

Gallus Rehm und Ulf Nürnberger, Stuttgart

Technologische Eigenschaften kaltgezogener und nachträglich feuerverzinkter Spannstähle

Mitteilung des Lehrstuhls für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart

Bericht Nr. 1944 des Werkstoffausschusses des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute*) und Bericht Nr. 77 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V.**)

Zug-, Hin- und Herbiege-, Dauerschwing- und Relaxationsversuche an feuerverzinkten Drähten und Litzen und vergleichende Untersuchungen am unverzinkten Ausgangswerkstoff.

Technological properties of cold-drawn and subsequently hot-dip galvanized prestressed steels

Tension tests, reverse bend tests, fatigue tests, and relaxation tests on hot-dip galvanized wires and strands and comparative investigations on the ungalvanized initial steels.

Propriétés technologiques d'aciers précontraints étirés à froid et galvanisés par trempé postérieurement

Essais de traction, essais de flexion alternée, essais de fatigue et essais de relaxation sur des fils et torons galvanisés par trempé et études comparatives sur les aciers initiaux non galvanisés.

Bei einer im Vergleich zu unverzinkten Spannstählen gleichberechtigten Anwendung feuerverzinkter Spannstähle muß vorausgesetzt werden, daß durch den Verzinkungsvorgang die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Stahls nicht beeinträchtigt werden. Beim Feuerverzinken von Drähten wird häufig eine Änderung der mechanischen Kennwerte des Ausgangswerkstoffs festgestellt^{1) bis 4)}, die in erster Linie den veränderten Oberflächeneigenschaften und der Wärmebehandlung im Zinkbad zugeschrieben wird. Übereinstimmend wird berichtet, daß die Dauerschwingfestigkeit hochfester Drähte durch ein Feuerverzinken gemindert wird^{3) bis 7)}.

Erste Vorversuche an feuerverzinkten, handelsüblichen Spannstählen haben gezeigt⁸⁾, daß als Folge der Verzinkung (Wärmeeinwirkung, Ausbildung der Grenzfläche Stahl/Zink) die Festigkeits- und Umformeigenschaften der Spannstähle unter Umständen derart verändert werden können, daß eine Einstufung in die handelsüblichen Spannstahlklassen nicht mehr möglich ist. Die Dauerschwingfestigkeit der verzinkten Stähle war niedriger als die des unverzinkten Ausgangswerkstoffs, was auf die verzinkungsbedingte Ausbildung der Oberfläche zurückgeführt werden konnte. Die in den Relaxationsversuchen aufgetretenen Spannungsverluste nach 1000 h waren nur geringfügig höher als die entsprechenden zulässigen Werte für gezogene, angelassene Spannstähle.

Inzwischen wurden weitere mechanisch-technologische Untersuchungen an feuerverzinkten, gezogenen Spanndrähten und -litzen sowie am unverzinkten Ausgangswerkstoff durchgeführt. Durch die Anwendung günstiger Verzinkungsbedingungen wurden gegenüber den früheren Untersuchungen⁸⁾ verbesserte Ergebnisse erzielt.

Versuchswerkstoffe

Die vorliegenden Untersuchungen wurden an unverzinkten und verzinkten Spannstählen durchgeführt. Die

Werkstoffe sowie die Behandlung der untersuchten Spanndrähte und -litzen sind in einer vorausgegangenen Veröffentlichung⁹⁾ wiedergegeben. Die unverzinkten Drähte (Werkstoffe 1 und 3) waren nach dieser Behandlung völlig gerade, die verzinkten Drähte (Werkstoffe 2 und 4) dagegen schwach S-förmig gekrümmt. Nach Aussagen des Drahtherstellers ist die leichte Krümmung der Drähte verzinkungsbedingt und kann bei Verwendung neuartiger Verzinkungsanlagen – mit einer geringen Ablenkung des Drahtes im Zinkbad – vermieden werden. Bei einer endgültigen Drahtfertigung ist somit ein Richten der verzinkten Drähte nicht erforderlich. Die Litzen, unverzinkt und verzinkt, waren angelassen (stabilisiert). Beim Abwickeln vom Ring waren diese schwach gekrümmt.

Die chemische Zusammensetzung der Stähle sowie Einzelheiten der Verzinkungsbedingungen sind ebenfalls der vorgenannten Veröffentlichung⁹⁾ zu entnehmen.

