

Innovative Verbindungstechnik für kritische Bereiche, Teil 2

Klebeverbindungen in der Kältetechnik

Jörg Peters, Monika Knabe, Dr. Jürgen Schenk,
Fritz Liebrecht, Gunnar Henke und Alexander Wirsching

Im ersten Teil dieses Berichtes (KK 3/07, Seite 44) wurde über die Grundlagen der Klebetechnik, die Auswahl für die Kältetechnik geeigneter Klebstoffe und die Vorbereitung entsprechender Klebeverbindungen für die Laborversuche berichtet. In diesem abschließenden Teil werden nun die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt, die zeigen, dass auch in der Kältetechnik technisch sichere Klebeverbindungen herstellbar sind, die allen Anforderungen an die Anlagendichtheit und Zuverlässigkeit entsprechen.

Prüfanordnung „quasistatische Zugprüfung“

Die so, wie in Teil 1 dieses Berichtes (KK 3/07, Seite 44) dargestellt, geklebten Proben wurden nach vollständiger Aushärtung im quasistatischen Zugversuch auf einer Laborprüfmaschine, Bild 12, gemäß nachfolgender Vorschrift auf ihre Verbindungsfestigkeit geprüft.



Bild 12 Prüfeinrichtung: Universalzug/-druckprüfmaschine; Nennzugkraft: 100 kN

Prüfablauf:



- Schritt 1: Einschieben von Passdornen in die Fügeiteilen
- Schritt 2: Schließen der hydraulischen Klemmbacken
- Schritt 3: Aufbringung statische Vorlast (FV = 30 N/50 N)
- Schritt 4: Zugversuch (Traversengeschwindigkeit = 10 mm/min = konst.)
- Schritt 5: Abbruch des Versuchs bei Kraftabfall auf 10% von F_{\max}
- Schritt 6: Ausspannen der Probe

Alterungsuntersuchungen an Klebstoffsubstratproben

Als Abschluss der Laboruntersuchungen wurden gegossene und nach Herstellerangaben ausgehärtete Klebstoffsubstratproben (Bild 14) einer dauerhaften Kältemittelexposition ausgesetzt, um eventuelle Medienschädigung im Stichversuch zu erkunden.

Die nach einer Auslagerungszeit von 28 Tagen (Kältemaschinenöl SEZ32, Kältemittel R407C) bei 120 °C und nachfolgender

zu den Autoren

Jörg Peters,
Bundesfachschule Kälte-Klima-Technik
Monika Knabe, Dr. Jürgen Schenk,
Institut für Luft- und Kältetechnik
Dresden gGmbH
Fritz Liebrecht, Gunnar Henke,
TU Dresden, Institut für Produktionstechnik,
Professur Fügetechnik und Montage
Alexander Wirsching,
TEKO Gesellschaft für Kältetechnik mbH

Rekonditionierung vorgenommene Zugprüfung zeigt im direkten Vergleich mit ungealterten Proben eine deutliche Zunahme der Festigkeit, was einer Nachvernetzung der Klebstoffe während der Auslagerung bei höherer Temperatur entspricht, siehe Bild 15.

Fazit:

Mit den unter Laborbedingungen charakterisierten Klebungen mit Epoxidharzklebstoffen und den beim praxisnahen Kleben einer Kälteanlage der Firma TEKO gewonnenen Erfahrungen zeigt sich sowohl in Bezug auf die Klebfertigung als auch auf die Verbindungseigenschaften ein technologisches Niveau, das die prinzipielle Übertragung des Fügeverfahrens Kleben (als Alternative bzw. vollwertiger Ersatz des Hartlötens) in den Kälteanlagenbau als außerordentlich Erfolg versprechend erscheinen lässt.

Hierfür sind jedoch weiterführende Untersuchungen erforderlich, die insbesondere die Themen Mischverbindungen, Prozesssicherheit, Alterung und Qualitätssicherung ausführlich behandeln.

