

Dipl.-Ing. Friedrich Kroos, Wuppertal

Randschichtverfestigung durch Hochdruck-Wasser- strahlen

Fortschritt-Berichte VDI
Reihe **2**: Fertigungstechnik

Nr. **375**

Inhaltsverzeichnis

Seite

	Formelzeichen und Abkürzungen	VIII
1	Einleitung	1
2	Stand der Kenntnisse	2
2.1	Einfluß der Randzoneneigenschaften und Kerben auf die Bauteilfestigkeit bei schwingender Beanspruchung	2
2.1.1	Eigenspannungen und Werkstoffzustand	3
2.1.2	Kerbeinfluß	8
2.1.2.1	Makrogeometrische Kerben	8
2.1.2.2	Mikrogeometrische Kerben	11
2.1.3	Konzepte zur Beschreibung der Randzoneneinflüsse auf die Schwingfestigkeit	13
2.2	Grundlagen für die technische Nutzung von Flüssigkeitsstrahlen hoher kinetischer Energie	15
2.2.1	Charakteristik von Flüssigkeitsstrahlen	15
2.2.2	Werkstoffanstrengung und -eigenschaftsänderung durch Einzel- und Mehrfachtropfenschlag	18
2.2.3	Hochdruck-Wasserstrahlen zur Oberflächenbehandlung	22
3	Zielsetzung und Aufgabenstellung	24
4	Versuchsdurchführung, -werkstoffe und -einrichtungen	25
4.1	Versuchsdurchführung	25
4.2	Probengeometrien	26
4.3	Versuchswerkstoffe	27
4.3.1	Aluminiumlegierung AlMgSi 0,5	27
4.3.2	Vergütungsstahl Ck 45 N	28
4.3.3	Vergütungsstahl 42 CrMo 4 V	29
4.3.4	Einsatzstahl 16 MnCr 5 E	31
4.3.4.1	Wärmebehandlung und Gefüge	31
4.3.4.2	Randzoneneigenschaften hartfeinbearbeiteter Oberflächen	33
4.4	Strahlmedium	34
4.5	Meßtechnik	35
4.5.1	Röntgenographische Feinstrukturanalyse	35
4.5.2	Metallographische Untersuchungen, Härtemessungen und chemische Analysen	36
4.5.3	Beurteilung der Oberflächenmikrogeometrie	37
4.5.4	Kraft- und Durchflußmessungen	38
4.5.5	Schwingfestigkeitsuntersuchungen	39
4.5.5.1	Umlaufbiegeprüfung	39
4.5.5.2	Zahnfußbiegeprüfung	39
4.6	Versuchsstand	40
4.6.1	Hochdruck-Strahlanlage	40
4.6.2	Strahldüsen	41

5	Eigenschaften und Wirkung von Freistrahlen	43
5.1	Stell- und Systemgrößen des Hochdruck-Wasserstrahlens	43
5.2	Grundlagen	44
5.3	Bestimmung der signifikanten Einflußgrößen	46
5.3.1	Ausbildung von Freistrahlen	46
5.3.2	Verschleiß der Strahldüsen	49
5.3.3	Wirkung von Freistrahlen	52
5.4	Beschreibung der düsenspezifischen Einflußgrößen	54
5.4.1	Strömungsverluste in Düsen	54
5.4.2	Abmessungen des integralen Strahlquerschnittes	55
5.4.3	Intensitätsverteilung im Strahlquerschnitt	56
5.4.3.1	Eigenspannungsverteilung über dem Strahlquerschnitt	56
5.4.3.2	Lokale Durchflußmessungen	59
5.4.4	Integrale Strahlkraft	61
5.4.5	Energetische Betrachtungen	62
5.4.6	Strahlausbildung und -wirkung	65
5.5	Strahlwinkel	68
6	Werkstückseitige Einflußgrößen	70
6.1	Einfluß der Werkstofffestigkeit	70
6.1.1	Normalisierter Werkstoffzustand (Ck 45 N)	70
6.1.1.1	Eigenspannungen	70
6.1.1.2	Gefüge und Härte	72
6.1.1.3	Oberflächenrauheit und Topographie	74
6.1.2	Vergüteter Werkstoffzustand (42 CrMo 4 V)	75
6.1.2.1	Eigenspannungen	75
6.1.2.2	Gefüge und Härte	77
6.1.2.3	Oberflächenrauheit und Topographie	78
6.1.3	Einsatzgehärteter Werkstoffzustand (16 MnCr 5 E)	80
6.1.3.1	Untersuchungen an randoxydierten Proben	80
6.1.3.2	Strahlversuche an elektrochemisch polierten Proben	84
6.2	Einfluß der Randzoneneigenschaften vor dem Strahlen	87
6.3	Eigenschaften des Eigenspannungs- und Verfestigungszustandes nach dem Hochdruck-Wasserstrahlen	92
6.3.1	Makroeigenspannungen	92
6.3.2	Versetzungszustand und Mikroeigenspannungen	95
6.4	Einfluß der Oberflächenfeingestalt auf die Strahlwirkung	98
6.5	Chemische Randzonenanalyse	100
6.6	Einfluß der Bauteilgeometrie auf die Wirkung des Hochdruck-Wasserstrahlens	101
6.7	Strahlen unter Vorspannung	105
7	Modellbildung	107
7.1	Elementarprozeß	107
7.2	Statistische Prozeßcharakteristik	109

	Seite
7.3	Modulation der Strahlwirkung 111
7.4	Energieanteile beim Hochdruck-Wasserstrahlen 113
7.5	Prozeßsicherheit 116
7.6	Auslegung des Prozesses 117
8	Vergleichsuntersuchungen zum Kugelstrahlen 119
8.1	Oberflächen- und Randzoneneigenschaften 119
8.2	Analogiebetrachtungen 124
9	Schwingfestigkeitsuntersuchungen 126
9.1	Umlaufbiegeversuche 126
9.1.1	Normalisierter Werkstoffzustand (Ck 45 N) 126
9.1.2	Vergüteter Werkstoffzustand (42 CrMo 4 V) 127
9.1.3	Einsatzgehärteter Werkstoffzustand (16 MnCr 5 E) 128
9.1.3.1	Untersuchungen an randoxydierten Proben 128
9.1.3.2	Untersuchungen an hartfeinbearbeiteten Proben 129
9.2	Bauteilähnliche Proben 132
9.2.1	Zahnräder mit Randoxydation im Zahnfußbereich 132
9.2.2	Zahnräder mit Schleifkerben 133
9.3	Bewertung der strahlbedingten Schwingfestigkeitssteigerungen 135
10	Technologische und wirtschaftliche Bewertung des Hochdruck- Wasserstrahlens 142
10.1	Randbedingungen hinsichtlich der Bauteilgeometrie 142
10.2	Werkstoff- und oberflächenspezifische Randbedingungen 144
10.3	Beanspruchungsspezifische Randbedingungen 144
10.4	Anwendungspotentiale 145
11	Ausblick für verfahrensspezifische Entwicklungen 147
12	Zusammenfassung 149
13	Literatur 151