Versuchsergebnisse

Zug- und Biegeversuche

Die Ergebnisse der Zugversuche mit Feindehnungsmessungen und der Hin- und Herbiegeversuche an feuerverzinkten Spanndrähten und -litzen sowie am unverzinkten Ausgangswerkstoff sind zusammengefaßt in Bild 1 enthalten. Tafel 1 gibt die Einzelergebnisse der Zugversuche wieder.

Bei den Drähten mit einem Durchmesser von 6 mm wäre der Ausgangswerkstoff in eine Spannstahlklasse St 1600/1800 einzuordnen. Nach dem Feuerverzinken entspricht er etwa einem Spannstahl St 1500/1700. Durch die Wärmebehandlung im Zinkbad nehmen die Werte für R_m , $R_{p0.2}$ und $R_{p0.01}$ um rd. 7, 15 und 16% ab. Die Bruch- und Gleichmaßdehnungen nehmen geringfügig zu, dagegen die Brucheinschnürung und die Biegezahl in vertretbarem Maße ab.

Für die Drähte mit einem Durchmesser von 12 mm treffen im Grunde die gleichen Feststellungen zu, wenn man einmal von der 0,01%-Dehngrenze absieht, die hier durch das Verzinken leicht erhöht wird. Die Zugfestigkeit nimmt durch das Verzinken um 7%, die 0,2%-Dehngrenze um 13% ab. Die sehr hohe Biegezahl (35 Biegungen) des unverzinkten Werkstoffs wird durch das Verzinken prozentual stärker erniedrigt (49%) als

*) Vorgetragen in einer Sitzung von Fachleuten des Werkstoffausschusses am 23. September 1977 in Düsseldorf.

**) Träger des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V.: Deutsche Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung und Oberflächenbehandlung e. V. (DFBO), Düsseldorf; Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), Düsseldorf; Bundesverband Draht e. V., Düsseldorf; Verband Deutscher Feuerverzinkereien, Hagen; Preußag AG Metall, Goslar; Metallgesellschaft AG, Frankfurt; Technische Vereinigung für Schraubverbindungen und Gewinderöhre e. V., Düsseldorf.

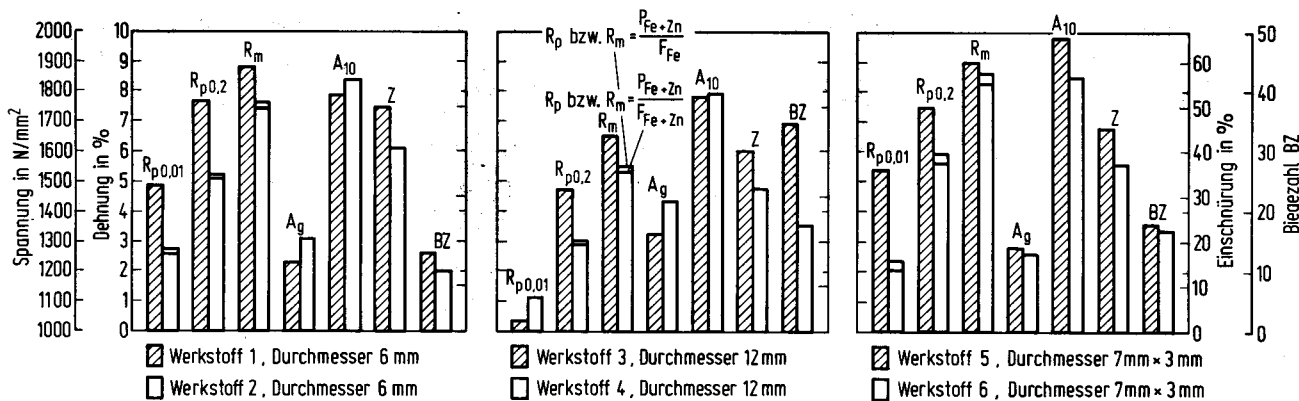


Bild 1. Ergebnisse der Zug- und der Hin- und Herbiegeversuche an unverzinkten und verzinkten Spannstählen

Figure 1. Results of tension tests and reverse bend tests on ungalvanized and galvanized prestressed steels

Tafel 1. Ergebnisse der Zugversuche an unverzinkten und verzinkten Spannstählen

Table 1. Results of tension tests on ungalvanized and galvanized prestressed steels

