

## SPIS TREŚCI

|   |    |
|---|----|
| OD AUTORA .....   | 7  |
| 1. WPROWADZENIE .....   | 9  |
| 1.1. Podstawowe informacje o materiałach kompozytowych .....  | 10 |
| 1.1.1. Kompozyty zbrojone cząstkami i dyspersyjnie .....  | 11 |
| 1.1.2. Kompozyty zbrojone włóknami .....  | 11 |
| 1.2. Typy i własności włókien.....  | 12 |
| 1.3. Typy i własności matryc.....   | 15 |
| 1.4. Budowa kompozytu .....   | 15 |
| 1.4.1. Warstwa .....  | 15 |
| 1.4.2. Laminat .....  | 16 |
| 1.4.3. Wytwarzanie kompozytów włóknistych .....   | 17 |
| 2. RÓWNANIA FIZYCZNE DLA KOMPOZYTÓW. KONFIGURACJA OSIOWA .....  | 21 |
| 2.1. Równania fizyczne dla materiałów anizotropowych .....  | 22 |
| 2.2. Równania fizyczne dla materiałów ortotropowych.....  | 24 |
| 2.2.1. Stałe inżynierskie dla materiałów ortotropowych .....  | 26 |
| 2.2.2. Związek macierzy sztywności z macierzą podatności i stałymi inżynierskimi .....  | 28 |
| 2.3. Związki fizyczne dla materiału ortotropowego w płaskim stanie naprężenia .....   | 30 |
| 2.4. Przykłady .....  | 33 |
| 3. ZWIĄZKI FIZYCZNE DLA MATERIAŁÓW ORTOTROPOWYCH.<br>KONFIGURACJA NIEOSIOWA .....   | 35 |
| 3.1. Transformacje tensorów naprężenia i odkształcenia. ....  | 36 |
| 3.2. Macierz sztywności warstwy w konfiguracji nieosiowej.....  | 39 |
| 3.2.1. Transformacja macierzy sztywności do konfiguracji nieosiowej<br>wykorzystaniem niezmienniczych charakterystyk warstwy..... | 41 |
| 3.3. Macierz podatności w konfiguracji nieosiowej. ....   | 42 |
| 3.4. Stałe inżynierskie w konfiguracji nieosiowej. ....   | 43 |
| 3.4.1. Macierz podatności w funkcji stałych inżynierskich. ....   | 43 |
| 3.4.2. Transformacja stałych inżynierskich . ....   | 45 |
| 3.5. Zależność między macierzą sztywności i podatności w układzie nieosiowym.....   | 47 |
| 3.6. Podsumowanie .....   | 47 |
| 3.7. Przykłady. ....  | 48 |
| 4. NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA W LAMINACIE. KLASYCZNA TEORIA LAMINACJI .....   | 53 |
| 4.1. Klasyczna teoria laminacji. ....   | 54 |
| 4.1.1. Założenia i podstawy teorii płyt cienkich.....   | 54 |

