

Dipl.-Ing. Gregor Steinmetz, Stuttgart

Interlaminares Bruchverhalten von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen

Reihe **18**: Mechanik/
Bruchmechanik

Nr. **221**

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen und Abkürzungen	IX
Zusammenfassung	XII
1 Einführung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Schäden in Faserverbundlaminate	3
1.3 Problemstellung	4
1.4 Zielsetzung und Vorgehensweise	5
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 Allgemeines	7
2.2 Materialgesetz	7
2.3 Bruchmechanik	10
2.3.1 Allgemeines	10
2.3.2 Spannungsfelder in Rißnähe und Spannungsintensitätsfaktoren	11
2.3.3 Energiebilanz eines gerissenen Körpers	12
2.3.4 Energiefreisetzungsrate und Rißzähigkeit	13
2.3.5 Numerische Ermittlung von Energiefreisetzungsraten bzw. Spannungsintensitätsfaktoren	14
2.3.5.1 Allgemeines	14
2.3.5.2 Zweimodelltechnik	15
2.3.5.3 Virtuelle Rißschließungsmethode	15
2.3.5.4 Virtuelle Rißerweiterungsmethode	19
2.3.5.5 <i>J</i> -Integral	19
2.3.6 Bestimmung der Rißzähigkeit eines Werkstoffes	20
2.3.6.1 Allgemeines	20
2.3.6.2 Nachgiebigkeitsmethode	21
2.3.6.3 Flächenmethode	22
2.3.6.4 <i>J</i> -Integral-Methode	23

3	Der interlaminare Bruch	24
3.1	Schadensmechanik	24
3.2	Verfahren zur Ermittlung der interlaminaren Rißzähigkeit	26
3.2.1	Prüfmethoden und Probenarten	26
3.2.1.1	Allgemeines	26
3.2.1.2	Modus I	27
3.2.1.3	Modus II	28
3.2.1.4	Modus III	29
3.2.1.5	Gemischter Modus (I/II)	30
3.2.2	Spezielle Auswertemethode basierend auf der korrigierten Biegetheorie	44
4	Experimenteller Teil	50
4.1	Untersuchtes Faserverbundmaterial	50
4.2	Herstellung und Präparation der Proben	51
4.2.1	Herstellung der Lamine	51
4.2.2	Qualitätskontrolle	51
4.2.3	Probenherstellung	52
4.3	Bestimmung der interlaminaren Rißzähigkeit	52
4.3.1	Verwendete Probentypen	52
4.3.2	Probenbeschreibung	53
4.3.3	Versuchsaufbau	54
4.3.3.1	Prüf- und Meßgeräte	54
4.3.3.2	DCB-Versuch	55
4.3.3.3	ELS-Versuch	55
4.3.3.4	MMELS-Versuch	56
4.3.3.5	MMB-Versuch	56
4.3.4	Versuchsdurchführung	57
4.3.4.1	Ablauf des Versuchs	57
4.3.4.2	“Precracking”	58
4.3.4.3	Belastungsgeschwindigkeit	58
4.3.4.4	Versuchsbedingungen	60
4.3.5	Versuchsauswertung	60
4.3.5.1	Allgemeines	60
4.3.5.2	Bestimmung der Probennachgiebigkeit	60
4.3.5.3	Bestimmung der kritischen Werte von Kraft und Weg	61

4.3.5.4	Bestimmung der bleibenden Verformung	62
4.3.5.5	Nachgiebigkeitsmethode	62
4.3.5.6	Flächenmethode	63
4.3.5.7	Auswertemethode basierend auf der korrigierten Balkentheorie	64
4.3.6	Ergebnisse	67
4.3.6.1	Darstellung	67
4.3.6.2	Die kritischen Kräfte F_{cK} und F_{c5}	67
4.3.6.3	DCB-Versuche	68
4.3.6.4	ELS-Versuche	71
4.3.6.5	MMELS-Versuche	74
4.3.6.6	MMB-Versuche	80
4.3.6.7	Fehlerbetrachtung	84
4.3.6.8	Versagenskriterium	86
4.3.6.9	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Rißzähigkeitsmessungen	88
4.4	Delaminationsausbreitung in druckbelasteten CFK-Plattenstreifen	90
4.4.1	Versuchsprogramm	90
4.4.2	Probenbeschreibung	91
4.4.3	Versuchsaufbau	92
4.4.4	Versuchsdurchführung	93
4.4.5	Ergebnisse	94
4.5	Fraktographie	100
5	Finite-Element-Analysen	104
5.1	Vorgehensweise	104
5.2	Bestimmung der Energiefreisetzungsraten	105
5.3	Konvergenzuntersuchung	105
5.4	FE-Analyse der Bruchmechanikproben	106
5.4.1	Modellerstellung	106
5.4.2	Materialdaten	108
5.4.3	Ergebnisse	110
5.4.3.1	Darstellung	110
5.4.3.2	DCB-Probe	110
5.4.3.3	MMELS-Probe	112
5.4.4	Zusammenfassung	115
5.5	FE-Analyse der Druckproben	117

5.5.1	Modellerstellung	117
5.5.2	Ergebnisse	119
6	Diskussion	129
7	Schlußfolgerungen und Ausblick	133
A	Materialkennwerte	136
B	Formeln	138
B.1	DCB-Versuch	138
B.2	ELS-Versuch	138
B.3	MMELS-Versuch	138
B.4	Korrekturfaktoren für DCB-, ELS- und MMELS-Versuche	139
B.5	MMB-Versuch	140
B.5.1	Ursprüngliche Vorrichtung	140
B.5.2	Modifizierte Vorrichtung	141
B.5.3	Korrekturfaktoren	141
C	Weitere Ergebnisse	143
C.1	Rißzähigkeitsversuche	143
C.2	Druckversuche	145
D	FE-Netze	147
	Literatur	153