korrosionsversuch wurde vor Auftrag dieser Materialien gemessen.

Die für den Konstantzuggeschwindigkeitsversuch verwendeten Proben sind im vorhergehenden Bericht⁵⁾ gezeigt.

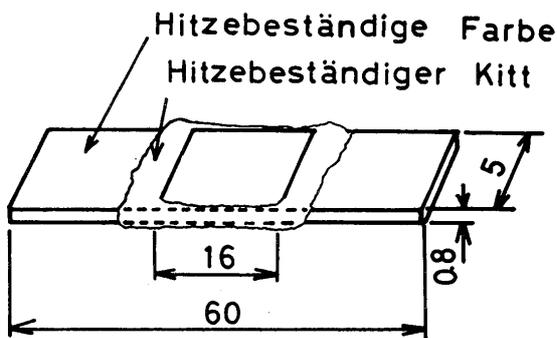


Abb. 1 Für die Konstantlastversuche verwendete Probe.

2.2 Versuchsvorrichtungen und Versuchsmethoden

Der Umriß der Konstantlast-Versuchsvorrichtung ist in **Abb. 2** gezeigt. Die Versuchsreihenfolge hierfür wird nachfolgend erklärt. Die in **Abb. 1** gezeigte Probe wird an der Versuchsvorrichtung angebracht, das Flüssigmetall (0.57 g) und ein Flußmittel werden gleichzeitig auf die Probe aufgebracht, und der bewegliche Elektroofen wird am festgelegten Platz angebracht. Nach Erreichen der festgelegten Temperatur für die Probe wird eine konstante Last angelegt und der Versuch wird begonnen. Gleichzeitig mit Beginn des Versuchs wird die Dehnung (Verzerrung)

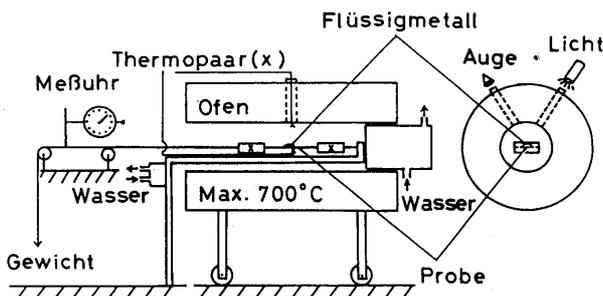


Abb. 2 Schematisches Diagramm der in dieser Forschung verwendeten Versuchsvorrichtung.

durch die außerhalb des Ofens angebrachte Meßuhr gemessen. Um nach dem Konstantlastversuch die Korrosionsmenge (Unterschied zwischen dem Gewicht der Probe vor dem Versuch und Gewicht der Probe nach dem Konstantlastversuch nach vollständiger Entfernung von Flüssigmetall, hitzebeständigem Kitt und hitzebeständiger Farbe) zu erhalten, wird das Flüssigmetall bei Raumtemperatur von der Probe entfernt, das auf der Probenoberfläche verbliebene Flüssigmetall wird mit einer etwa 2-prozentigen H_2SO_4 -Lösung entfernt, und dann wird die Probe in $NaHCO_3$ -Lösung neutralisiert, mit Wasser gewaschen und getrocknet.

Die Versuchsvorrichtung und die Versuchsmethode für den Konstantzuggeschwindigkeitsversuch sind im vorhergehenden Bericht⁵⁾ gezeigt worden. Bei dieser Forschung ist der Bereich für die Zuggeschwindigkeit von 0.05 bis 500 mm/min.

3. Versuchsergebnisse und Betrachtungen

3.1 Untersuchung der Temperaturabhängigkeit von LME

Vor der Untersuchung des Einflusses der Verzerrungsgeschwindigkeit in Bezug auf Kohlenstoffstahl-LME wurde die Temperaturabhängigkeit der Stahl-LME durch in Bezug auf die verschiedenen Flüssigmetalle bei konstanter Zuggeschwindigkeit (5 mm/min) untersucht.

Abbildung 3 und **Abb. 4** zeigt die Versuchsergebnisse für den Zugversuch für 0.066-prozentigen Kohlenstoffstahl mit verschiedenen Flüssigmetallen. Das Ergebnis für Flüssigmetall-Zn-50Cd in der Abbildung ist schon im