Werkstoff	Probennummer	Durchmesser mm	$E^1)$	$R_{p0,01}^2)$	$R_{p0,2}^2)$	$R_m^2)$	A_g	A_{10}	Z			
			N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	%	%			
1	1	6,08		1 450	1 729	1 817	2,1	8,0	48,8			
	2			1 486	1 771	1 859	2,8	8,2	51,1			
	3			1 438	1 710	1 830	2,1	7,5	49,7			
	Mittelwert		$2,03 \cdot 10^5$	1 458	1 737	1 835	2,3	7,9	49,9			
2	1	6,10		1 259	1 483	1 715	3,4	8,5	39,1			
	2			1 208	1 487	1 720	3,0	8,4	42,8			
	3			1 249	1 470	1 703	2,9	8,4	40,0			
	Mittelwert		$2,01 \cdot 10^5$	1 239	1 480	1 713	3,1	8,4	40,6			
3	1	12,15		1 042	1 460	1 634	3,4	7,9	42,3			
	2			960	1 459	1 633	3,4	7,6	40,6			
	3			1 061	1 463	1 630	3,2	8,0	38,8			
	4			1 041	1 446	1 618	3,3	7,9	41,1			
	Mittelwert		$2,03 \cdot 10^5$	1 026	1 457	1 629	3,3	7,9	40,7			
4	1	12,19		1 071	1 277	1 511	4,4	8,0	32,7			
	2			1 090	1 260	1 506	4,5	8,0	31,5			
	3			1 083	1 262	1 510	4,2	8,1	32,0			
	Mittelwert		$2,01 \cdot 10^5$	1 081	1 266	1 509	4,4	8,0	32,1			
5	1	$6 \times 3,09$ $1 \times 3,23$		1 463	1 720	1 852	3,3	3,2	10,5	9,3	45,4	46,0
	2			1 570	1 703	1 852	2,3	2,8	9,6	9,8	44,2	45,1
	3			1 484	1 707	1 865	2,9	3,0	9,4	10,0	45,8	44,8
	Mittelwert		$1,92 \cdot 10^5$	1 506	1 710	1 856	2,8 ^{b)}	3,0 ^{b)}	9,8 ^{b)}	9,7 ^{b)}	45,1 ^{b)}	45,3 ^{b)}
6	1	$6 \times 3,08$ $1 \times 3,22$		1 190	1 532	1 796	2,7	2,6	7,8	8,5	39,3	37,9
	2			1 200	1 525	1 791	2,4	3,0	9,1	7,9	35,1	36,4
	3			1 180	1 531	1 790	2,9	1,8	8,5	9,2	37,3	38,3
	Mittelwert		$1,86 \cdot 10^5$	1 190	1 529	1 792	2,7 ^{b)}	2,5 ^{b)}	8,5 ^{b)}	8,5 ^{b)}	37,2 ^{b)}	37,5 ^{b)}

¹⁾ $E = \frac{\Delta P_{Fe+Zn}}{F_{Fe+Zn} \cdot \Delta \epsilon}$ - ²⁾ R_p oder $R_m = \frac{P_{Fe+Zn}}{F_{Fe+Zn}}$ - ³⁾ Am Außendraht ermittelt. - ⁴⁾ Am Kerndraht ermittelt.

bei den dünneren Drähten (23%), jedoch sind die Biegezahlen der verzinkten Drähte mit einem Durchmesser von 12 mm immer noch wesentlich höher als bei den Drähten mit einem Durchmesser von 6 mm. Die dickeren Drähte, vor dem Verzinken als St 1400/1600 einzustufen, sind nach dem Verzinken in keine der für gezogene Drähte gängigen Spannstahlklassen mehr einzuordnen.

Die für die stabilisierte Litze mit einem Durchmesser von rd. 9,5 mm ($\frac{3}{8}$ ") festgestellten Änderungen der Festigkeitswerte sind vergleichbar jenen der Drähte, besonders der dünneren Drähte. Bei der Zugfestigkeit ist die Abnahme 3%, bei der 0,2%-Dehngrenze 10%; die 0,01%-Dehngrenze nimmt um 21% ab. Alle Umformkennwerte der Litzen werden durch das Verzinken geringfügig herabgesetzt. Die Litze der Festigkeitsklasse St 1600/1800 liegt nach dem Verzinken bezüglich der Festigkeitswerte an der unteren Grenze dieser Spannstahlklasse (jedoch wird die geforderte 0,01%-Dehngrenze, 1 340 N/mm², nicht mehr erreicht).

