

Langzeitverhalten infrarotgeschweißter Rohrleitungssysteme aus PVDF und PP – Teil 2

Long-term performance of infrared welded PVDF and PP piping systems – part 2

Der erste Teil des Beitrages beschäftigte sich mit der allgemeinen Verfahrensbeschreibung des Infrarot-Heizelementstumpfschweißens sowie den mit diesem Verfahren erreichbaren Schweißfaktoren für den Werkstoff PVDF. Im vorliegenden zweiten Teil werden Zeitstanduntersuchungen an Infrarot- und Heizelementstumpfschweißungen erläutert, die an unterschiedlichen Polypropylenformmassen durchgeführt wurden. Darüber hinaus wird über die laufenden Untersuchungen an IR-Schweißungen mit dem Werkstoff PVDF berichtet.

The first part of this article examined the general process description for infrared heated-tool butt welding and the welding factors achievable for PVDF using this welding method. This second part now looks at creep strength tests performed on infrared and heated-tool butt welds carried out on various polypropylene moulding compounds. Ongoing studies into IR welding of PVDF are also described.

In den DVS-Richtlinien zum Fügen von Kunststoffen sind die Verfahren und die Durchführung von Heizelement-Stumpfschweißverbindungen an PP und PVDF beschrieben (DVS 2207 Teile 11 und 15). Für die Infrarot-Heizelementstumpfschweißung werden in den aktuell gültigen Richtlinien keine Angaben gemacht. Die vorhandenen Angaben zur Durchführung von Infrarot-Schweißungen beruhen auf Untersuchungen und Erfahrungswerten von Halbzeug- und Maschinenherstellern sowie Anwendern. Unter den Infrarot-Schweißmethoden haben sich zwei verschiedene Technologien in der Praxis durchgesetzt. Neben der zuerst entwickelten weggesteuerten Methode (HS-IR-w) vereint die neuere druckgesteuerte IR-Technologie (HS-IR-d) die Vorzüge des berührungslosen Schweißens mit der bewährten HS-Schweißtechnik. Beide Verfahren wurden in Teil 1 des Fachbeitrages bereits eingehend erläutert.

Die Tatsache, dass die IR-Technologie nicht mehr nur bei Reinstmedienanwendungen, sondern mittlerweile auch verstärkt im chemischen Apparate- und Anlagenbau eingesetzt wird, hat dazu geführt, dass seitens des DVS eine Richtlinie erarbeitet wurde, die sich mit dem Thema befasst. Diese Richtlinie liegt derzeit als Entwurf (DVS 2207 Teil 6) vor.

Die Werkstoffe

Beide in diesem Fachbeitrag behandelten thermoplastischen Werkstoffe haben sich in verschiedenen Modifikationen in den vergangenen Jahren für Anwendungen mit aggressiven Medien bewährt. Neben Applikationen in selbsttragenden Systemen werden Rohrsysteme aus beiden Rohstoffen auch in Verbundbauweise mit Glasfaserarmierung eingesetzt. Aufgrund der erheblichen Unter-



Bild 1: IR-geschweißte Rohrleitungen aus PP-R

Fig. 1: IR-welded PP-R pipes

schiede im Rohstoffpreis kann PP heute als Standardthermoplast bezeichnet werden, wohingegen PVDF nur bei besonderen Anforderungen (z. B. Auslaugverhalten, Oberflächen-güte, hochkonzentrierte Säuren, Temperaturen oberhalb 90 °C) zum Einsatz kommt.

Diese Werkstoffe zeichnen sich durch ihre besonderen Eigenschaften, ihre Anwendungssicherheit und die damit verbundenen Betriebsvorteile für die Anlagen aus (**Bild 1**).

Werkstoff Polypropylen (PP)

Die Herstellung von Polypropylen durch Polymerisation von Propylen mit stereospezifisch wirkenden Katalysatoren durch G. Natta im Jahr 1954 stellte die Grundlage für die industrielle Massenproduktion von Polypropylen sehr regelmäßiger Struktur dar. Polymere des Propylens (Propens) sind zwar schon viel länger bekannt, konnten aber aufgrund mangelnder Kristallinität nicht als technische Massenkunststoffe angewendet werden.

Bei der Polymerisation kommt es durch sterische Einflüsse mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Kopf-Schwanz-Kopf-Bindungen des Propens, d. h., die Methylgruppe (CH₃-Gruppe) wird am zweiten C-Atom des Makromoleküls angelagert. Je nach räumlicher Anord-



Dr.-Ing. Joachim Hessel

Hessel Ingenieurtechnik GmbH,
Roetgen
Tel. 02471/920220
E-Mail: info@hessel-ingtech.de



Dipl.-Ing. Thomas Frank

Frank GmbH, Mörfelden
Tel. 06105/282-59
E-Mail: t.frank@frank-gmbh.de



Ing. Albert Lueghamer

AGRU Kunststofftechnik GmbH,
Bad Hall
Tel. +43(0)7258/7900
E-Mail: l@agru.at

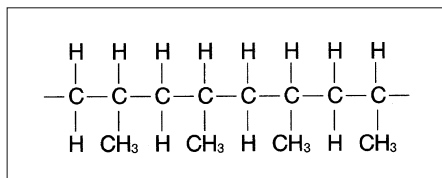


Bild 2: Isotaktisches Polypropylen
Fig. 2: Isotactic polypropylene

nung dieser Methylgruppe unterscheidet man verschiedene stereoisomere Formen des Polypropylens. Von großtechnischer Bedeutung ist lediglich hochisotaktisches Polypropylen, bei dem die sterische Konfiguration des tertiären C-Atoms immer gleich ist (**Bild 2**). Infolge dieser Anordnung bildet sich eine Helixstruktur aus, die auch als vorkristalliner Ordnungszustand bezeichnet werden kann.