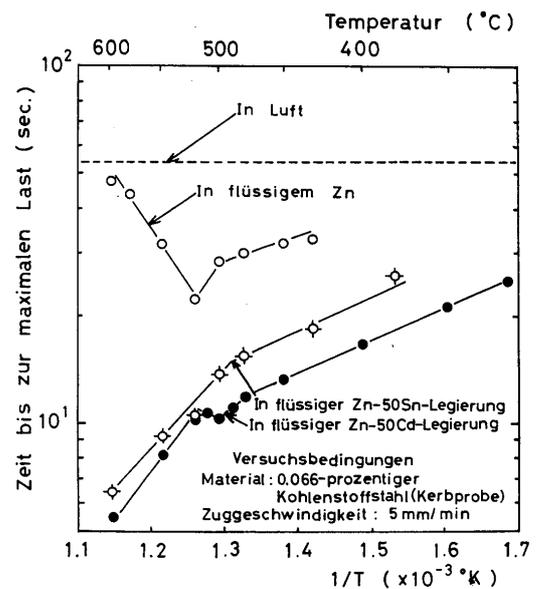


Abb. 3 Halblogarithmische Aufzeichnung der Zeit bis zur maximalen Last als Funktion der reziproken absoluten Temperatur (in flüssigem Zn, flüssiger Zn-50Sn-Legierung, flüssiger Zn-50Cd-Legierung und in Luft).

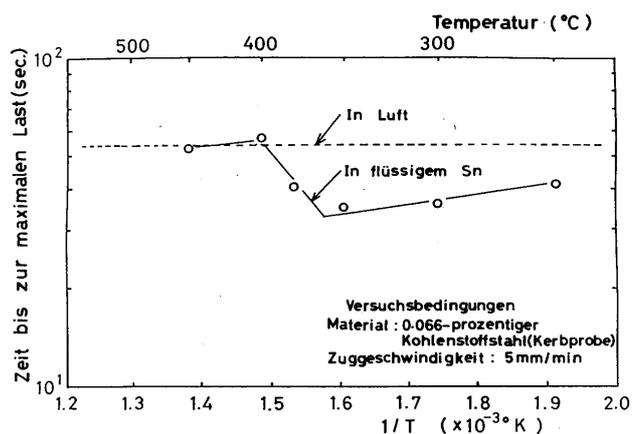


Abb. 4 Halblogarithmische Aufzeichnung der Zeit bis zur maximalen Last als Funktion der reziproken absoluten Temperatur (in flüssigem Zn).

vorhergehenden Bericht¹⁾ angeführt worden, und es wird hier zum Vergleich gezeigt. Aus der Abbildung kann ersehen werden, daß die Stahlspädigkeit in Flüssigmetall-Zn-50Cd-Legierung oder Flüssigmetall-Zn-50Sn-Legierung mit zunehmender Temperatur bemerkenswert zunimmt, während die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Last abnimmt. In reinem Zn zeigt jedoch die Dehnbarkeit von Stahl ab etwa 530°C eine Annäherung an die Eigenschaften von Stahl in Luft, und bei einer Temperatur von etwa 600°C wird in etwa Übereinstimmung mit Stahl erreicht. Die Temperatur, bei der sich die Dehnbarkeit der von Stahl annähert, wird von Nicholas⁶⁾ als die Spädigkeit - Dehnbarkeit - Transitionstemperatur bezeichnet, und die Erscheinung der Rückkehr der Dehnbarkeit wird als Erholung bezeichnet. Diese Ausdrücke werden nachfolgend auch von den Autoren verwendet.

Aus den obigen Ausführungen kann ersehen werden, daß die LME von 0.066-prozentigem Kohlenstoffstahl bei Änderung der Temperatur je nach dem Flüssigmetall Erholung oder keine Erholung zeigen. Dementsprechend kann angenommen werden, daß die Erscheinung der LME-Erholung durch gegenseitige Wirkung zwischen Flüssigmetall und Stahl verursacht wird.

3.2 Untersuchung der Korrosionskonstante unter Spannung, der durchschnittlichen Verzerrungsgeschwindigkeit und der Bruchzeit

Die Korrosionskonstante unter Spannung (K), die durchschnittliche Verzerrungsgeschwindigkeit (ϵ) und die Bruchzeit (t_F) können durch die Konstantlastprüfung experimentell erfaßt werden.

Der Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Erosionskonstante für das System von Flüssigmetall-Zn-50Cd-Legierung und 0.066-prozentigem Kohlenstoffstahl ist in Abb. 5 gezeigt. Die in diesem System auftretende Korrosionskonstante (die Größe, die die Stärke der Korro-

