

Dipl.-Ing. Oliver Prause, München

**Der Einfluß von elektronen-  
emissionsfördernden  
Dotierungen auf Herstellung  
und Anwendung von  
Wolframelektroden**

Reihe **5**: Grund- und Werkstoffe

Nr. **470**

**Inhaltsverzeichnis**

	Seite
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Wolfram-Inertgas-Schweißen mit thorierten Elektroden	1
1.2 Maßnahmen zum Strahlen- und Umweltschutz	1
1.3 Entwicklung von strahlungsfreien Wolframelektroden	2
<b>2. Grundlagen und Anforderungen</b>	<b>3</b>
2.1 Werkstoffe für nichtabschmelzende Elektroden	3
2.1.1 Eigenschaften von Wolfram	3
2.1.1.1 Thermische Eigenschaften	3
2.1.1.2 Elektrische Leitfähigkeit	4
2.1.1.3 Elektronenemission	6
2.1.1.4 Chemisches Verhalten	7
2.1.2 Oxidische Dotierungen in Wolfram	7
2.1.2.1 Konfigurationsmodell der Elektronen	8
2.1.2.2 Kristallographische Strukturen	9
2.1.2.3 Thermische Elektronenemission	11
2.1.2.4 Diffusion der Dotierung in Wolfram	13
2.1.2.5 Verdampfung bei hohen Temperaturen	14
2.1.2.6 Chemisches Verhalten	15
2.2 Pulvermetallurgische Verarbeitung von dotiertem Wolfram	16
2.2.1 Pulveraufbereitung	16
2.2.1.1 Chemische Gewinnung von Wolfram	16
2.2.1.2 Homogenisierung der Pulverkomponenten	17
2.2.2 Formgebung durch kaltisostatisches Pressen	17
2.2.2.1 CIP-Preßverfahren	17
2.2.2.2 Verdichtungsverhalten	18
2.2.3 Sintern im direkten Stromdurchgang	20
2.2.3.1 Coolidge-Sinterverfahren	21
2.2.3.2 Mechanismen beim Festphasensintern	22
2.2.3.2.1 Einteilung der Sinterstadien	22
2.2.3.2.2 Sinteraktivität und Kornwachstum	23
2.2.3.2.3 Werkstoffspezifische Sinterdichte	24
2.2.4 Bearbeitung durch Kaltverformung	25
2.2.4.1 Verformung durch Rundhämmern	25
2.2.4.2 Werkstoffverhalten bei thermo-mechanischer Verformung	25
2.2.4.3 Erholungs- und Rekristallisationsverhalten	27
2.3 Schweißigenschaften von dotierten Wolframelektroden	29
2.3.1 Das WIG-Schweißverfahren	29
2.3.2 Zündverhalten und Standzeit	30
2.3.2.1 Werkstoffkundliche Eigenschaften	31
2.3.2.1.1 Gefüge von Elektroden	31
2.3.2.1.2 Kranzbildung	32
2.3.2.1.3 Diffusionsbewegung der Dotierung	33
2.3.2.1.4 Emittierende Oberflächenschichten	35
2.3.2.2 Wirkung der Elektronenemission	36
2.3.2.2.1 Lichtbogenzündung durch Feldemission	36
2.3.2.2.2 Elektronenfluß durch Thermoemission	39
2.3.2.3 Stationäre Gasentladung	40

