

## Inhalt

<b>0. VORWORT UND DANKSAGUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>1. STAND DER TECHNIK DER TITANMATRIX-VERBUNDWERKSTOFFE.....</b>	<b>2</b>
1.1. Grundlagen.....	2
1.2. Komponenten des Titanmatrix-Verbundwerkstoffes.....	6
1.2.1. Titanmatrix.....	6
1.2.2. Siliziumkarbid-Fasern.....	7
1.2.3. Faserschutzschicht .....	8
1.3. Herstellungsverfahren .....	9
1.3.1. Folie-Faser-Folie-Verfahren .....	9
1.3.2. Faserbeschichtungsverfahren .....	9
1.3.3. Sonstige Verfahren.....	10
1.4. Innere Spannungen und Eigenspannungen im TMC .....	11
1.5. Eigenschaftsprofil des Titanmatrix-Verbundwerkstoffes .....	14
1.5.1. Mechanische Eigenschaften.....	14
1.5.1.1. Anisotropie.....	14
1.5.1.2. Querdehnzahlen .....	15
1.5.1.3. Statische Zugfestigkeit und E-Modul .....	16
1.5.1.4. Ermüdungsfestigkeit .....	19
1.5.1.5. Kriechverhalten.....	20
1.5.2. Physikalische Eigenschaften .....	23
1.5.2.1. Dichte .....	23
1.5.2.2. Wärmeausdehnungskoeffizient.....	23
1.6. Werkstoffmodellierung .....	25
1.6.1. Die Ebenen der Werkstoffmodellierung .....	25
1.6.2. Analytische Beschreibung .....	26
1.6.3. Rheologische Modelle .....	26
1.6.4. Versagenshypthesen.....	28
1.6.5. Bedeutung der verschiedenen Werkstoffmodelle .....	30
<b>2. ZIELSETZUNG DIESER ARBEIT .....</b>	<b>31</b>
<b>3. ERMÜDUNGSVERHALTEN VON TITANMATRIX-VERBUNDWERKSTOFFEN.....</b>	<b>32</b>
3.1. Grundsätzliches zum Ermüdungsverhalten.....	32
3.2. Untersuchung der inneren Spannungsentwicklung während zyklischer Beanspruchung .....	34
3.2.1. Bereich I bei Raumtemperatur .....	36

3.2.2. Bereich III bei Raumtemperatur .....	37
3.2.3. Bereich I bei 600°C .....	38
3.2.4. Bereich III bei 600°C .....	39
3.2.5. Einfluss des Lastverhältnisses R .....	40
3.2.6. Diskussion und analytischer Ansatz zur Ermüdungsfestigkeit .....	41
3.2.7. Lebensdauerabschätzung mittels FEM .....	42
<b>3.3. Entwicklung eines rheologischen Modells zur Vorhersage der Ermüdungseigenschaften.....</b>	<b>44</b>
<b>3.3.1. Fasereigenschaften .....</b>	<b>45</b>
3.3.1.1. Elastische Fasereigenschaften .....	45
3.3.1.2. Faserfestigkeit .....	46
<b>3.3.2. Matrixeigenschaften .....</b>	<b>46</b>
3.3.2.1. Elastische Matrixeigenschaften .....	46
3.3.2.2. Plastische Matrixeigenschaften .....	47
3.3.2.3. Kriecheigenschaften der Matrix .....	50
3.3.2.4. Matrixfestigkeit .....	51
<b>3.3.3. Experimentelle Charakterisierung der Matrixeigenschaften.....</b>	<b>52</b>
3.3.3.1. Spannungs-Dehnungsverhalten verschiedener Titanlegierungen .....	53
3.3.3.2. Kriechen von Titanlegierungen bei Raumtemperatur .....	54
3.3.3.3. Untersuchung der Interaktion von Kriechen und Fließen .....	59
<b>3.3.4. Diskussion der Faser- und Matrixeigenschaften .....</b>	<b>60</b>
<b>3.3.5. Berechnung der thermischen Eigenspannungen und -dehnungen .....</b>	<b>61</b>
<b>3.3.6. Bestimmung der Spannung in den Verbundkomponenten.....</b>	<b>62</b>
<b>3.3.7. Einfluss irreversibler Dehnungen auf die Eigenspannungen .....</b>	<b>62</b>
<b>3.3.8. Verfahren zur Ermittlung der Wöhlerkurve .....</b>	<b>64</b>
<b>3.3.9. Anwendung des rheologischen Modells zur Ermittlung der Wöhlerkurve von SCS-6/Ti-6-2-4-2 .....</b>	<b>65</b>
<b>3.3.10. Anwendung des rheologischen Modells zur Optimierung des Eigenspannungszustandes .....</b>	<b>67</b>
<b>3.3.11. Experimentelle Verifizierung der vorhergesagten Wöhlerkurven .....</b>	<b>69</b>
<b>3.3.12. Diskussion der Lebensdauervorhersage mit dem rheologischen Modell und der Eigenspannungsmodifikation.....</b>	<b>73</b>
<b>3.4. Analytischer Ansatz zur Eigenspannungsmodifikation.....</b>	<b>77</b>
<b>4. GRUNDELGENDE KONSTRUKTIONS- UND BAUWEISEN.....</b>	<b>79</b>
<b>4.1. Lokal verstärkte Bauteile.....</b>	<b>80</b>
<b>4.2. Gewickelte Bauteile.....</b>	<b>81</b>

4.3. Verstärkung durch Deckschichten .....	83
<b>5. QUANTIFIZIERUNG WEITERER EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN.....</b>	<b>84</b>
5.1. Ermüdungsversuche am 90°-Verbund .....	84
5.2. Untersuchung zur Anwendbarkeit der klasischen Laminattheorie für TMCs .....	87
5.2.1. Diskussion der Versagenshypothesen und des Einsatzes von TMC-Laminaten ..	90
5.3. Bauteilnahe Proben: Ermüdungsversuche an Verstärkungsenden.....	91
5.4. Finite-Element-Simulation des Einflusses von Faserverteilungsunregelmäßigkeiten..	95
5.4.1. Einsetzen des Matrixfließens bei axialer Zugspannung.....	97
5.4.2. Schadensmechanismen unter transversaler Zugbelastung.....	98
5.4.3. Diskussion der Ergebnisse und Korrelation mit experimentellen Werten.....	101
5.5. Dynamische Zugfestigkeit .....	102
<b>6. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>105</b>
<b>7. AUSBlick .....</b>	<b>107</b>
<b>8. REFERENZEN .....</b>	<b>109</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>118</b>
Formelzeichen .....	118
Indizes .....	119
Randbedingungen.....	120
Nomenklatur.....	121