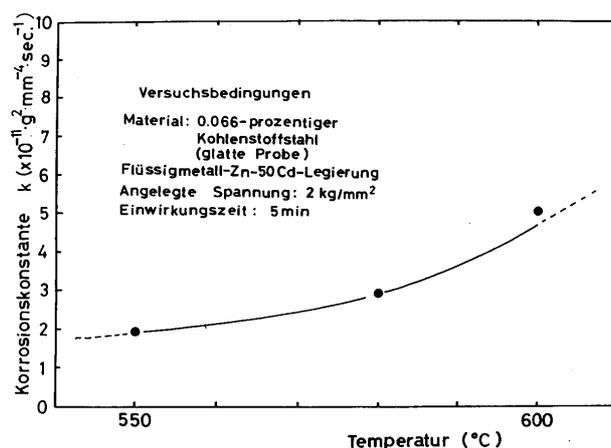


Abb. 5 Temperaturabhängigkeit der Korrosionskonstante unter konstanter Last.

sion anzeigt) entspricht der parabelförmigen Zeitregel

$$E_w = \sqrt{Kt} \quad (1)$$

und es wurde der gleiche Zusammenhang wie für das nicht unter Spannung stehende System von Flüssigmetall-Zn-50Cd-Legierung und Eisen des vorherigen Berichtes¹⁾ festgestellt. Hier steht E_w für das Korrosionsgewicht, und t steht für die Eintauchzeit. Aus dieser Abbildung kann gesehen werden, daß die Korrosionskonstante mit steigender Temperatur sanft ansteigt.

Der unter den gleichen Bedingungen erhaltene Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Verzerrung bzw. der durchschnittlichen Verzerrungsgeschwindigkeit ist in Abb. 6 gezeigt. Die Verzerrung und die durchschnittliche Verzerrungsgeschwindigkeit zeigen beide mit steigender Temperatur einen sanften Anstieg, und die Tendenz ist ähnlich wie für die oben gezeigte Korrosionskonstante unter Spannung. Hieraus kann angenommen werden, daß eine Zunahme der durchschnittlichen Verzerrungsgeschwindigkeit die Heftigkeit der Penetration erhöht. Um nun den Zusammenhang zwischen

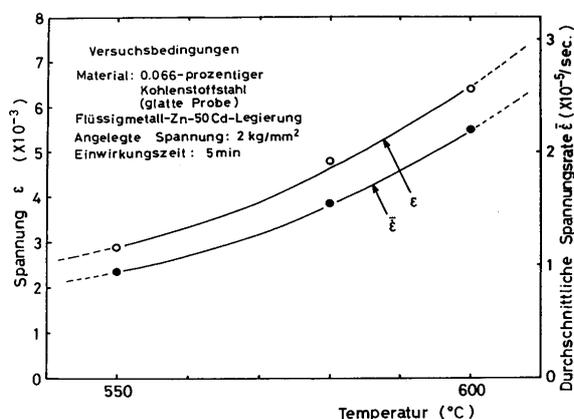


Abb. 6 Zusammenhang zwischen Spannung und/oder durchschnittlicher Spannungsrate unter konstanter Last und Temperatur.

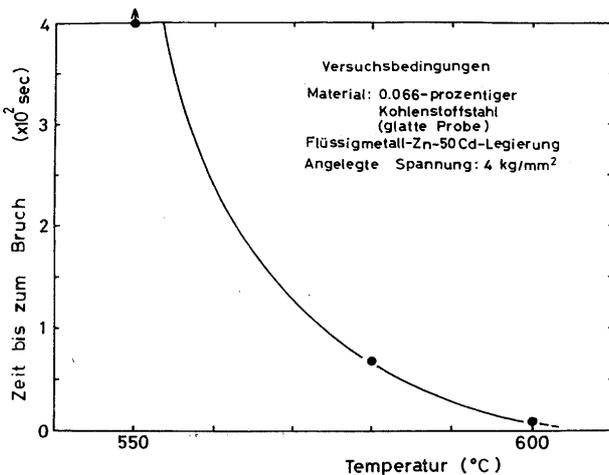


Abb. 7 Zusammenhang zwischen Zeit bis zum Bruch und Temperatur.

diesen Tatsachen und der LME zu erhalten, wurden Bruchversuche unter konstanter Last durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 7 gezeigt. Die Bruchzeit nimmt mit zunehmender Temperatur ab. Dies zeigt an, daß die LME heftiger wird.

Aus den durch die obigen Konstantlastversuche gewonnenen Ergebnissen kann angenommen werden, daß die Erleichterung der LME durch Temperaturerhöhung von der Erhöhung der durchschnittlichen Verzerrungsgeschwindigkeit, d.h. der Erhöhung der Korrosionskonstante unter Spannung abhängt.