Als Vortrag gehalten anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des DKV am 24. November 2006 in Dresden.
Zuwendungsgeber für das Pilotprojekt: HA Hessen Agentur GmbH (TSH – Technologie Stiftung Hessen GmbH), TSH-Proj.-Nr. 75/04-01, BMWa – Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, AZ: VIII C 5 – 70 91 96/9

Thema: Kleben in der Kältetechnik Datum: 25.10.2005
Serie: A32x Bearbeiter: Liebrecht / Henke

Fügeteilanordnung	Rohr / Rohr aufgeweitet
Bemerkung:	

Reinigung / Oberflächenvorbehandlung	
Schritt 1:	120 sec. Isopropanol US-Bad
Schritt 2:	Trocknen / RT
Schritt 3:	Schleifen (synt. Vlies P200)
Schritt 4:	300 sec. Isopropanol US-Bad
Schritt 5:	Trocknen / RT
Schritt 6:	--

Werkstoffe	
Benennung:	Kupferrohr Cu-DHP
Norm:	EN 12735-1
Zustandsbez.:	R 290 / weichgeglüht
Abmessungen:	12mm x 1,0mm

Fügen	
Art des Fügens:	manuell
Fixierung der Teile:	Zentriervorrichtung
Klebstoffapplikation:	Spätel
Applikationstemp.:	RT
Vorhärtung:	15 min. bei 80°C
Aushärtung:	
Klebschichtdicke:	0,17 mm

Klebstoff	
Typ:	2K - Epoxy
Herstellerbez.:	
Bemerkung:	

Sonstiges: 15 min Konditionierung bei RT, anschließend Zugprüfung	
---	--

Werkstattklebung einer Verbundanlage

Nachfolgende Seiten zeigen eine Übersicht der Klebverbindungen an einer Verdichtereinheit der Firma TEK0, wie sie in Zusammenarbeit mit Kälteanlagentechnikern des Unternehmens am 17.11.2005 in Altenstadt gefügt wurden, siehe Bild 16.

Die Fertigung erfolgte analog zur Vorgehensweise im Labor mit beschleunigter Warmaushärtung, unter Verwendung branchentüblicher Werkzeuge und Hilfsmittel. Hierbei wurde deutlich, dass sich nicht alle Fügeaufgaben für Kleben eignen, was insbesondere für Aushaltungen und kleine Überlappungslängen zutrifft. Generell ist einzuschätzen, dass das Kleben unter Werkstattbedingungen bei Einhaltung weniger Randbedingungen (Silikonfreiheit, Raumtemperatur >15 °C) problemlos realisierbar ist.

Voraussetzung hierfür ist jedoch eine klebtechnische Schulung der Ausführenden, um eine hohe Prozesssicherheit bzw. Fertigungsqualität abzusichern.

Die Anlage befindet sich seitdem bei TEK0 im Versuchsbetrieb.

Bild 13 Protokollblatt für Rohrklebungen mit beschleunigter Aushärtung

Thema: Kleben in der Kältetechnik Datum: 25.10.2005
Serie: A32x Bearbeiter: Liebrecht / Henke

Verbindungsprüfung	
Art der Prüfung:	quasistat. Scherzugversuch
Zeitpunkt der Prüfung:	25.10.2005
verw. Prüfeinrichtung:	ZPM Roell & Korthaus
Prüfer:	Jesche
Prüfgeschwindigkeit:	10 mm/min

Ergebnisse		
Probenbezeichnung	F _{max} [kN]	Versagensart (n. EN ISO 10365)
A321	8,22	SF
A322	7,81	SF
A323	8,19	SF
A324	8,20	SF
A325	8,19	SF
A326	8,14	SF
A327	8,20	SF

Statistik	
Serie n = 7	F _{max} [kN]
\bar{x}	8,14
s	0,15
v	1,78

S - Standardabweichung
V - Variationskoeffizient

AF - Adhäsionsbruch; CF - Kohäsionsbruch; SF - Fügestoffbruch

Wechselbelastungsprüfstand

Der Versuchsstand dient zur Prüfung der kältetechnischen Belastbarkeit von geklebten Rohrverbindungen und besteht aus einem einstufigen Kältemittelkreislauf mit einem Hermetikverdichter, luftgekühltem Verflüssiger, Kältemittelsammler, luftbeaufschlagtem Verdampfer, Hochdruckwächter, zwei Expansionsventilen sowie 7 Magnetventilen. Als Kältemittel wird R404A eingesetzt.