Die Helices bilden beim Abkühlen der Schmelze Kristallite (10 – 50 nm), die selbst verschiedene sphärolitische Überstrukturen (10³ – 10⁵ nm) ausbilden können. Die mechanischen Eigenschaften von Polypropylen werden auch von der Größe und Art der Kristallstrukturen beeinflusst. Dieser Prozess kann z. B. durch Nukleierung (Keimbildung) beeinflusst werden (**Bild 3**). Diese Kristallite entstehen einerseits während des Produktionsprozesses, andererseits findet beim Schweißen im Nahtbereich eine erneute Kristallisation statt. In wie weit dies Einfluss auf die Eigenschaften einer Schweißnaht hat, wird später in diesem Beitrag noch erörtert.

Der regelmäßige Aufbau der Molekülketten begünstigt das Entstehen kristalliner Bereiche. Die Makromoleküle werden jedoch selten in ganzer Länge in einen Kristallit eingebaut, da sie auch nichtisotaktische Anteile enthalten. Außerdem entstehen – besonders bei hohem Polymerisationsgrad – amorphe Anteile durch Verschlaufungen der Ketten in der Schmelze. Der kristalline Anteil liegt üblicherweise bei 45 bis 65 %. Der teilkristalline Aufbau von PP bewirkt wegen der hohen Sekundärkräfte im kristallinen Bereich eine hohe Steifigkeit und durch die Beweglichkeit der Makromoleküle in der amorphen Phase Flexibilität und Zähigkeit des Werkstoffes.

Das isotaktische Polypropylen, das heute im industriellen Anlagenbau eingesetzt wird, lässt sich in drei verschiedene Polymertypen einteilen. Die Homopolymere, die sich ausschließlich aus Propylen-Molekülen zusammensetzen, und die beiden verschiedenen Copolymere, bei denen in Blöcken (Polypropylen Blockcopolymerisat) oder statistisch verteilt (Polypropylen Randomcopolymerisat) Ethylenmonomere eingebaut werden.

Für den industriellen Rohrleitungsbau am interessantesten sind PP-R (auch PP Typ 3) und PP-H (auch PP Typ 1). PP-B (PP Typ 2) kommt nur in Ausnahmefällen zum Einsatz und wird in diesem Beitrag nicht weiter behandelt.

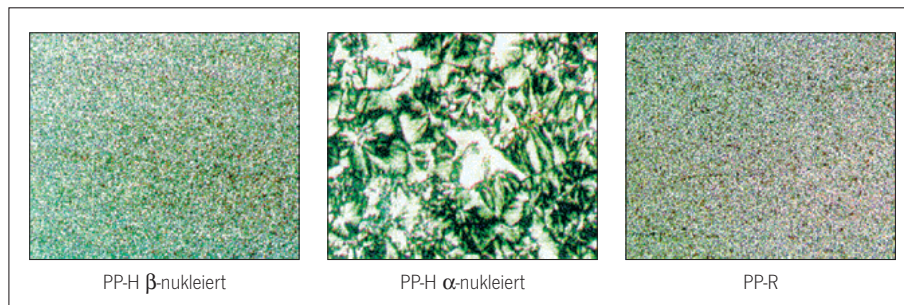


Bild 3: Lichtmikroskopische Aufnahmen verschiedener PP-Typen verdeutlichen die unterschiedlichen Sphärolitstrukturen
Fig. 3: Light-microscope images of various PP types illustrate the differing spherulite structures

Die PP-Homopolymere besitzen eine hohe Isotaktizität und somit Kristallinität, daraus resultieren eine hohe Steifigkeit, Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit. Die amorphen Bereiche beginnen bei etwa 0 °C einzufrieren. Unterhalb dieser Temperatur ist PP-H relativ spröde. Die Homopolymere kristallisieren bevorzugt in der Form von Alpha-(α-)Sphäroliten. Die Zugabe spezieller Nukleierungsmittel ermöglicht jedoch die Bildung der flexibleren Beta-(β-)Sphärolite (**Bild 3**), die eine erhöhte Schlagzähigkeit für das Homopolymer zur Folge haben.

Die gleichzeitige Polymerisation von Propen mit Ethen erlaubt eine statistische Verteilung der eingebauten Comonomere (PP-R). Damit wird die Helixstruktur der isotaktischen Polymerkette unterbrochen, wodurch die Kristallinität absinkt. Die Folge gegenüber PP-H ist eine größere Zähigkeit und Flexibilität bei Abnahme von Steifigkeit und Härte. Die maximalen Einsatztemperaturen von PP-R sind besonders bei langen Beanspruchungszeiten einer der wesentlichen Vorteile dieses PP-Typen.