3.3 Einfluß der Zuggeschwindigkeit auf die LME von Stahl mit Flüssigmetallegerungen

Die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der Zuggeschwindigkeitsänderung auf die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Last unter konstanter Temperatur (600°C) sind in Abb. 8 gezeigt. Diese Ergebnisse sind für das System von Flüssigmetall-Zn-50Cd-Legierung und 0.066-prozentigem Kohlenstoffstahl. Mit zunehmender

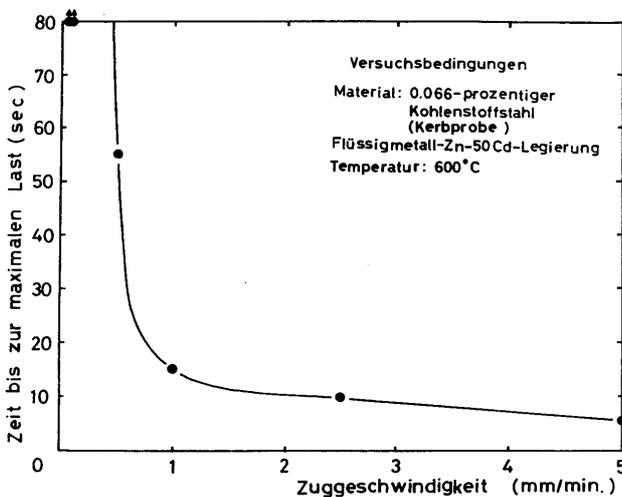


Abb. 8 Zusammenhang zwischen Zeit bis zur maximalen Last und Zuggeschwindigkeit.

Zuggeschwindigkeit nimmt die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Last auf der Last-Zeit-Kurve ab. In anderen Worten kann angenommen werden, daß die LME mit zunehmender Zuggeschwindigkeit leichter fortschreiten kann. Abb. 9 zeigt den Zusammenhang zwischen der aus der Zeit bis zum Erreichen der maximalen Last erhaltenen Versetzung und der Zuggeschwindigkeit. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse in Flüssigmetall-Zn-50Sn-Legierung. Die Versetzung von 0.066-prozentigem Kohlenstoffstahl oder von Kohlenstoffstahl in Kontakt mit Flüssigmetall-Zn-50Cd-Legierung nimmt mit zunehmender Zuggeschwindigkeit zu. Andererseits wird die LME von Kohlenstoffstahl im Fall von Flüssigmetall-Zn-50Sn-Legierung im Vergleich zum Fall mit Flüssigmetall-Zn-50Cd-Legierung durch Änderung der Zuggeschwindigkeit stark beeinflusst. Bei einer Zuggeschwindigkeit von etwa 1 mm/min oder weniger nähert sich die Versetzung bis zur maximalen Last bei abnehmender Zuggeschwindigkeit dem Wert für Messung in Luft, und bei 0.05 mm/min wird der gleiche Wert wie für Messung in Luft erhalten. Dementsprechend kommt es auch bei Systemen, in denen bei konstanter Zuggeschwindigkeit (5 mm/min) keine Erholung der Dehnbarkeit gegenüber Temperaturänderungen auftritt, durch Verringerung der Zuggeschwindigkeit zu Erholung der Dehnbarkeit.

Die Ergebnisse für die gleichen Systeme wie oben bei 450°C sind in Abb. 10 gezeigt. Die Ergebnisse für Flüssigmetall-Zn-50Cd-Legierung zeigen die gleiche Tendenz wie bei 600°C, aber die Ergebnisse für Flüssigmetall-Zn-50Sn-Legierung zeigen Beginn der Erholung von etwa 0.7 mm/min abwärts, und im Rahmen dieser Forschung wird keine vollkommene Erholung festgestellt. Die Ergebnisse für Flüssigmetall-Zn-50Sn-Legierung zeigen klar, daß sich die Zuggeschwindigkeit für Beginn der Erholung entsprechend der Temperatur ändert.

Aus den obigen Ergebnissen wird gezeigt, daß für das System von Flüssigmetall-Zn-50Sn-Legierung und 0.066-prozentigem Kohlenstoffstahl, für das in Abschnitt 3.1

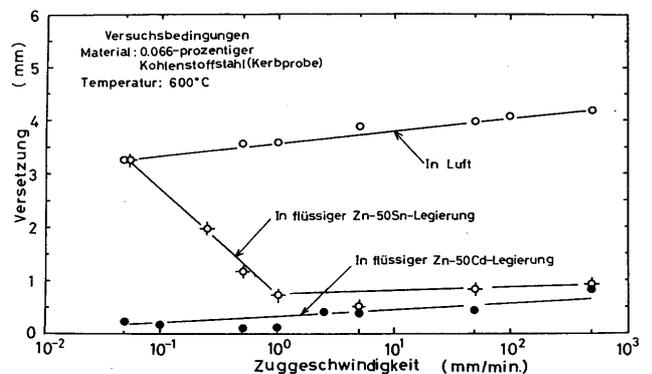


Abb. 9 Wirkung der Zuggeschwindigkeit auf die Verschiebung bis zur maximalen Last für 0.066-prozentigen Stahl in flüssigen Zn-50Cd- und Zn-50Sn-Legierungen bei 600°C.