Insgesamt kann festgestellt werden, daß beim Verzinken von Spannstählen mit einer Abnahme der Zugfestigkeit um 5%, der 0,2%-Dehngrenze um 10 bis 15%

und der 0,01%-Dehngrenze um 20% gerechnet werden muß.

Dauerschwingversuche

Die Dauerschwingversuche an unverzinkten und verzinkten Drähten und Litzen wurden bei Oberspannungen von rd. 90% der tatsächlichen 0,2%-Dehngrenze und 55% der tatsächlichen Zugfestigkeit durchgeführt. Die Drähte wurden überwiegend im Hochfrequenzpulsator bei einer Frequenz von rd. 130 Hz geprüft. Ein Teil der Drahtproben (mit 12 mm Dmr. bei Oberspannungen von rd. 0,90 $R_{p0,2}$) wurde aus versuchstechnischen Gründen in einem Niedrigfrequenzpulsator (Frequenz 11 Hz) geprüft. Die Dauerschwingversuche an den Litzen wurden im Niedrigfrequenzpulsator bei Frequenzen von 7 Hz durchgeführt.

Bild 2 zeigt die Versuchsergebnisse in Form eines Smith-Diagramms. Die Ergebnisse verweisen insgesamt auf die Tatsache, daß die dynamische Beanspruchbarkeit verzinkter Drähte und Litzen eher besser als schlechter ist als jene der unverzinkten Ausgangswerkstoffe. Die Verbesserung wird besonders deutlich bei dünnen Drähten und ist geringer bei den geprüften Lit-

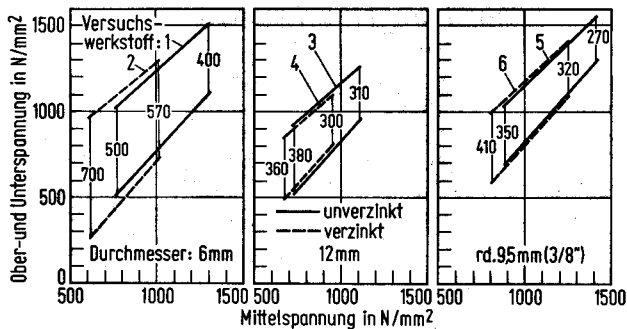


Bild 2. Ergebnisse von Dauerschwingversuchen an unverzinkten und verzinkten, ungerichteten Spannstählen (Smith-Diagramm)

Figure 2. Results of fatigue tests on ungalvanized and galvanized, unstraightened prestressed steels (Smith diagram)

zen. Bei den dickeren Drähten wird die Dauerschwingfestigkeit durch ein Verzinken geringfügig (hier rd. 5%) gemindert.

Relaxationsversuche

Um die Vergleichbarkeit der hier gewonnenen Ergebnisse an unverzinkten und verzinkten Spannstählen mit solchen an anderen handelsüblichen, zugelassenen Spannstahlsorten zu gewährleisten, wurden Versuchsbedingungen gewählt, wie sie in den „Richtlinien für die Zulassungsprüfungen an Spannstählen“⁽¹⁰⁾ niedergelegt sind. Die für diese Versuche verwendeten Prüfeinrichtungen weisen demgemäß die folgenden kennzeichnenden Merkmale auf:

Prüftemperatur	(20 ± 1)°C
Meßlänge	1 000 mm
Genauigkeit der Anfangslast P_i	1% P_i
Genauigkeit der Dehnungsregelung	5 · 10 ⁻⁶

Diese Versuchseinrichtungen sind besonders für die Prüfung des Relaxationsverhaltens von Spannstählen entwickelt worden und zeichnen sich daher durch eine lange zeitliche Konstanz der aufgeprägten Dehnung aus. Die Kraft wird über eine Kraftmeßdose mit einem manuellen Präzisionskompensator gemessen.

Zum Einbau der Proben wurden diese mit einer Vorlast entsprechend $R_0 \geq 0,05 R_i$ (das ist die Anfangsspannung) belastet.

Die Belastung wurde kontinuierlich aufgebracht mit

Lastaufbringungszeit	5 min
Haltezeit	2 min.