Zur Schaffung qualitativ hochwertiger Endprodukte ist es notwendig, das PP-Basispolymer durch Zugabe von Additiven zu modifizieren. Dabei unterscheidet man Funktions-, Füll- und Verstärkungsstoffe. Formmassen für den Einsatz im Rohrleitungsbau (Rohre

und Formteile) werden besonders hinsichtlich ihrer Dauerbeständigkeit gegen Druck, Temperatur und Chemikalieneinwirkung sowie ihrer Schweißbarkeit optimiert. Wichtig ist besonders bei UV-Beanspruchung die Vermeidung der Oxidation durch Antioxidantien, wodurch der thermo- und photooxidative Abbau, der die Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften zur Folge hat, für einen gewünschten Zeitraum verhindert werden kann. Die für Polypropylen typische kieselgraue Farbe (RAL 7032) wird durch die Beimengung von Ruß und einem weißen Farbpigment (TiO₂) eingestellt.

Weitere Additive werden besonders zur Erzielung einzelner Werkstoffeigenschaften zugeführt, dabei müssen jedoch oftmals Abstriche bei anderen Kriterien in Kauf genommen werden. Neben den Standardwerkstoffen wird speziell für Reinstmediensysteme PP auch ohne Farbpigmente angeboten. Dieses PP-natur (PP-n) hat die gleichen Eigenschaften wie die grau eingefärbten PP-Werkstoffe, es ist jedoch nicht UV-beständig.

Allgemeine Eigenschaften von Polypropylen

Polypropylen für den industriellen Rohrleitungsbau hat folgende Werkstoffeigenschaften:

Tab. 1: Eigenschaften der Polymertypen im Vergleich

Table 1: Comparative assessment of the properties of various polymer types

Eigenschaft	Norm	Einheit	PP-H	PP-R
Dichte bei 23 °C	DIN 53479 ISO 1183	g/cm ³	0,91	0,91
Streckspannung	DIN 53495	N/mm ²	30	25
Streckdehnung	DIN 53495	%	> 8	12
Reißdehnung	DIN 53495	%	> 50	> 500
E-Modul (Zugversuch)	ISO 178	N/mm ²	1200	800
Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C (nach Charpy)	DIN/ISO 179	kJ/m ²	6-30	ca. 30
Schlagzähigkeit bei -30 °C (nach Charpy)	DIN/ISO 179	kJ/m ²	30 ¹⁾	45
Kristallit-Schmelztemperatur	DIN 53 736	°C	160 -165	150 - 155
Thermischer Längenausdehnungs-koeffizient	DIN 53 752	1/°C	1,6 x 10 ⁻⁴	1,6 x 10 ⁻⁴

¹⁾ β-nukleierte Formmassen können höhere Werte aufweisen

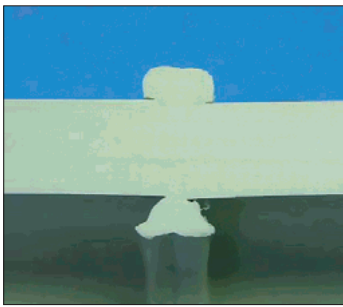


Bild 4: HS-Schweißung PP-H

Fig. 4: HT welding of PP-H

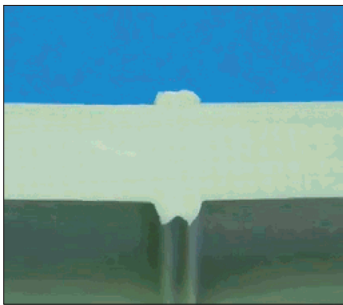


Bild 5: IR-Schweißung PP-R

Fig. 5: IR welding of PP-R

- niedrige Dichte von 0,91 g/cm³ (PVC 1,40 g/cm³),
- hohe Zeitstandfestigkeit,
- sehr gute chemische Beständigkeit,
- Beständigkeit gegenüber Mikroorganismen,
- hohe Alterungsbeständigkeit,
- gute Schweißbarkeit,
- sehr gute Abrasionsbeständigkeit,
- nicht elektrisch leitend,
- ausgezeichnete akustische Dämpfungseigenschaften,
- besonders die Copolymere (PP-B und PP-R) sind sehr gut thermoplastisch verformbar (z. B. durch Tiefziehen).

Diese Aufzählung gilt zunächst für alle derzeit Verwendung findenden Formmassen. Die Zeitstandfestigkeit und die Beständigkeit gegenüber Chemikalienbeanspruchung weisen genau wie die Widerstandsfähigkeit gegenüber langsamem Risswachstum, je nach Polymertyp und vorhandenen Additiven, Unterschiede auf [1].

Tabelle 1 fasst einige Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit vom Polymertyp zusammen.

Zeitstandfestigkeit der verschiedenen PP-Typen

Bei der Bestimmung der zulässigen Betriebsüberdrücke von Rohrleitungssystemen aus PP wird die Zeitstandfestigkeit als Berechnungsgrundlage herangezogen. Sie ist deshalb eine der wichtigsten Eigenschaften von Kunststoffrohren. Die Zeitstandfestigkeit

Bild 6: Moderne IR-Schweißmaschine für Rohraußendurchmesser bis 280 mm

Fig. 6: Modern IR welding unit for external pipe diameters up to 280 mm



beschreibt die Lebenserwartung eines Rohres, das unter Innendruck steht. Dabei hängt bei Thermoplasten die zum Bruch führende Spannung von der Temperatur und der Beanspruchungsdauer ab.