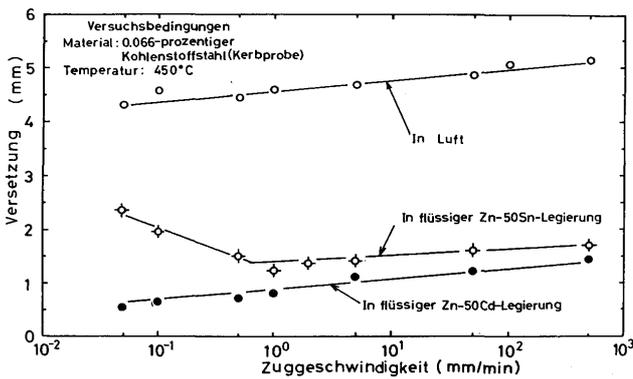


Abb. 10 Wirkung der Zuggeschwindigkeit auf die Verschiebung bis zur maximalen Last für 0.066-prozentigen Stahl in flüssigen Zn-50Cd- und Zn-50Sn-Legierungen bei 450°C.

keine Erholung festgestellt wurde, Erholung des Kohlenstoffstahls bei Änderung der Zuggeschwindigkeit verursacht wird.

3.4 Untersuchung der Erscheinung der Erholung der Stahl-LME durch Flüssigmetall-Zn bzw. -Sn

Der Zusammenhang der Versetzung bis zur maximalen Last für Flüssigmetall-Zn in Kontakt mit 0.066-prozentigem Kohlenstoffstahl mit der Zuggeschwindigkeit ist in Abb. 11 gezeigt. Bei einer Temperatur von 600°C beginnt Erholung bei einer Zuggeschwindigkeit von etwa 100 mm/min und wird bei etwa 50mm/min abgeschlossen. Der Vergleich zwischen Abb. 3 und Abb. 11 zeigt klar, daß dieser Erholungszustand durch Änderung der Zuggeschwindigkeit verschoben wird. In anderen Worten befindet sich das System in Abb. 3 bei einer Zuggeschwindigkeit von 5 mm/min und einer Temperatur von 600°C im Erholungszustand, aber in Abb. 11 ist durch Erhöhung der Zuggeschwindigkeit Änderung vom Erholungszustand zum Zustand mit Auftreten von LME erfolgt.

Um den Einfluß der Zuggeschwindigkeit auf die LME noch weiter zu klären, wurden die gleichen Versuche

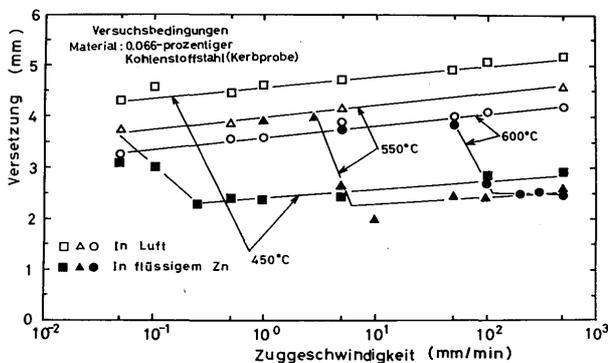


Abb. 11 Wirkung der Zuggeschwindigkeit auf die Verschiebung bis zur maximalen Last für 0.066-prozentigen Stahl in flüssigen Zn bei verschiedenen Temperaturen.

unter Verwendung von Flüssigmetall-Sn durchgeführt, und die Ergebnisse sind in Abb. 12 gezeigt. Wie schon in Abb. 4 (Zuggeschwindigkeit 5 mm/min) gezeigt, hat sich die Dehnbarkeit bei dieser Temperatur vollständig erholt, aber mit zunehmender Zuggeschwindigkeit wird LME festgestellt. Dementsprechend kann gesagt werden, daß auch für Stahl in Flüssigmetall-Sn ein ähnliches Verhalten für die Zuggeschwindigkeit festgestellt werden kann.

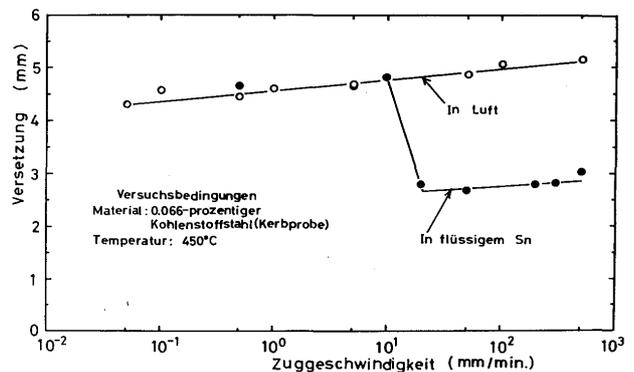


Abb. 12 Wirkung der Zuggeschwindigkeit auf die Verschiebung bis zur maximalen Last für 0.066-prozentigen Stahl in flüssigen Sn bei 450°C.

