

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2.	Aufgabe und Zielsetzung	2
3.	Stand der Kenntnisse und Problemstellung	4
3.1.	Eigenspannungen	11
3.2.	Wärmedehnung der an die Keramik anzupassenden Metalle	12
3.3.	Einflußgrößen auf Lotgefüge und Festigkeit der Lötverbindungen	15
3.4.	Haffestigkeitsprüfung von Keramik-Verbindungen	17
4.	Versuchsprogramm	22
5.	Versuchsaufbau	25
5.1.	Hochtemperatur-Lötofen	25
5.2.	Läpp- und Poliermaschine	26
5.3.	Keramiksäge	26
5.4.	Ultraschallreinigungsgesät	26
5.5.	Rauhtiefenmeßgerät.....	26
5.6.	Zug-Druck-Prüfmaschine	26
5.7.	Prozeßdatenerfassung	27
5.7.1.	Fertigungsdatenerfassung	27
5.7.2.	Prüfdatenerfassung.....	27
5.7.2.1.	A/D-Wandlerkarte und PC	27
5.7.2.2.	Messung der Prüfkraft.....	29
5.7.2.3.	Steuerung der Prüfkraftgeschwindigkeit	30
5.7.2.4.	Probenberührung und Probenbruch.....	30
5.7.2.5.	Regelung der Prüftemperatur	30
5.8.	Prüfung der Lötverbindungen	30
5.8.1.	Zerstörende Prüfung der Lötverbindungen.....	30
5.8.2.	Metallographische Prüfung der Lötproben	31
5.9.	Entwicklung geeigneter Lötalterungen	32
5.10.	Entwicklung und Konstruktion einer Spannvorrichtung zum Warmdruckscheren.....	33
6.	Versuchsverlauf	36
6.1.	Verwendete Werkstoffe.....	36
6.2.	Lötzyklus.....	40
6.3.	Ermittlung und Auswahl der Lötbedingungen	41

VI

6.4.	Versuchsdurchführung und -bedingungen.....	42
6.4.1.	Messen der Oberflächenrauigkeit	42
6.4.2.	Fertigungsvorbereitung	42
6.4.3.	Druckscherprüfung bei 600°C Prüftemperatur	43
6.4.4.	Torsionsprüfung von Welle-Nabe-Lötverbindungen.....	43
6.4.5.	Statistische Auswertung der Versuche.....	44
7.	Optimierung des Druckscherprüfverfahrens.....	45
7.1.	Wahl einer geeigneten Prüflasteinleitung auf die Lötprobe.....	45
7.2.	Einfluß der Probenhöhe auf die Durchbiegung der Lötprobe	49
7.3.	Einfluß der Widerlagerhärte auf Bruchart und Streuung der Festigkeitswerte der Lötproben	50
7.4.	Charakterisierung der Bruchform	50
8.	Entwicklung und Erprobung eines Prüfstands zum Prüfen von Keramik-Metall-Lötverbindungen	53
8.1.	Aufgaben und Anforderungen.....	53
8.2.	Konstruktion und Bau des Prüfstandes.....	54
8.3.	Meßwerterfassung und -verarbeitung.....	58
8.4.	Erprobung des Druckscherprüfstands	61
9.	Parameteroptimierung für Keramik-Metall-Lötverbindungen.....	62
9.1.	Werkstoffauswahl und Lötparameter.....	62
9.1.1.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen	64
9.2.	Variation der Lötspaltbreite von HPSN-X 5 NiCo 29 18- sowie HPSN-Ck 45-Lötverbindungen.	64
9.3.	Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit auf das Festigkeitsverhalten von HPSN-X 5 NiCo 29 18- und HPSN-Ck 45-Lötverbindungen.....	65
9.4.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen.....	66
10.	Eigenspannungsverlauf und Verformungsverhalten in der Lötprobe einschließlich Optimierung der Stoßform.	67
10.1.	Einfluß des thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf die Eigenspannungsverteilung in der HPSN-Metall-Lötverbindung.	67
10.1.1.	Berechnung der Eigenspannungsverteilung in der HPSN- Metall-Lötverbindung.	67
10.1.2.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen	71
11.	Gestaltungsoptimierung von Lötproben und Stoßformen.....	73
11.1.	Eigenspannungsverlauf	76
11.1.1.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen	78