Die Versuchsdauer betrug mehr als 10 000 h. Aus diesen Versuchsergebnissen wurde das Relaxationsverhalten für 10⁶ h (114 Jahre) abgeleitet. Die meisten Theorien gehen davon aus, daß von einer gewissen Zeit an die Relaxation geradlinig mit dem Logarithmus der Zeit zunimmt⁽¹¹⁾.

$$\log \frac{\Delta R_i}{R_i} = \log \frac{\Delta R_2}{R_i} + K (\log t_1 - \log t_2).$$

Hierin bedeuten R_i die Anfangsspannung und ΔR_i und ΔR_2 den Spannungsverlust infolge Relaxation zu der angegebenen Zeit; die Größe K , die von der Spannstahlsorte abhängt, gibt den Anstieg der Geraden nach der Zeit an. Tatsächlich muß die Relaxationskurve, dargestellt im doppeltlogarithmischen Maßstab, einen asymptotischen Verlauf haben, weil die Relaxationsverluste nicht > 100% sein können. Der tatsächliche Relaxationsverlust bei 10⁶ h (114 Jahre) wird daher immer

kleiner sein, als er sich aus einer linearen Extrapolation ergibt.

Die Relaxationswerte für 10³ und 10⁶ h (für Anfangsspannungen $R_i = 0,6$ und $0,7 R_m$) sind in Tafel 2 enthalten.

Tafel 2. Ergebnisse der Relaxationsversuche an unverzinkten und verzinkten Spannstählen

Table 2. Results of relaxation tests on ungalvanized and galvanized prestressed steels

Werkstoff ¹⁾	Spannungsabfall ΔR nach 10 ³ h gemessen für $R_i = 0,6 R_m$		10 ⁶ h extrapoliert für $R_i = 0,6 R_m$	
	%		%	
1 u	6,8	11,0	13,6	18,7
2 v	5,5	12,8	9,9	21,0
3 u	5,8	10,2	10,7	15,9
4 v	4,3	10,6	8,9	16,0
5 u	1,8	3,2	3,3	5,7
6 v	9,4	10,7	15,5	16,3

¹⁾ u bedeutet unverzinkt, v bedeutet verzinkt.

Demnach nimmt die Relaxation erwartungsgemäß mit der Vorspannung zu. Bei den Drähten ist die Relaxation der verzinkten Werkstoffe für Vorspannungen von $0,7 R_m$ etwas größer, für Vorspannungen von $0,6 R_m$ dagegen etwas kleiner als bei den unverzinkten Werkstoffen. Insgesamt gesehen, weisen die unverzinkten und verzinkten Drähte ein vergleichbares Relaxationsverhalten auf. Bei den Litzen ist der Spannungsabfall bei den verzinkten Ausführungen um einige Größenordnungen höher als bei den unverzinkten. Für Vorspannungen von $0,7 R_m$ entspricht die Relaxation der verzinkten Litzen jener von verzinkten Drähten; bei Vorspannungen von $0,6 R_m$ ist die Relaxation der verzinkten Litzen sogar erheblich größer als die verzinkter Drähte.

Erörterung der Versuchsergebnisse

Aufgrund der Wärmebehandlung im Zinkbad werden die Festigkeitswerte verzinkter Spanndrähte und -litzen gegenüber jenen der unverzinkten Ausgangsdrahte gemindert. Die festgestellten Minderungen sind für R_m rd. 5%, für $R_{p0,2}$ rd. 10 bis 15% und für $R_{p0,01}$ bis zu 20%. Für verzinkte Drähte mit Durchmessern von 12 und 6 mm und mit Festigkeiten entsprechend St 1400/1600 oder St 1500/1700 wäre somit ein unverzinkter Ausgangswerkstoff etwa entsprechend St 1700/1800 oder St 1800/1900 erforderlich. Zur Zeit ist es jedoch nicht möglich, Drähte der Festigkeitsklasse St 1700/1800 mit einem Durchmesser von 12 mm herzustellen. Zur Einhaltung der Festigkeitsklasse von St 1600/1800 bei verzinkten Litzen sollte ein unverzinkter Ausgangswerkstoff verwendet werden, der an der oberen Grenze dieser Festigkeitsklasse liegt, also für $R_{p0,2}$ rd. 1 710 bis 1 760 N/mm² und für R_m rd. 1 860 N/mm² aufweist.