3.5 LME-Bewertung durch die durchschnittliche Penetrationsgeschwindigkeit und Erholung

Für das System von Flüssigmetall-Zn-50Sn-Legierung und Kohlenstoffstahl, für das in Abschnitt 3.1 keine Erholung festgestellt wurde, konnte in Abschnitt 3.3 Erholung festgestellt werden. Hier wird nun LME-Bewertung durch die im vorhergehenden Bericht¹⁾ gezeigte durchschnittliche Penetrationsgeschwindigkeit durchgeführt, und die Ursachen für Erholung werden wie folgt untersucht.

Abb. 13 zeigt den Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Penetrationsgeschwindigkeit und der Zuggeschwindigkeit. Zum Vergleich wurden auch die Ergebnisse in Flüssigmetall-Zn-50Cd-Legierung zugefügt. Für den Fall von Flüssigmetall-Zn-50Sn-Legierung zeigen die Zuggeschwindigkeit und die durchschnittliche Penetrationsgeschwindigkeit von einer Zuggeschwindigkeit von 1 mm/min aufwärts in einem linearen Zusammenhang in etwa Entsprechung, und bei Zunahme der Zuggeschwindigkeit (Zunahme der Verzerrungsgeschwindigkeit) zeigt sich fortschreitende LME. Die Ergebnisse in Flüssigmetall-Zn-50Cd-Legierung zeigen auch die gleiche Tendenz. Hieraus kann angenommen werden, daß die Zuggeschwindigkeit die gleiche Wirkung wie die Temperatur auf die LME hat. In anderen Worten kann gesagt werden, daß die LME durch Zunahme der Zuggeschwindigkeit oder durch Erhöhung der Temperatur gefördert wird. Für den Fall in Flüssigmetall-Zn-50Sn-Legierung zeigen jedoch die Zuggeschwindigkeit und die durchschnittliche Penetrationsgeschwindigkeit im Zuggeschwindigkeitsbereich

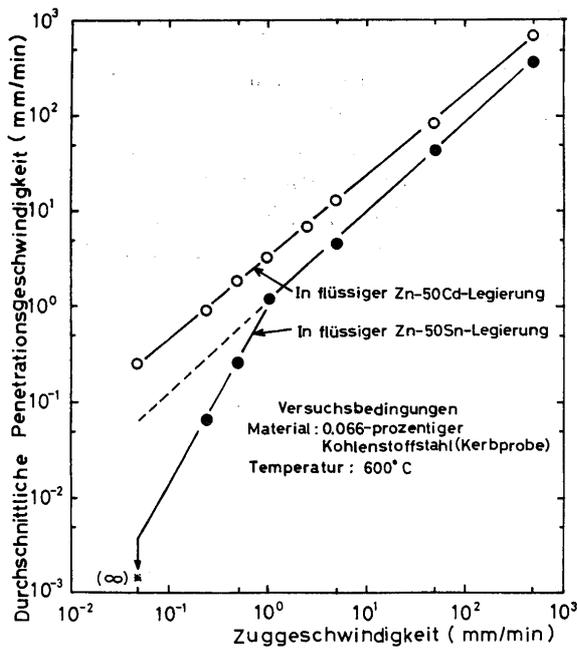


Abb. 13 Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Penetrationsrate und Zuggeschwindigkeit. Die Markierung * in dieser Abbildung zeigt an, daß die durchschnittliche Penetrationsrate bei der Zuggeschwindigkeit von 0.05 mm/min zu Null wird.

von 1 mm/min abwärts keine Übereinstimmung. Die durchschnittliche Penetrationsgeschwindigkeit nimmt mit Verringerung der Zuggeschwindigkeit ab, und sie wird bei einer Zuggeschwindigkeit von 0.05 mm/min zu Null. Hier wurden nun SEM-Beobachtungen durchgeführt, um die Ursache hierfür zu untersuchen.