Die Zeitstandfestigkeit wird für verschiedene Temperaturen ermittelt und im Zeitstanddiagramm doppellogarithmisch (Spannung als Funktion der Zeit) dargestellt. In DIN 8078 sind die Mindest-Zeitstandkurven für die drei oben beschriebenen PP-Typen festgelegt. Diese Mindestkurven müssen von allen zur Verwendung kommenden Formmassen erfüllt werden. Dabei werden – abhängig von der Temperatur – an die einzelnen Polymertypen unterschiedliche Anforderungen gestellt.

Besonders bei hohen Temperaturen (die Temperaturobergrenze liegt bei druckbeaufschlagten PP-Rohrsystemen in der Regel bei ca. 95 °C) tritt die unterschiedliche Zeitstandfestigkeit (Belastbarkeit) der einzelnen Polymertypen zu Tage.

DIN 8078 (April 1996) berücksichtigt die Tatsache, dass mittlerweile die Wärmealterungsstabilisatoren für Polypropylen eine hohe Wärmealterungsbeständigkeit ermöglichen. Dadurch wird die generelle Oxidationsempfindlichkeit des tertiären C-Atoms (z. B. im Vergleich zu Polyethylen) ausgeglichen.

Ein ausgezeichnetes Zeitstandverhalten bei höheren Temperaturen besitzt PP-R. Dies ist die Hauptursache für den großen Erfolg von PP-R im Bereich der Warmwasseranwendungen. Aber auch im industriellen Anwendungsbereich können diese Vorteile sinnvoll genutzt werden.

Aufgrund der oben beschriebenen Eigenschaften eignet sich PP besonders für Anwendungen in der chemischen Industrie, wo bei höheren Temperaturen große Anforderungen an die Beständigkeit gegenüber Chemikalien gestellt werden. Für Anwendungen in der Reinstmedientechnik kann PP auch in High-Purity-Qualität eingesetzt werden.

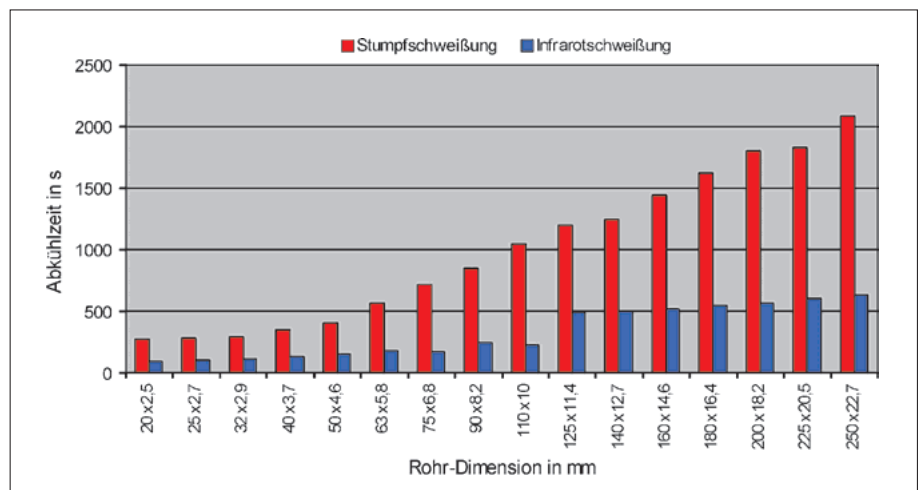


Bild 7: Vergleich der Abkühlzeiten von PP-Schweißungen (HS-/IR-druckgesteuert)

Fig. 7: Comparative assessment of the cooling times for PP welds (HT/IR, pressure controlled)

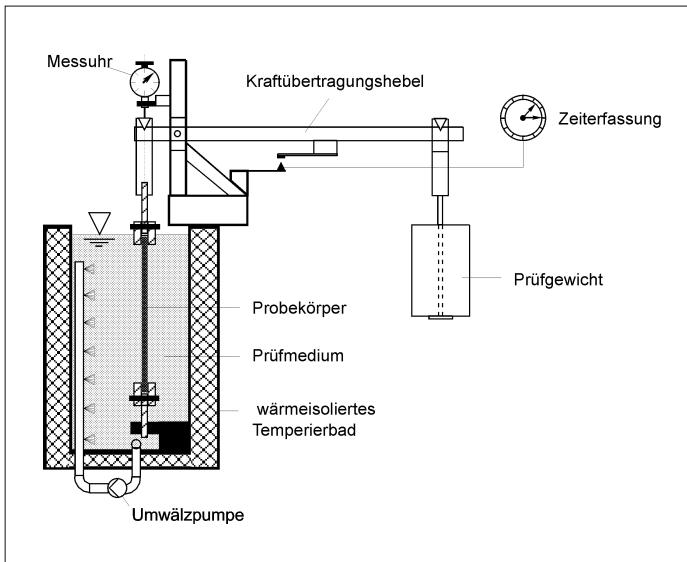


Bild 8: Zeitstand-Zugversuch [2]

Fig. 8: Long-term tensile creep test [2]

dass die Standzeiten bei PP-R mit einem geometrischen Mittelwert von 2451,1 h um ein Vielfaches über den Standzeiten des β -nukleierten PP-H (geometrischer Mittelwert 679,8 h) lagen. Dieser Zusammenhang konnte auch bei den Untersuchungen an geschweißten Proben festgestellt werden. Unabhängig davon, ob die Schweißungen im Heizelement-Stumpfschweißverfahren (HS) oder mittels Infrarottechnik (IR) durchgeführt wurden, liegen die Standzeiten der mit PP-R durchgeführten Schweißungen 200 bis 400 % über den Standzeiten der PP-H-Schweißungen (**Bild 10 und 11**).