VII

11.2.	Einfluß des Probenvolumens auf die Druckscherfestigkeit von HPSN-Metall-Lötverbindungen.....	79
11.2.1.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen	81
11.3.	Fertigungstechnischer Einfluß beim Löten.....	81
11.3.1.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen	82
11.4.	Zugabe von Nickelfolie in den Lötspalt.....	83
11.4.1.	Einfluß der Nickelfolie auf die Lötnahtbreite und Benetzung	83
11.4.2.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen	86
12.	Oberflächenvergrößerung der HPSN-Stoßfläche	87
12.1.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen.....	87
13.	Gefüge- und Bruchflächenanalyse an HPSN-Metall-Lötverbindungen	89
13.1.	Einfluß der Biegespannung beim Scheren.....	89
13.2.	Lötnahtgefüge zwischen HPSN und X 5 NiCo 29 18.....	90
13.2.1.	Bruchverlauf der Lötprobe während Druckscherbeanspruchung unter Raum- und erhöhter Temperatur	95
13.3.	Lötnahtgefüge zwischen HPSN und Ck 45	99
13.3.1.	Bruchanalyse der Lötprobe	102
13.4.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen.....	105
13.5.	Gefüge der Lötverbindung HPSN-X 5 NiCo 29 18 mit Nickelzwichenschicht.	106
13.6.	Gefüge der Lötverbindung HPSN-Ck 45 mit Nickelzwichenschicht.	107
13.6.1.	Bruchanalyse der Lötverbindungen HPSN-X 5 NiCo 29 18 bzw. -Ck 45 mit Nickelzwichenschicht.....	108
13.7.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen.....	111
13.8.	Gefüge- und Bruchanalyse der Lötverbindungen nach Wärmebehandlung	111
13.8.1.	Lötnahtgefüge von Lötverbindungen HPSN-X 5 NiCo 29 18	111
13.8.2.	Bruchverhalten von Lötverbindungen HPSN-X 5 NiCo 29 18.....	115
13.8.3.	Lötnahtgefüge von Lötverbindungen HPSN-Ck 45.....	115
13.8.4.	Bruchverhalten von Lötverbindungen HPSN-Ck 45	119
13.8.5.	Untersuchsergebnisse und Schlußfolgerungen	119
13.9.	Lötnahtgefüge ausgelagerter Lötverbindungen HPSN-X 5 NiCo 29 18 sowie -Ck 45.....	121
13.9.1.	Bruchverhalten der Lötverbindungen.....	126
13.9.2.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen	127
13.10.	Gefüge und Bruchverlauf von Lötverbindungen nach zyklischer Temperaturwechselbelastung.....	128
13.10.1.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen	128
13.11.	Bruchverlauf von Lötverbindungen mit Kreuznuten.....	129
13.11.1.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen	129

VIII

13.12.	Bruchverlauf von Lötverbindungen nach Laserbearbeitung der Keramikstoßfläche	130
13.12.1.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen	130
14.	Festigkeitsprüfung und aufgetretene Brucharten von Lötbindungen HPSN-X 5 NiCo 29 18 sowie -Ck 45 bei erhöhter und wechselnder Temperatur.	132
14.1.	Warmfestigkeitsverhalten und Bruchformen von HPSN-Metall-Lötverbindungen unter statischer Last.....	132
14.2.	Festigkeitsprüfung nach 600 und 1200 h Auslagerungszeit bei 600°C.....	135
14.3.	Einfluß des Stoßflächenquerschnitts auf das Festigkeitsverhalten nach zyklischer Temperaturwechselbelastung.....	137
14.4.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen.....	138
15.	Löten von Welle-Nabe-Verbindungen aus Keramik und Metall	140
15.1.	Bruchverhalten.....	142
15.2.	Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen.....	143
16.	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen.....	144
17.	Literaturverzeichnis.....	148