Abbildung 14 zeigt das SEM-Foto der Kerbbruchfläche von 0.066-prozentigem Kohlenstoffstahl in Kontakt mit Flüssigmetall-Zn-50Sn-Legierung bei einer Temperatur von 600°C bei Erreichen der maximalen Last und die Punktanalyseergebnisse für die einzelnen Punkte. Aus diesen Punktanalyseergebnissen kann für die Kerbteilspitzen hauptsächlich die Bildung einer Reaktionsschicht von Fe und Sn festgestellt werden. Allgemein wird berichtet, daß LME nicht durch die Bildung von Reaktionsprodukten zwischen Metallen (Reaktionsschichten) verursacht wird, aber die Einzelheiten sind nicht klar. Für den Bereich der niedrigen Zuggeschwindigkeiten, in dem keine Übereinstimmung zwischen der Zuggeschwindigkeit und der durchschnittlichen Penetrationsgeschwindigkeit besteht, kann jedoch ein enger Zusammenhang zwischen der Bildung einer solchen Reaktionsschicht und dem Auftreten von LME angenommen werden. Um diesen Zusammenhang zu klären, wurde die Dicke der Reaktionsschicht unter konstanter Last gemessen, und die Bildungsgeschwindigkeit der Reaktionsschicht wurde wie folgt untersucht.

Der Zusammenhang zwischen der Dicke (δ) der Reaktionsschicht und der Zeit (t) wird experimentell erhalten,

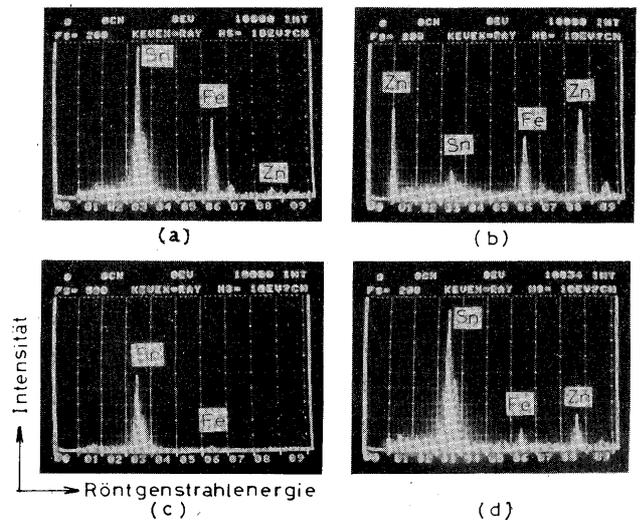
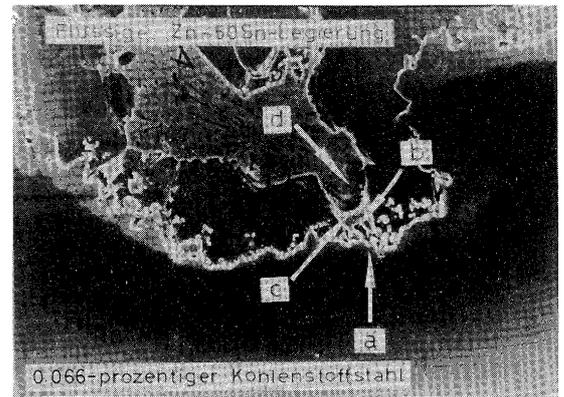


Abb. 14 SEM-Foto von 0.066-prozentigem Stahl in Kontakt mit flüssiger Zn-50Sn-Legierung und Analyseergebnisse für die in diesem Foto gezeigten Positionen.

und auch in diesem Fall wird die gleiche parabolische Zeitregel wie für die Formel (1) erhalten. Aus diesem Ergebnis wird die Neigung (A) erhalten. Da McLean⁷⁾ den Zwischenraum an der Kristallkorngrenze als etwa das 3-fache des Atomdurchmessers⁸⁾ ($d = 2.54 \text{ \AA}$) angibt, wird die Dicke (δ_G) der Reaktionsschicht an der Kristallkorngrenze von einer Seite her zu $3d/2$. Die für die Bildung einer Reaktionsschicht mit der Dicke δ_G erforderliche Zeit kann aus der parabolischen Zeitregel erhalten werden. Dementsprechend kann die Bildungsgeschwindigkeit für die Reaktionsschicht durch Linearisierung für die Reaktionsschichtbildung über diese Entfernung erhalten werden.

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung der für die verschiedenen Systeme wie oben beschrieben erhaltenen Bildungsgeschwindigkeiten für die Reaktionsschicht. Aus dieser Tabelle kann gesehen werden, daß die Zuggeschwindigkeit und die Bildungsgeschwindigkeit für die Reaktionsschicht zur Zeit der Erholung für die verschiedenen Systeme nahe bei einander liegende Werte zeigen. Für das System von Flüssigmetall-Sn und Stahl zeigt jedoch die

Tabelle 1 Ergebnisse der Zuggeschwindigkeit für die Erholung und die Bildungsgeschwindigkeit der Reaktionsschicht für verschiedene Kombinationen von festen und flüssigen Materialien.