Durch das Verzinken ändern sich die Umformkennwerte der Spannstähle nur geringfügig.

Das Dauerschwingverhalten der verzinkten Spanndrähte und -litzen ist eher besser als schlechter als jenes der unverzinkten Ausgangswerkstoffe. Diese Feststellung steht im Widerspruch zu Ergebnissen des Schrifttums – das nach einem Feuerverzinken überwiegend eine Abnahme der Dauerfestigkeit aufweist – und zu eigenen Versuchsergebnissen⁸⁾. Bei den bisherigen Untersuchungen an verzinkten Spanndrähten hatte sich herausgestellt, daß in erster Linie die durch das Beizen bedingten Veränderungen der Grenzfläche Stahl/Zink

und Zinkeinwanderungen im Stahl für den Abfall der Dauerfestigkeit verantwortlich sind. Bei den hier untersuchten Spannstählen wurden keine derartigen Oberflächenfehler festgestellt. Die von anderen Verfassern entwickelte Theorie⁴⁾ 12), daß beim Richten oder Pulsieren der Drähte in der Hartzinkschicht entstehende Risse infolge ihrer Kerbwirkung zu einer Abnahme der Dauerschwingfestigkeit führen müssen, wird durch die hier vorgelegten Ergebnisse widerlegt.

Nach eigener Auffassung sind die in der vorliegenden Arbeit festgestellten Verbesserungen der dynamischen Belastbarkeit feuerverzinkter Spannstähle gegenüber unverzinkten unter anderem auf die Schutzwirkung des Zinks zurückzuführen. Aus zahlreichen Untersuchungen aus dem Schrifttum ergibt sich, daß schon die umgebende Luft als ein grenzflächenaktives, die Dauerschwingfestigkeit herabsetzendes Medium angesehen werden muß, das – gegenüber dem Vakuum – die dynamische Belastbarkeit metallischer Werkstoffe herabsetzt; Schutzschichten auf dem Stahl können deshalb das Dauerschwingverhalten verbessern. Die diesbezügliche Schutzwirkung des Zinks wurde an anderer Stelle bereits mehrfach nachgewiesen¹³⁾. Bei den verzinkten Litzen sind die Zinkauflagen zudem in der Lage, die (bei unverzinkten Litzen) im Bereich der aufeinanderreibenden Drähte auftretende und einen frühzeitigen Dauerbruch auslösende Reibkorrosion zu mindern¹⁴⁾. Die Zinkauflage wirkt wie eine Schmierschicht und behindert den Sauerstofftransport zur Stahloberfläche. Die festgestellte Verbesserung des Dauerschwingverhaltens der verzinkten, gezogenen Spannstähle gegenüber unverzinkten kann auch auf die thermische Wirkung des Zinkbades zurückgeführt werden, die zu einem Abbau der auch bei angelassenen Drähten noch vorhandenen Zugeigenspannungen führt¹⁵⁾.

Unverzinkte und verzinkte Spanndrähte besitzen ein vergleichbares Relaxationsverhalten. Bei Vorspannungen von 0,6 R_m sind die verzinkten Drähte geringfügig besser als unverzinkte, bei höheren Vorspannungen von 0,7 R_m dagegen etwas schlechter. Verzinkte Litzen haben ein den verzinkten Drähten vergleichbares Relaxationsverhalten. Gegenüber unverzinkten Litzen sind die Relaxationswerte bei den verzinkten somit beträchtlich höher. Diese bereits von anderen Verfassern¹⁶⁾ festgestellte Tatsache ist darauf zurückzuführen, daß der Stabilisierungseffekt bei diesen verzinkten Litzen nicht wirksam wird.

* * *

Diese Untersuchung wurde mit Unterstützung des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V. sowie mit Mitteln der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen durchgeführt, wofür auch an dieser Stelle gedankt sei.

Zusammenfassung

An Spannstählen mit rd. 0,75% C, 0,2% Si und rd. 0,75 bis 0,9% Mn in Form von Draht mit Durchmessern von 6 und 12 mm und Litzen mit einem Durchmesser von rd. 9,5 mm ($\frac{3}{8}$ ") wurden Untersuchungen im unverzinkten und verzinkten Zustand durchgeführt, um den Einfluß des Verzinkens auf die mechanischen und technologischen Eigenschaften zu ermitteln. Die Prüfungen umfaßten den Zugversuch, den Hin- und Herbiegeversuch sowie den Dauerschwing- und den Relaxationsversuch.