<b>3. Aufgabenstellung und Versuchsplanung</b>	<b>42</b>
3.1 Aufgabenstellung	42
3.1.1 Strahlungsfreie Dotierungen mit niedriger Elektronenaustrittsarbeit	42
3.1.2 Verarbeitung von dotiertem Wolfram	43
3.1.3 Schweißtechnischer Einsatz von dotierten Wolframelektroden	43
3.2 Versuchsplanung	43
3.2.1 Statistische Versuchsmethodik	47
3.2.2 Festlegung der Versuchsparameter mit Organigramm	55
3.2.3 Einschränkende Faktoren	55
<b>4. Versuchsdurchführung und Untersuchungsmethoden</b>	<b>56</b>
4.1 Untersuchungen zur Verarbeitung von dotiertem Wolfram	56
4.1.1 Verdichtungs- und Dotierungsverhalten bei Variation von Sinterstrom, Haltezeit, Stromanstieg und Preßdruck	56
4.1.2 Verdichtungs- und Dotierungsverhalten bei Variation von Wasserstoffdruck, -durchflußmenge und Sinterstrom	57
4.1.3 Primäre Rekristallisation von dotiertem Wolfram durch Variation von Glüh-temperatur und Haltezeit	57
4.2 Schweißtechnische Untersuchung des Zündverhaltens und der Standzeit von dotierten Wolframelektroden	59
4.3 Angewandte Untersuchungsmethoden	60
4.3.1 Metallographie	60
4.3.1.1 Lichtmikroskopische Gefügeuntersuchung	60
4.3.1.2 Quantitative Gefügeanalyse	60
4.3.1.3 Rasterelektronenmikroskopie	61
4.3.1.4 Makroskopische Erfassung des Lichtbogens	61
4.3.2 Qualitative und quantitative Elementbestimmung	61
4.3.2.1 Atomabsorptionsspektroskopie	62
4.3.2.2 Röntgenfluoreszenzanalyse	63
4.3.2.3 Röntgendiffraktometrie	63
4.3.2.4 Energiedispersive Röntgenspektroskopie	63
4.3.3 Messung elektrischer Größen	63
4.3.3.1 Strom-/Spannungsverlauf beim direkten Sintern	64
4.3.3.2 Strom-/Spannungsverlauf bei der Lichtbogenzündung	64
4.3.3.3 Elektrische Widerstandsmessung	65
4.3.4 Hochtemperaturmessung mit dem Quotientenpyrometer	67
4.3.5 Dichtebestimmung	67
<b>5. Untersuchungsergebnisse</b>	<b>68</b>
5.1 Verdichtungsverhalten von dotiertem Wolfram	68
5.1.1 Ergebnisse der Dichtebestimmung	68
5.1.1.1 Verdichtung bei Variation von Sinterstrom, Haltezeit, Stromanstieg und Preßdruck	68
5.1.1.2 Verdichtung bei Variation von Wasserstoffdruck, -durchflußmenge und Sinterstrom	73
5.1.2 Metallographische Beurteilung des Sintergefüges	75
5.1.3 Verlauf von Strom und Spannung beim Sintern	77

Inhaltsverzeichnis		VII
5.2	Verhalten der oxidischen Dotierung beim Sintern	79
5.2.1	Ergebnisse der Atomabsorptionsspektroskopie	79
5.2.1.1	Dotierungsgehalt bei Variation von Sinterstrom, Haltezeit, Stromanstieg und Preßdruck	79
5.2.1.2	Dotierungsgehalt bei Variation von Wasserstoffdruck, -durchflußmenge und Sinterstrom	83
5.2.2	Ermittlung der Dotierungsverteilung durch Röntgenfluoreszenzanalyse	85
5.2.3	Wolframatnachweis durch Röntgendiffraktometrie	86
5.3	Primäre Rekristallisation von dotiertem Wolfram	88
5.3.1	Ergebnisse der Korngrößenbestimmung	88
5.3.2	Metallographische Beurteilung der Gefügeveränderung	92
5.3.3	Elektrische Widerstandsmessung	93
5.4	Schweißereigenschaften von dotierten Wolframelektroden	95
5.4.1	Ergebnisse der Strom-/Spannungsmessungen	95
5.4.1.1	Zündversuche	95
5.4.1.2	Dauerschweißversuche	98
5.4.2	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung	101
5.4.2.1	Oberflächenmorphologie der Elektroden Spitzen	101
5.4.2.2	Dotierungsnachweis mit EDX-Elementanalyse	103
5.4.3	Lichtmikroskopische Beurteilung der Elektroden	104
5.4.3.1	Elektrodengefüge vor und nach dem Schweißensatz	104
5.4.3.2	Dotierungsverteilung in der Elektroden Spitze	106
5.4.4	Makroskopische Aufnahmen des WIG-Lichtbogens	108
5.4.5	Temperaturabhängige Kristallisation bei Elektroden	109
5.4.6	Ermittlung der Stromdichte	111
<b>6.</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>112</b>
6.1	Verarbeitung von dotierten Wolframelektroden	112
6.1.1	Signifikante Einflußfaktoren beim Sintern	112
6.1.2	Verdichtungseigenschaften von dotiertem Wolfram	113
6.1.3	Eigenschaften der Dotierungselemente beim Sintern	114
6.1.4	Dotierungseinfluß auf die Rekristallisation von Wolfram	116
6.2	Schweißtechnische Eigenschaften von dotierten Wolframelektroden	117
6.2.1	Einfluß der Dotierung auf Zündfähigkeit und Standzeit	117
6.2.2	Einfluß des Gefüges auf Zündfähigkeit und Standzeit	118
6.2.3	Schweißverhalten bei veränderter Elektrodenoberfläche	120
6.2.4	Schweißtechnische Beurteilung der dotierten Wolframelektroden	121
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>122</b>
<b>8.</b>	<b>Ausgewählte Werkstoffkennwerte</b>	<b>125</b>
8.1	Wolfram und Wolframtrioxid	125
8.2	Lanthan und Lanthanoxid	126
8.3	Cer und Ceroxide	127
8.4	Yttrium und Yttriumoxid	128
8.5	Zirkonium und Zirkoniumoxid	129
8.6	Thorium und Thoriumoxid	130
<b>9.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>131</b>