Die Verrohrung und der eigentliche Aufbau des Versuchsstands wurde in der Kälte Werkstatt des ILK Dresden durchgeführt. In Bild 18 ist der Versuchsstand dargestellt. Er ist mit Sensorik ausgerüstet, die es ermöglicht, Temperaturen und Drücke in der Saug- und Druckleitung kontinuierlich zu erfassen und zu speichern. Dazu dient ein Messwerterfassungssystem Medana von Delphin-Systems.

Der Kältemittelkreislauf enthält zwei Abschnitte, in die jeweils 4 geklebte Rohrverbindungen eingefügt werden können. Durch Öffnen und Schließen der entsprechenden Magnetventile werden die Prüfgruppen wechselweise in die Druckleitung und in die Saugleitung integriert. Sind die Magnetventile MV1, MV3 und MV7 geöffnet und MV2, MV4, MV5 und MV6 geschlossen, befindet sich Prüfgruppe 1 auf der Druck- und Prüfgruppe 2 auf der Saugseite. Sind die



Bild 14 Klebstoff-Substratproben (10x80x5mm) für Kühlmittelalterung – links Klebstoff EP1, rechts Klebstoff EP2

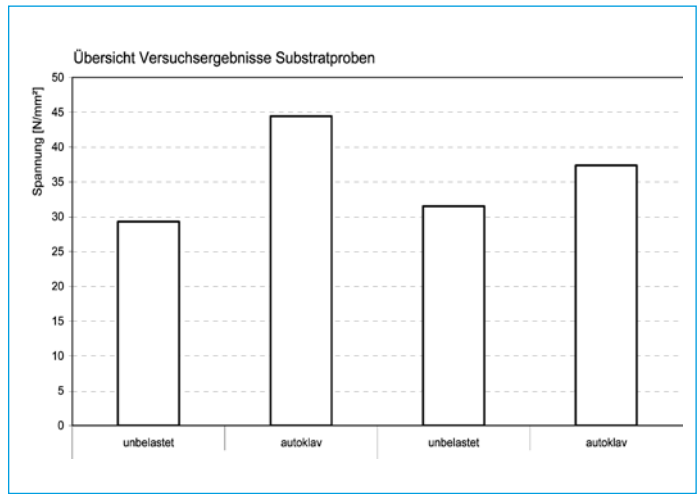


Bild 15 Zugfestigkeitsvergleich von Substratproben vor/nach Alterung



Bild 16 Klebverbindung an einer Verdichtereinheit

bei, dass bei einem Klebspalt von 0,05 mm bzw. 0,06 mm wie bei Testreihe 3 und Testreihe 4 alle Prüflinge dicht blieben, bei einem Klebspalt von 0,29 mm bzw. 0,34 mm hingegen die Ausfälle auftraten.

Abschlussbetrachtung

Einfache Verarbeitung mit manuellen Kartuschenpistolen und die Möglichkeit zur beschleunigten Aus- bzw. Vorhärtung durch Erwärmung der Klebstelle bis max. 80 °C, sowie die Verfügbarkeit eines Klebstofftyps mit unterschiedlichen Viskositäten erlauben einen praktikablen Klebprozess. Die ausgewählten 2K-EP-Klebstoffe erreichen prinzipiell ein mit dem Hartlöten vergleichbares Festigkeitsniveau bei Rohrklebungen. Im Einzelfall tritt Fügeteilversagen auf. Je nach Versuchsserie treten bei diesen Klebstoffen kleine Werte für die Standardabweichungen der Maximalkräfte hervor, was für gut reproduzierbare Klebverbindungen spricht.