|  |            |
|--|------------|
| 4.1.2. Wypadkowe siły i momenty w laminacie.....   | 57         |
| 4.1.3. Podatność w laminatach.....   | 59         |
| 4.1.4. Macierze sztywności jako funkcje niezmienników.....                                 | 60         |
| 4.1.5. Stałe inżynierskie.....   | 62         |
| 4.2. Teoria laminacji z uwzględnieniem wpływu temperatury.....                             | 62         |
| 4.3. Przykłady.....  | 64         |
| <b>5. PODSTAWOWE TYPY LAMINATÓW WARSTWOWYCH.</b>   |            |
| <b>LAMINATY SYMETRYCZNE I ANTYSYMETRYCZNE.....</b>   | <b>75</b>  |
| 5.1. Klasyfikacja kompozytów.....  | 76         |
| 5.1.1. Definicje, określenia.....  | 76         |
| 5.1.2. Klasyfikacja kompozytów.....  | 78         |
| 5.2. Kompozyty symetryczne.....  | 79         |
| 5.2.1. Pojedyncze warstwy.....   | 80         |
| 5.2.2. Laminaty o kątowym ułożeniu warstw.....   | 81         |
| 5.2.3. Laminaty o poprzecznym ułożeniu warstw.....   | 85         |
| 5.3. Kompozyty antysymetryczne.....  | 87         |
| 5.3.1. Laminaty o kątowym ułożeniu warstw, zrównoważone.....                               | 87         |
| 5.3.2. Laminaty o poprzecznym ułożeniu warstw, zrównoważone.....                           | 89         |
| 5.4. Kompozyty quasi-izotropowe.....   | 91         |
| 5.5. Kompozyty o warstwach izotropowych.....   | 93         |
| 5.6. Przykłady.....  | 93         |
| <b>6. WYTRZYMAŁOŚĆ KOMPOZYTÓW WARSTWOWYCH.....</b>   | <b>99</b>  |
| 6.1. Nośność warstwy ortotropowej, jednokierunkowo zbrojonej.....                          | 100        |
| 6.1.1. Kryterium naprężenia maksymalnego.....  | 102        |
| 6.1.2. Kryterium odkształcenia maksymalnego.....   | 104        |
| 6.1.3. Kryterium Azzi'ego - Tsai'a - Hill'a.....   | 105        |
| 6.1.4. Kryterium Tsai'a - Wu.....  | 107        |
| 6.2. Wytrzymałość warstwowych laminatów kompozytowych.....                                 | 108        |
| 6.3. Przykłady.....  | 112        |
| <b>7. MIKROMECHANIKA KOMPOZYTÓW.....</b>   | <b>133</b> |
| 7.1. Charakterystyki materiałowe kompozytu. Podejście mechaniki materiałów.....            | 137        |
| 7.1.1. Podłużny moduł Younga $E_1$ .....   | 138        |
| 7.1.2. Większy współczynnik Poisson'a $\nu_{12}$ .....                                     | 140        |
| 7.1.3. Poprzeczny moduł Younga $E_2$ .....   | 141        |
| 7.1.4. Moduł ścinania $G_{12}$ .....   | 143        |
| 7.1.5. Mniejszy współczynnik Poisson'a $\nu_{21}$ .....                                    | 144        |
| 7.1.6. Współczynnik podłużnej rozszerzalności cieplnej $\alpha_1$ .....                    | 144        |
| 7.1.7. Współczynnik poprzecznej rozszerzalności cieplnej $\alpha_2$ .....                  | 145        |
| 7.1.8. Kombinowany model mikromechaniczny.....   | 146        |
| 7.1.9. Podsumowanie podejścia mikromechaniki materiałów.....                               | 151        |
| 7.2. Charakterystyki materiałowe kompozytu. Podejście semi-empiryczne Halpina -Tsai'a..... | 152        |
| 7.3. Wytrzymałość kompozytu. Podejście mechaniki materiałów.....                           | 155        |
| 7.3.1. Wytrzymałość przy rozciąganiu w kierunku włókien.....                               | 155        |
| 7.3.2. Wytrzymałość kompozytu przy ściskaniu w kierunku włókien.....                       | 168        |

|   |     |
|---|-----|
| 7.4. Przykłady .....  | 176 |
| 8. UWAGI KOŃCOWE. WYBRANE PROBLEMY .....  | 179 |
| 8.1. Podsumowanie .....   | 180 |
| 8.2. Metody łączenia elementów kompozytowych.....   | 181 |
| 8.2.1. Połączenia klejone .....   | 181 |
| 8.2.2. Połączenia śrubowe .....   | 184 |
| 8.3. Koncentracja naprężeń wywołana otworem .....   | 186 |
| 8.4. Podstawowe informacje o mechanice pękania .....  | 189 |
| 8.4.1. Podstawy liniowej mechaniki pękania.....   | 189 |
| 8.4.2. Mechanika pękania w odniesieniu do materiałów anizotropowych. ....                                   | 191 |
| 8.4.3. Mechanika pękania kompozytów .....   | 193 |
| WYBRANE POZYCJE LITERATURY .....  | 199 |
| DODATEK 1.  |     |
| Macierze sztywności tarczowej, sprzężeń i zginania dla laminatów symetrycznych<br>i antysymetrycznych ..... | 203 |
| DODATEK 2   |     |
| Podstawowe zależności i równania mechaniki kompozytów włóknistych .....                                     | 207 |