Dieser Zusammenhang ist bei unterschiedlichen Prüfspannungen zu beobachten. Weiterhin haben die Untersuchungen ergeben, dass die Prüfzeiten an den infrarotgeschweißten Proben wesentlich über den Standzeiten von Probekörpern lagen, die mit der herkömmlichen Heizelementstumpfschweißung (HS) hergestellt wurden. Diese Abhängigkeit der Schweißnahtfestigkeit vom Schweißverfahren konnte bei beiden untersuchten Werkstoffen gleichermaßen festgestellt werden.

Bestimmt man den Langzeitschweißfaktor an den IR-Schweißungen von PP-R und PP-H, so erhält man bei beiden Werkstoffen einen Wert von > 0,8. Die Begründung dafür, dass PP-H einen vergleichbaren Langzeitschweißfaktor wie PP-R erreicht, liegt in den niedrigeren Standzeiten, die vom PP-H-Grundmaterial erzielt werden. Somit erhält man für das Verhältnis zweier niedrigerer Werte wieder einen vergleichbaren Schweißfaktor. Die absoluten Standzeiten und damit die in der Praxis zu erwartende Lebensdauer sind bei PP-R-Schweißungen wesentlich länger.

Schweißnahteigenschaften und Einflussfaktoren

Das Langzeitverhalten einer Schweißverbindung wird in hohem Anteil durch die Formmasse beeinflusst. Hierbei gilt als wichtiger Einflussparameter das Verhalten im FNCT (Full-Notch-Creep-Test) und der daraus resultierende Widerstand gegen langsames Risswachstum (Kerbempfindlichkeit). Beim

Werkstoff Polyvinylidenfluorid PVDF

Der Werkstoff PVDF wurde bereits im ersten Teil des Fachbeitrages näher beschrieben. PVDF kann mit zwei verschiedenen Prozessen hergestellt werden, durch Suspensions- oder Emulsionspolymerisation. Die unterschiedlichen Ergebnisse beim Schweißen dieser beiden Werkstofftypen wurden bereits diskutiert. Die positiven Ergebnisse sind der Grund dafür, dass in diesem Teil nur Formteile und Rohre aus Suspensions-PVDF betrachtet wurden.

Schweißverfahren im Vergleich

Die Heizelementstumpfschweißung (HS) gemäß DVS 2207 Teil 11 wird seit vielen Jahren für die Schweißung von Polypropylen mit Erfolg eingesetzt. Der besondere Vorteil dieser erprobten Schweißtechnologie ist auch in dem großen schweißbaren Dimensionsbereich gegeben. Dieser klar definierter Schweißprozess, bei dem Temperatur, Druck und Zeit reproduzierbar eingestellt werden können, hat den Einsatz von PP-Rohrsystemen im industriellen Anlagenbau zu einer wirtschaftlichen und sicheren Lösung gemacht (**Bild 4**).

Neue Einsatzbereiche für Polypropylen in der Reinstmedienversorgung haben jedoch neue Anforderungen an die Schweißtechnik gestellt. Reduzierte Innenwülste mit tottraumfreier Wulstausbildung (**Bild 5**) konnten auch bei PP durch den Einsatz der Infrarot- oder berührungslosen Stumpfschweißung (**Bild 6**) gewährleistet werden.

Darüber hinaus haben sich durch den Einsatz dieser neuen Schweißtechnologie weitere Vorteile ergeben, die diese Schweißtechnik auch für den industriellen Anlagenbau empfiehlt:

- reduzierte Schweißzeiten erzielt durch geringere Anwärm- und Kühlzeiten (**Bild 7**) und
- verbesserte Langzeiteigenschaften im Vergleich zur HS-Schweißung.

Langzeitverhalten der untersuchten Werkstoffe und Schweißverbindungen

Wie bereits im ersten Teil dieses Beitrages erwähnt, wird zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von Schweißverbindungen der Zeitstand-Zugversuch nach DVS 2203 Teil 4 als standardisierte Prüfmethode herangezogen (**Bild 8**). Mit dieser Methode wird der Langzeitschweißfaktor ermittelt, den man zusammenfassend als das Verhältnis der Festigkeiten der geschweißten Proben zur ungeschweißten Probe bezeichnen kann (**Bild 9**).

In der Richtlinie DVS 2203 Teil 1 sind die Anforderungen an den Zeitstandzug-Schweißfaktor (f_s) für verschiedene Werkstoffe und Verfahren festgelegt. Für PP ist dort ein Mindestwert von 0,8 gefordert.