Im zweiten Versuchsabschnitt wurde der Einfluss beschleunigter Härtingsprozesse (Ofenlagerung 15 min/80 °C) auf Festigkeit und Deformationseigenschaften der Klebung untersucht. Hierfür wurden 2 Klebstoffe höherer Viskosität ausgewählt. Die Ergebnisse belegen, dass die kurzzeitige Vorhärtung bei den genannten Temperaturen den gewünschten Beschleunigungseffekt hervorruft, ohne dass es zu Versprödungseffekten kommt. Damit kann in praxisrelevanten Taktzeiten von ca. 15 min nahezu die Endfestigkeit der Klebung erreicht werden. In keinem der untersuchten Fälle zeigten sich negative Begleiterscheinungen wie Ausgasungen, Blasenbildung oder größere Streuungen der Festigkeitswerte.

Magnetventile MV1, MV3 und MV7 geschlossen und MV2, MV4, MV5 und MV6 geöffnet, befindet sich Prüfgruppe 1 auf der Saug- und Prüfgruppe 2 auf der Druckseite.

Da die Gleichgewichtstemperaturen an den Prüfgruppen jeweils innerhalb von 3 Minuten erreicht werden, wurde ein Schalterhythmus von 5 min eingestellt. Die Anordnung der Prüflinge ist im Bild 19 zu sehen.

Ergebnisse

Die Prüflinge wurden an der TU Dresden geklebt. Anschließend wurden diese Prüflinge im ILK auf Dichtheit untersucht. Dazu wurde das empfindlichste verfügbare Messverfahren eingesetzt (Prüfung mit Heliumbeaufschlagung unter Vakuumumgebung mit Direktanschluss eines He-Lecksuchers). Bei Druckbeaufschlagung von 16 bar lag die Nachweisempfindlichkeit der Anordnung bei 1×10^{-10} mbar l/s He.

Alle acht Prüflinge waren im kältetechnischen Sinn völlig dicht, die auf R134a umgerechneten Leckraten lagen unter 10^{-3} g R134a/Jahr.

Die acht Prüflinge wurden als zwei wechselnd beanspruchte Prüfgruppen in die Test-

anlage eingebaut. Die charakteristische Druck- und Temperaturwechselbeanspruchung ist in Bild 20 und Bild 21 dargestellt.

Bewertung der Testreihen

Nach Überwindung anfänglicher Probleme (Testreihe 1 und 2) bezüglich einer sicheren, reproduzierbaren Klebtechnologie, in deren Folge es bei den ersten beiden Testreihen zu Ausfällen einzelner Prüflinge kam, konnte mit den Testreihen 3 und 4 nachgewiesen werden, dass die Klebtechnologie sichere, leakagefreie Verbindungen im Kälteanlagenbau ermöglicht.

Die erfolgreiche Testung von 8 Prüflingen, die insgesamt mehr als 10000 Lastwechseln hinsichtlich Druck und Temperatur unterzogen wurden, zeigt die Sicherheit der Klebverbindung. Daher ist zu erwarten, dass bei praktischer Anwendung im Kälteanlagenbau die dauerhafte Stabilität und Dichtheit der Kälteanlage nicht gefährdet sind. Natürlich gilt dies nur bei Einhaltung der korrekten Klebtechnologie.