Es zeigte sich, daß beim Verzinken von Spannstählen mit einer Abnahme der Zugfestigkeit um 5%, der 0,2%-Dehngrenze um 10 bis 15% und der 0,01%-Dehngrenze um 20% gerechnet werden muß. Auch wird hierbei die Biegezahl im Hin- und Herbiegeversuch bei den dickeren Drähten um rd. 50% und bei den dünneren Drähten um rd. 25% erniedrigt.

Die Ergebnisse der Dauerschwingversuche verdeutlichen, daß die dynamische Beanspruchbarkeit verzinkter Drähte und Litzen im Mittel etwas besser als jene der unverzinkten Ausgangswerkstoffe ist.

In den Relaxationsversuchen weisen die unverzinkten und verzinkten Drähte ein vergleichbares Verhalten auf. Bei den Litzen hingegen ist der Spannungsabfall im verzinkten Zustand um einige Größenordnungen höher als bei den unverzinkten Ausführungen.

Summary

Prestressed steels with about 0.75% C, 0.2% Si and about 0.75 to 0.9% Mn in form of 6 to 12 mm dia wires and about 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ ") dia strands have been investigated in ungalvanized and galvanized states in tension tests, reverse bend tests, fatigue tests, and relaxation tests in order to determine the influence of galvanization on the mechanical and technological properties.

It was found that galvanization of prestressed steels entails a decrease of tensile strength by 5%, of 0.2% proof stress by 10 to 15% and of 0.01% yield limit by 20%. The number of bending cycles in the reverse bend test is lowered in case of the thick wires by about 50% and with the thin wires by about 25%.

The results of the fatigue tests show that the dynamic loadability of galvanized wires and strands was somewhat better than that of the ungalvanized initial steels.

In the relaxation tests, the ungalvanized and galvanized steels exhibit a similar behaviour. With the strands, however, the decrease of stress is in galvanized state higher by some magnitudes than with ungalvanized types.

Schrifttum

- 1) Krautmacher, H., u. P. Funke: Stahl u. Eisen 85 (1965) S. 1713/22.
- 2) Horstmann, D.: Stahl u. Eisen 86 (1966) S. 1481/86.
- 3) Nünninghoff, R.: Stahl u. Eisen 86 (1966) S. 1300/13.
- 4) Vater, M., W. Weidenhaupt u. R. Prinz: Draht-Welt 56 (1970) S. 33/43.
- 5) Hempel, M.: Draht 6 (1955) S. 119/28 u. 178/83.
- 6) Hempel, M., u. D. Horstmann: Arch. Eisenhüttenwes. 42 (1971) S. 909/18.
- 7) Becker, K.: Stahl u. Eisen 92 (1972) S. 873/80.
- 8) Rehm, G., U. Nürnberger u. G. Rieche: In: Verhalten von verzinkten Spannstählen und Bewehrungsstählen. Berlin 1974. (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton. H. 242.) S. 7/44.
- 9) Rehm, G., u. U. Nürnberger: Stahl u. Eisen 98 (1978) S. 392/98.
- 10) Richtlinien für die Zulassungsprüfungen an Spannstählen, Fassung Juli 1971. Hrsg.: Institut für Bautechnik. Berlin 1971.
- 11) Sitzung Arbeitsgruppe „Spannstahlbestimmungen im SVA Spannstähle“ am 5. Nov. 1975 in Rheinhausen. TOP 5 Beratungsunterlage AA. Verant. SVA Spannstähle am Institut f. Bautechnik, Berlin.
- 12) Hempel, M., u. D. Horstmann: Stahl u. Eisen 82 (1962) S. 1769/81.
- 13) Forrest, P. G.: Fatigue of metals. Oxford/London/New York/Paris 1962. S. 225. (Lit. 400–402)
- 14) Rehm, G., u. U. Nürnberger: Metallische Verankerungen für dynamisch beanspruchte Zugglieder. Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 64 der Universität Stuttgart. Schriftenreihe des SFB 64 demnächst.
- 15) Matting, A., u. H. Wolf: Arch. Eisenhüttenwes. 33 (1962) S. 217/21.
- 16) Cahill, T., u. K. Sachs: Neue Hütte 16 (1971) S. 548/54.