Bei den durchgeführten Langzeituntersuchungen hat sich bereits bei der Prüfung der Nullproben (Grundwerkstoff) herausgestellt,

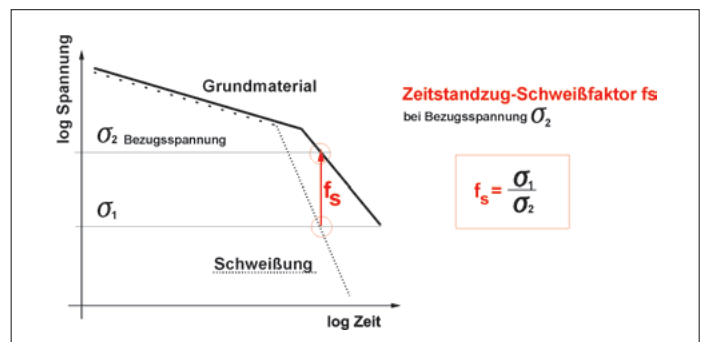


Bild 9: Bestimmung des Schweißfaktors im Zeitstand-Zugversuch

Fig. 9: Determination of the welding factor in the long-term creep tensile test

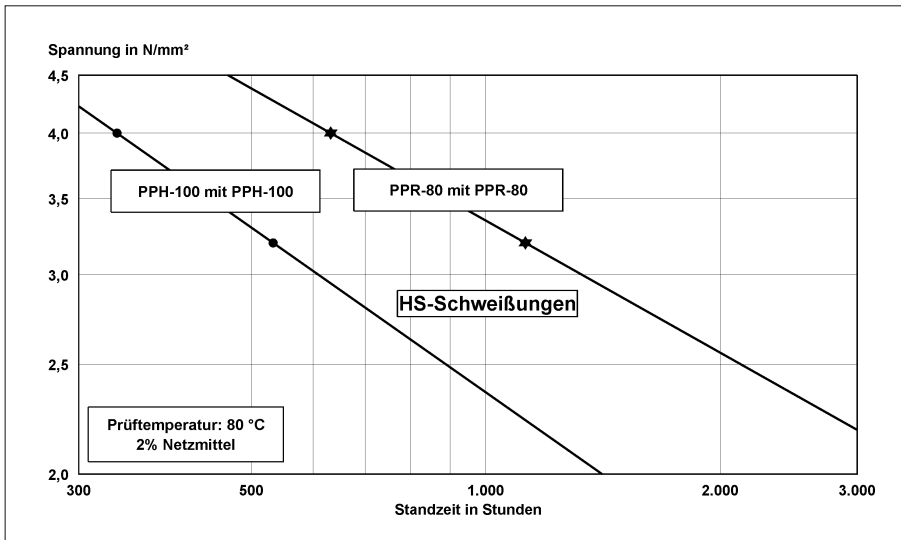


Bild 10: Vergleich der Standzeiten von HS-geschweißten Röhren aus PP-R und PP-H
Fig. 10: Comparative assessment of the service lives of HT-welded PP-R and PP-H pipes

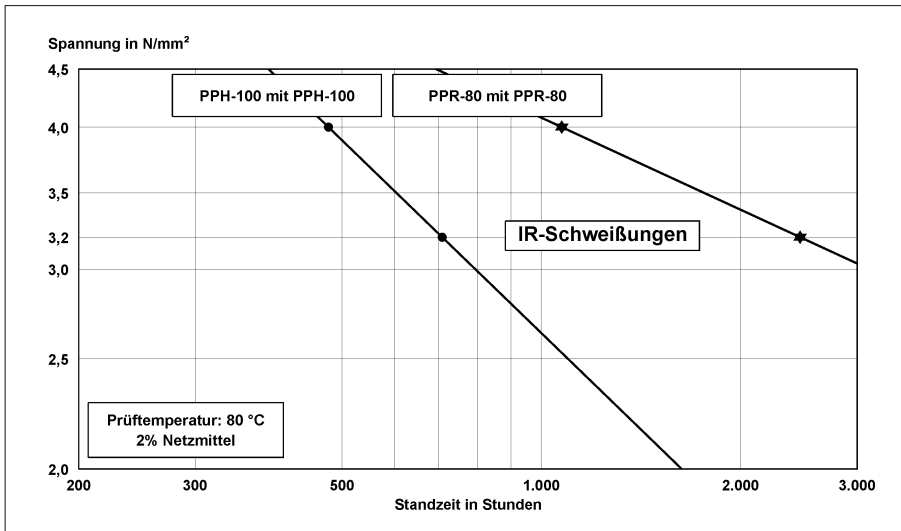


Bild 11: Vergleich der Standzeiten von IR-d-geschweißten Röhren aus PP-R und PP-H
Fig. 11: Comparative assessment of the service lives of IR-d-welded PP-R and PP-H pipes

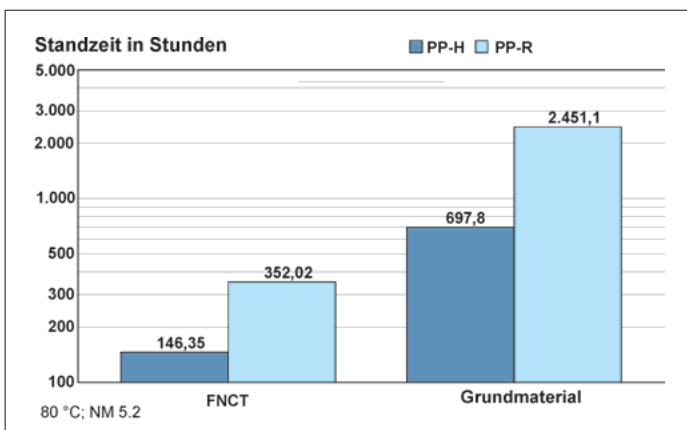


Bild 12: Vergleich der Standzeiten im Zeitstand-Zugversuch von ungekerbten Probekörpern (Nullprobe) und im FNCT

Fig. 12: Comparative assessment of the service lives of unnotched specimens (zero specimens) in the long-term creep tensile test and in the Full Notch Creep Test

FNCT werden Zugproben mit einer definierten umlaufenden Kerbe unter gleichbleibenden Bedingungen auf ihre Kerbempfindlichkeit hin geprüft. Schweißverbindungen aus Werkstoffen mit hoher Standzeit im FNCT und somit hohem Widerstand gegenüber langsamem Risswachstum zeichnen sich durch entsprechend hohe Zeitstandfestigkeiten aus [3].

