

Kurzfassung

Gelötete Abgaswärmetauscher leisten einen elementaren Beitrag bei der Erfüllung der gesetzlichen Normen und Grenzwerte zur Reduktion des Schadstoffausstoßes von Verbrennungsmotoren. Die vorherrschenden Betriebsbedingungen im Abgasstrang fordern von den Fügestellen eine Korrosionsbeständigkeit gegen die Abgase und gleichzeitig eine hinreichende mechanische Festigkeit. Eine prozesssichere Auslegung der Lötverbindungen ist somit von essentieller Bedeutung und bedarf der Kenntnis über die relevanten Prozesseinflussgrößen sowie ihrer Wechselwirkungen auf die Fügeverbundqualität.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurde erstmalig in der Löttechnologie das Definitive Screening Design mit einer zweistufigen Auswertung zur systematischen Auslegung von Fügeverbindungen qualifiziert. Hierzu wurden für die Fügeverbunde 1.4307/Ni 620, 1.4307/Au 827 und 1.4404/Ni 620 mit jeweils 14 Versuchen die verbundspezifischen, statistisch signifikanten Prozesseinflussgrößen der Fügeverbundfestigkeit ermittelt, um mit diesen Prozessparametern individuelle Prognosemodelle zu generieren. Mit einer maximalen Abweichung von 1,4 % wurden die optimierten Festigkeitswerte aller Verbunde präzise vorhergesagt, deren Werte experimentell verifiziert und die Mikrostruktur der Fügeverbunde analysiert. Eine gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber dem synthetischen Abgaskondensat K2.2 wurde für den optimierten Lötverbund 1.4404/Ni 620 erreicht, da bei den anderen Lötverbunden elektrochemische Spannungsunterschiede einzelner Phasen selektive Korrosionsprozesse hervorrufen. Mit Hilfe einer gezielten Grenzflächenmodifikation des Verbundes 1.4307/Ni 620 mit einer reinen Nickelfolie und einer geeigneten Lötprozessführung wurde die elektrochemische Spannungsdifferenz der Grenzfläche signifikant reduziert und mit potenziodynamischen Korrosionsuntersuchungen die signifikant verbesserte Korrosionsbeständigkeit dieser Reaktionslötung nachgewiesen. Die Reaktionslötung ermöglichte eine maximale Zugfestigkeit von 476 MPa, was in etwa einer Verdopplung der Festigkeit der optimierten Schmelzlötverbindung 1.4307/Ni 620 und nahezu der Grundwerkstofffestigkeit entspricht. Diese Arbeit liefert somit einen Beitrag zur Auslegung von hochfesten sowie korrosionsfesten Lötverbindungen am Anwendungsbeispiel eines Abgaswärmetauschers.

Abstract

Brazed exhaust gas heat exchangers make a fundamental contribution to the fulfilment of legal standards and limit values for the reduction of pollutant emissions from internal combustion engines. The prevailing operating conditions in the exhaust tract require the joints to be resistant to corrosion by the exhaust gases and at the same time to have sufficient mechanical strength. A process-safe design of the brazed joints is therefore of elementary importance and requires knowledge of the relevant process influencing variables as well as their interactions on the joint quality.