Flüssigmetall	Temperatur (°C)	Zuggeschwindigkeit für Erholung (mm/min)	Bildungsgeschwindigkeit für die Reaktionsschicht (mm/min)
Zn	600	100	109
Zn-50Sn-Legierung	600	1	1.2
Zn-50Cd-Legierung	600	—	<0.05
Sn	450	20	7.1

Bildungsgeschwindigkeit für die Reaktionsschicht einen niedrigeren Wert als die Zuggeschwindigkeit zur Zeit der Erholung, aber es kann angenommen werden, daß dies dadurch verursacht wird, daß der Wert ohne Spannung zum Erhalten der Bildungsgeschwindigkeit für die Reaktionsschicht verwendet wurde. Es wird nämlich erwartet, daß die Bildungsgeschwindigkeit der Reaktionsschicht durch Anlegen von Spannung erhöht wird.

Der Vergleich zwischen der Bildungsgeschwindigkeit der Reaktionsschicht und der Zuggeschwindigkeit zur Zeit der Erholung zeigt klar, daß Erhöhung der Zuggeschwindigkeit stärker als die Bildungsgeschwindigkeit der Reaktionsschicht zu größerer LME beiträgt.

4. Zusammenfassung

Sn, Zn-50Sn und Zn-50Cd wurden für Konstantgeschwindigkeitsversuche und Konstantlastversuche verwendet, um hauptsächlich die Abhängigkeit von der Verzerrungsgeschwindigkeit (Zuggeschwindigkeit) für die LME von 0.066-prozentigem Kohlenstoffstahl mit Flüssigmetall-Zn zu klären. Die erhaltenen Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden.

1) Für Systeme ohne Erholung und für Systeme mit Erholung im Bereich, wo keine Erholung stattfindet, spielt die Zuggeschwindigkeit die gleiche Rolle wie die Temperatur. Dementsprechend wird die LME von 0.066-prozentigem Kohlenstoffstahl durch Erhöhung

der Temperatur bzw. der Verzerrungsgeschwindigkeit gefördert.

2) Bei der für Kohlenstoffstahl in Flüssigmetall-Zn-50Sn-Legierung, Sn und Zn festgestellten Erholung handelt es sich um eine Erscheinung, die von der Zuggeschwindigkeit beherrscht wird. Dies bedeutet, daß bei konstanter Temperatur die Erholung für Systeme im Erholungszustand zum Bereich hoher Zuggeschwindigkeiten verschoben wird, während sie für Systeme nicht im Erholungszustand zum Bereich niedriger Zuggeschwindigkeiten verschoben wird.

3) Bei Zuggeschwindigkeiten von der Bildungsgeschwindigkeit der Reaktionsschicht an aufwärts kommt es zu bemerkenswerter LME.

Abschließend möchten die Autoren dem Dozenten Shinpei Sugiura der Fakultät für Naturwissenschaft und Technik der Universität Meijo für seine Unterstützung bei dieser Forschung danken.

Literatur

- 1) Arata, Ohmori, Ogawa, Yoshida und Okamoto: Grundlegende Forschung in Bezug auf die Flüssigmetallversprödung von Stahl (zweiter Bericht), Zeitschrift der Hochtemperaturgesellschaft, Band 11, Nr. 5 (1985), Seiten 175 bis 180.
- 2) D. Horstmann: Der Angriff von eisengesättigten Zinkschmelzen auf Eisen, Stahl und Eisen, 73 (1953), Seiten 659 bis 665.
- 3) Tanaka und Fukunaga: Versprödung von weichem Stahl in Flüssigmetall, Material, Band 18 (1969), Seiten 411 bis 417.
- 4) Nakasa, Takei und Takemoto: Einfluß von Zuggeschwindigkeit, Versuchstemperatur und Ferritkristalldurchmesser auf Flüssigzinksprödigkeit von Zerreißversuchsproben aus weichem Stahl, Material, Band 33 (1984), Seiten 1193 bis 1198.
- 5) Ogawa, Ohmori, Yoshida, Okamoto und Arata: Grundlegende Forschung in Bezug auf die Flüssigmetallversprödung von Stahl (erster Bericht), Zeitschrift der Schweißgesellschaft, Band 52 (1983), Seiten 56 bis 61.
- 6) M.G. Nicholas, C.F. Old und B.C. Edwards: Zusammenfassung der Literatur, die Flüssigmetallversprödung beschreibt. AERE-R 9199 (1978), Seiten 1 bis 74.
- 7) D. McLean (Ed.): Korngrenzen in Metallen, Oxford at the Clarendon Press (1957), Seiten 131 bis 138.
- 8) M. Hansen und K. Anderko (Ed.): Beschaffenheit von binären Legierungen, McGRAW-HILL (1958), Seite 1266.