Diese Korrelation zwischen Zeitstandfestigkeit und hoher Standzeit im FNCT ist auch in **Bild 12** zu erkennen. Der Werkstoff mit der höheren Standzeit der Nullprobe (PP-R) erzielt auch im FNCT die besseren Ergebnisse.

Bei Polypropylen ist darüber hinaus bekannt, dass zu stark ausgebildete Fließlinien in den Heizelementschweißnähten eine Schwächung der Schweißnahtfestigkeit zur Folge haben können [4]. Diese Tatsache kann auch bei den Zeitstand-Untersuchungen an PP festgestellt werden. Im Unterschied zu PE, wo der Zeitstandbruch, ausgehend von der Wulstkerbe, durch das Grundmaterial verläuft, kann bei PP auch ein Bruchverlauf, von der Wulstkerbe ausgehend, entlang der verstreckten Sphärolite auftreten. Bei den untersuchten Werkstoffen hat sich jedoch gezeigt, dass ein Versagen der Schweißung im Zeitstand-Zugversuch normalerweise – ausgehend von der Wulstkerbe – durch das Grundmaterial stattfindet (**Bild 13** und **14** für PP-H sowie **Bild 15** und **16** für PP-R).

Ein weiterer Einflussfaktor ist das gewählte Schweißverfahren, wobei bei Polypropylen die eindeutige Definition der Schweißparameter (Druck, Zeit und Temperatur) in der Schweißzone von entscheidender Bedeutung für die Reproduzierbarkeit der Schweißnahtqualität ist. An anderer Stelle durchgeführte Untersuchungen [5] haben gezeigt, dass druckgesteuerte Infrarottechnik Vorteile besonders bei der Schweißung dickwandiger PP-Rohre aufweist. Der konstante Druckaufbau sowie die Druckregelung während der Abkühlphase sind aufgrund des Schwindverhaltens von PP von grundlegender Bedeutung im Hinblick auf hohe Schweißnahtgüten.

Bei weggesteuerten Schweißprozessen kann es infolge des Materialschwundes während der Abkühlphase zu einer Druckreduzierung in der Schweißzone kommen, die wiederum Zugspannungen in der Schweißnaht erzeugt (siehe auch Teil 1 dieses Beitrages).

Diskussion der Ergebnisse

Neben der unterschiedlichen Kerbempfindlichkeit der untersuchten Werkstoffe, die sich in den erzielbaren Standzeiten im FNCT widerspiegeln, kann auch der Gefügeaufbau der Schweißnaht die Langzeitfestigkeit der Fügeverbindung beeinflussen. Eine Erklärung

rung für die im Vergleich zu PP-H wesentlich höheren Standzeiten von PP-R-Stumpfschweißnähten ist das – infolge des höheren amorphen Anteils – zähere Werkstoffverhalten im Nahtbereich. Dadurch können Spannungsspitzen deutlich besser abgebaut werden. Damit besitzt PP-R offenbar eine deutlich höhere Querfestigkeit im orientierten Material als PP-H.

Darüber hinaus spielt bei β -nukleiertem PP-H ein Rolle, dass der Schmelzpunkt der β -Form ca. 13 °C unter dem der α -Form liegt [6]. Das bedeutet, die β -Form, die thermodynamisch instabiler ist als die α -Form, kann bei einem Abkühlprozess, wie er z. B. während des Schweißens stattfindet, in die α -Form übergehen. Die Nähte eines β -nukleierten PP-H bestehen deshalb zu einem gewissen Teil aus α -nukleiertem PP.

Neben dem Einfluss des Werkstoffes haben diese Untersuchungen auch gezeigt, dass die Infrarot-Schweißtechnik infolge der geringen Plastifizierungstiefe in der Schweißzone und der damit günstigeren Wulstausbildung sowie dem Einsatz präziser Prozessüberwachung durch automatisierten Schweißablauf ein positiver Einflussfaktor für die Schweißnahtgüte ist. Im Vergleich zu den herkömmlichen HS-Schweißungen konnte z. B. bei IR-Schweißungen von PP-R ein Bruchverlauf – ausgehend von der Wulstkerbe – durch das Grundmaterial beobachtet werden (Bild 16). Dieser Bruchverlauf deutet darauf hin, dass der Einfluss des Schweißnahtgefüges durch die IR-Technologie reduziert wird und somit wesentlich höhere Standzeiten realisiert werden können.

Wie im ersten Teil des Beitrages erwähnt, wurden neben den an PVDF-Rohren durchgeführten Prüfungen auch Schweißungen an Formteilen aus Suspensions-PVDF untersucht. Diese Prüfungen sind aufgrund der langen Prüfzeiten noch nicht vollständig abgeschlossen. Die bisher vorliegenden Ergebnisse belegen, dass bei Schweißverbindungen zwischen PVDF-Rohren und -Formteilen ähnlich lange Standzeiten wie bei Rohr-Rohr-Verbindungen erreicht wurden. Die wenigen bisher vorhandenen Brüche zeigen, dass der Bruch jeweils im kerbempfindlichen Material statt findet. Auch bei den Schweißungen zwischen PVDF-Rohren und -Formteilen wurde der Langzeitschweißfaktor > 0,8 mit dem druckgesteuerten IR-Schweißverfahren bestätigt.