In the present research work, the Definitive Screening Design was qualified for the first time in brazing technology with a two-stage evaluation for the systematic design of joints. For this purpose, the compound-specific, statistically significant process influencing variables on the joint strength were determined for the joint composites 1.4307/Ni 620, 1.4307/Au 827 and 1.4404/Ni 620 with 14 tests each, in order to generate individual prognosis models with these process parameters. With a maximum deviation of 1.4 %, the optimised strength values of all composites were precisely predicted, their values verified experimentally and the microstructure of the composites analysed. Corrosion resistance to the synthetic exhaust gas condensate K2.2 was achieved for the optimised brazing composite 1.4404/Ni 620, since in the other brazing composites electrochemical voltage differences of individual phases cause selective corrosion processes. With the help of a specific interface modification of the composite 1.4307/Ni 620 with the element nickel and a suitable brazing process control, the electrochemical voltage difference of the interface was significantly reduced and the corrosive resistance of this reaction brazing was proven with potentiodynamic corrosion tests. Reaction brazing enabled a maximum tensile strength of 476 MPa, which is approximately double the strength of the optimised fusion brazed joint 1.4307/Ni 620 and almost the same as the base material strength. Therefore, this work thus provides a holistic approach to the design of high-strength and corrosion-resistant brazed joints using the example of an exhaust gas heat exchanger.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Grundwerkstoffe.....	3
2.1 Nickelbasislegierungen.....	3
2.2 Korrosionsbeständige nichtrostende Stähle.....	9
2.2.1 Einteilung von nichtrostenden Stählen.....	9
2.2.2 Korrosionsbeständigkeit austenitischer CrNi-Stähle.....	10
3. Grundlagen der Korrosion.....	17
3.1 Elektrochemische Grundlagen	19
3.2 Deck-und Passivschichten	28
3.3 Korrosive Erscheinungsformen	32
4. Hochtemperaturlöten mit Nickelbasisloten.....	39
4.1 Hochtemperaturlöten.....	39
4.2 Entwicklung und Einteilung von Nickelbasisloten.....	42
4.3 Löten von Nickelbasis-Superlegierungen.....	48
4.4 Löten von nichtrostenden Stählen	54
4.4.1 Einfluss von Lötparametern auf die Fügeverbundeigenschaften.....	54
4.4.2 Korrosionsuntersuchungen an gelöteten austenitischen CrNi-Stählen	59
4.4.3 Schlussfolgerungen für den Lötverbund 1.4307/Ni 620.....	78
5. Grundlagen der statistischen Versuchsplanung.....	82
6. Ausgangssituation und Zielsetzung	89
6.1 Problemstellung und Forschungsbedarf	89
6.2 Zielsetzung	91
6.3 Methodisches Vorgehen	94
7. Experimentelles.....	96
7.1 Verwendete Werkstoffe.....	96
7.2 Probenherstellung und Geometrien	98
7.3 Versuchspläne.....	103
7.3.1 Verbund 1.4307/Ni 620	103
7.3.2 Verbund 1.4307/Au 827	106
7.3.3 Verbund 1.4404/Ni 620	108

7.4 Gefügecharakterisierung	111
7.4.1 Härtemessung.....	111
7.4.2 Digital- und Rasterelektronenmikroskopie	111
7.4.3 Röntgendiffraktometrie	113
7.5 Ermittlung der mechanischen Festigkeiten	113
7.6 Korrosionsuntersuchung gemäß VDA 230-214	114
7.6.1 Festlegung der Prüfmodalitäten.....	115
7.6.2 Versuchsdurchführung.....	116
7.7 Potenziodynamische Korrosionsuntersuchungen	117
8. Ergebnisse.....	119
8.1 Ermittlung optimierter Fügeparameter mittels DoE.....	119
8.1.1 Der Verbund 1.4307/Ni 620.....	120
8.1.2 Der Verbund 1.4307/Au 827.....	144
8.1.3 Der Verbund 1.4404/Ni 620.....	159
8.1.4 Schlussfolgerungen.....	167
8.2 Korrosionsuntersuchung gemäß VDA 230-214	169
8.2.1 Der Verbund 1.4307/Ni 620.....	169
8.2.2 Der Verbund 1.4307/Au 827.....	183
8.2.3 Der Verbund 1.4404/Ni 620.....	194
8.2.4 Schlussfolgerungen.....	203
8.3 Reaktionslötungen des Verbundes 1.4307/Ni/Ni 620	206
8.3.1 Ermittlung signifikanter Einflussparameter	206
8.3.2 Schlussfolgerungen.....	217
8.4 Potenziodynamische Polarisation.....	218
8.4.1 Untersuchung der prozessbeeinflussten Grundwerkstoffe.....	218
8.4.2 Untersuchung der Schmelz- und Reaktionslötungen.....	223
8.4.3 Schlussfolgerungen.....	232
9. Zusammenfassung und Ausblick.....	235
Literaturverzeichnis.....	249
Anhang.....	278