Im Ergebnis der Tests ist festzustellen, dass mit 2K-Epoxydharzen stabile Verklebungen erreicht wurden. Auffällig ist da-



Bild 17 Verdichtereinheit mit mehrheitlich geklebten Rohrverbindungen

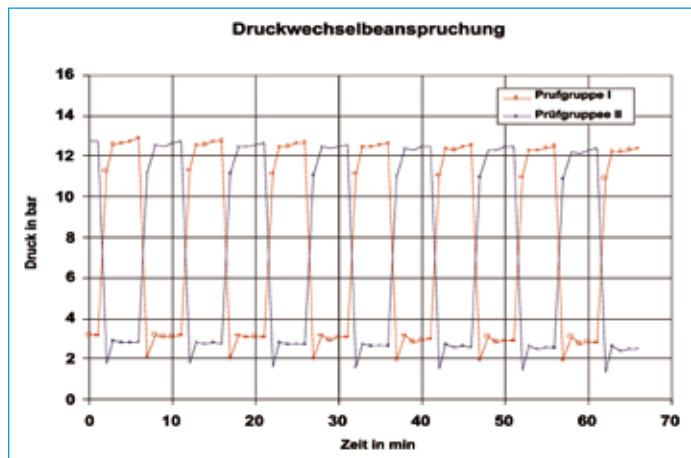


Bild 20 Wechselbelastung durch Druck



Bild 18 Wechselprüfstand (ILK Dresden)

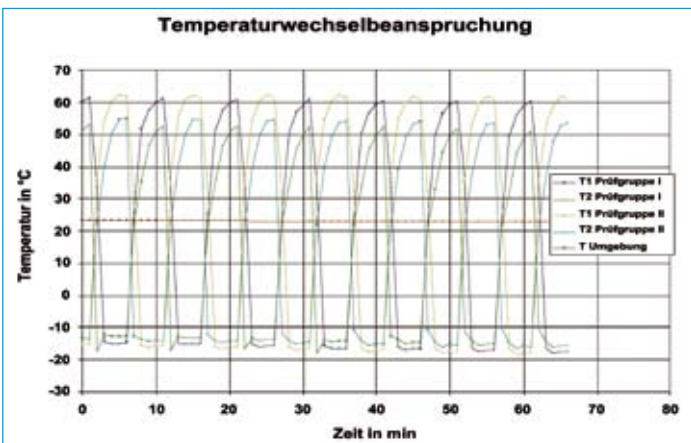


Bild 21 Wechselbelastung durch Temperatur

Die praxisnahe Klebung einer Verdichtereinheit bei der Firma TEKÖ, Altenstadt, erfolgte analog zur Vorgehensweise im Labor mit beschleunigter Warmaushärtung, unter Verwendung branchenüblicher Werkzeuge und Hilfsmittel. Diese Anlage befindet sich seitdem bei TEKÖ im Versuchsbetrieb.

Hierbei wurde deutlich, dass sich nicht alle Fügeaufgaben für Kleben eignen, was insbesondere für Aushalsungen und kleine Überlappungslängen zutrifft. Generell ist jedoch einzuschätzen, dass das Kleben unter Werkstattbedingungen bei Einhaltung weniger Randbedingungen (Silikonfreiheit, Raumtemperatur >15°C) problemlos realisierbar ist. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine klebtechnische Schulung der Ausführenden, um eine hohe Prozesssicherheit bzw. Fertigungsqualität abzusichern.

Mit den in Teil 2 unter Laborbedingungen charakterisierten Klebungen mit Epoxidharzklebstoffen und den beim praxisnahen Kleben einer Kälteanlage der Firma TEKÖ gewonnenen Erfahrungen zeigt sich sowohl in Bezug auf die Klebfertigung als auch auf die Verbindungseigenschaften ein technologisches Niveau, das die prinzipielle Übertragung des Fügeverfahrens Kleben (als Alternative bzw. vollwertiger Ersatz des Hartlötens) in den Kälteanlagenbau als außerordentlich Erfolg versprechend erscheinen lässt.

Hierfür sind jedoch weiterführende Arbeiten erforderlich, die insbesondere die Themen Mischverbindungen, Prozesssicherheit, Alterung und Qualitätssicherung, sowie die Auswirkungen undefinierter Fertigungsbedingungen auf Baustellen und im Servicefall ausführlich behandeln. ■



Bild 19 Prüflinge auf dem Wechselprüfstand