Schlussfolgerung

Bei den Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass generell der Langzeitschweißfaktor für IR-Schweißungen aus PP und PVDF mit > 0,8 festgelegt werden kann. Ferner hat sich gezeigt, dass neben der Betrachtung des Langzeitschweißfaktors das effektive Zeitstandverhalten des jeweiligen

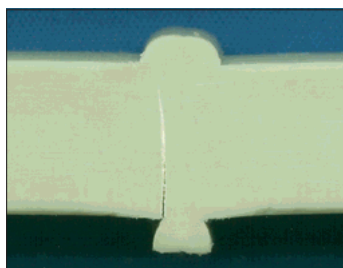


Bild 13: Rissbeginn an einer infrarotgeschweißten Probe aus PP-H

Fig. 13: Inception of cracking in an infrared-welded PP-H specimen

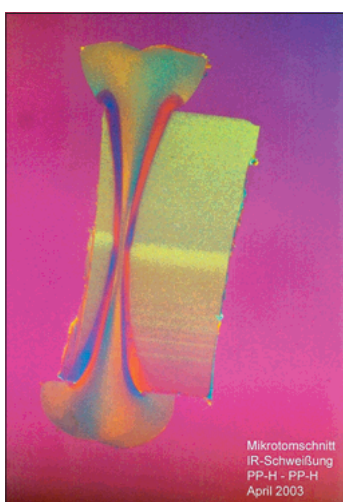


Bild 14: Mikrotomographie einer gebrochenen IR-Schweißprobe aus PP-H

Fig. 14: Microtomograph section of a fractured IR-welded PP-H specimen

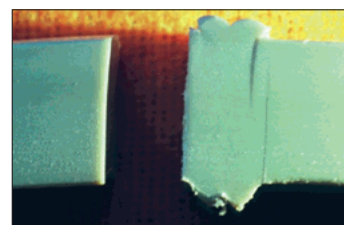


Bild 15: Gebrochene IR-Schweißprobe aus PP-R

Fig. 15: Fractured IR-welded PP-R specimen

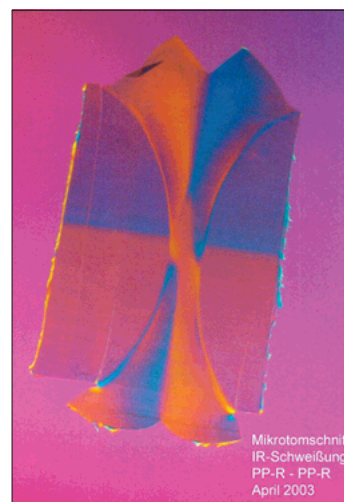


Bild 16: Mikrotomographie einer gebrochenen IR-Schweißprobe aus PP-R

Fig. 16: Microtomograph section of a fractured IR-welded PP-R specimen

Werkstoffes von großer Bedeutung ist. Ein besseres Zeitstandverhalten des jeweiligen Formmassetyps bedeutet bei gleichem Schweißfaktor eine wesentlich höhere Standzeit und damit eine höhere Sicherheit der Schweißverbindung. Bei PVDF werden an Suspensionsformmassen wesentlich höhere Standzeiten erreicht. Bei Polypropylen zeigt sich, dass PP-R hinsichtlich seiner Langzeiteigenschaften gegenüber PP-H deutliche Reserven besitzt.

Sofern die Umgebungsbedingungen den Einsatz des Verfahrens ermöglichen (z. B. Schweißen in Reinräumen), stellt die druckgesteuerte IR-Heizelement-Stumpfschweißung im Vergleich zur konventionellen Heizelementstumpfschweißung nicht nur für PVDF, sondern auch für PP das technologisch bessere Verfahren dar. Die kurzen Anwärmzeiten ohne Kontakt mit dem Heizelement vereinfachen den Schweißprozess. Dadurch ergibt sich eine wesentlich verbesserte Schweißnahtqualität bei reduzierter Schweißspannung. Die IR-Technologie wird bereits

seit rund zehn Jahren mit großem Erfolg eingesetzt. Infrarot-Heizelement-Stumpfschweißmaschinen stehen für die Rohrdimension von 20 bis 315 mm zur Verfügung.

Literatur

- [1] Frank, T.: Unterscheidungskriterien bei Industrierohren aus PP-Homopolymer und PP-Copolymer, 3R international (2000) Nr. 4/5, S. 252-258
- [2] Hessel, J.; Mauer, E.: Zeitstandzugprüfung in wässriger Netzmittellösung, Materialprüfung 36 (1994) 6, Carl Hanser Verlag, München 1994
- [3] Hessel, J.; Larsen C. T.: Neue Erkenntnisse zum Langzeitverhalten von Schweißverbindungen an Kunststoffmantelrohren, 3R international (1997) Nr. 6, S. 283-287
- [4] Egen, U.: Gefügestruktur in Heizelementschweißnähten an Polypropylen-Rohren, Schweißtechnische Forschungsberichte Band 4, Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf 1985
- [5] AGRU: Interner Prüfbericht zu PP-IR-Schweißungen, 2002
- [6] Padden, F. J.; Keith, H. D.: J. Appl. Physics 30 (1959) p. 1479