

ELEMENTY SPRĘŻYSTE ZAWIESZEŃ POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

**Adam M. WITTEK
Bogusław ŁAZARZ**

**WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLASKIEJ
GLIWICE 2020
UIW 48600**

Opiniodawcy

Prof. dr hab. inż. Wojciech BATKO

Prof. dr hab. inż. Zbigniew DĄBROWSKI

Kolegium redakcyjne

REDAKTOR NACZELNY – Prof. dr hab. inż. Andrzej BUCHACZ

REDAKTOR DZIAŁU – Prof. dr hab. inż. Piotr CZECH

SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Jolanta NIDERLA-WITKOWSKA

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Śląskiej

Projekt okładki

Mgr inż. arch. Agnieszka MĘDREK

ISBN 978-83-7880-710-0

© Copyright by

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej

Gliwice 2020

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	11
1.1. Rys historyczny.....	12
1.2. Rodzaje zawiesznień stosowanych w współczesnych samochodach.....	14
1.3. Zawiesznienia zależne	15
1.4. Zawiesznienia niezależne.....	17
1.4.1. Typy zawiesznień niezależnych osi przedniej.....	17
1.4.2. Typy zawiesznień niezależnych osi tylnej	19
1.5. Zawiesznienia półzależne z wahaczami sprzężonymi	21
1.6. Elementy składowe zawieszenia samochodowego	22
1.6.1. Wahacze.....	22
1.6.2. Resory piórowe	23
1.6.3. Sprężyny śrubowe.....	24
1.6.4. Drażki skrętne	24
1.6.5. Drażki reakcyjne	25
1.6.6. Stabilizatory przechyłów	25
1.6.7. Sprężyste elementy gumowe.....	26
1.6.8. Amortyzatory	27
1.7. Podział zawiesznień (kryterium funkcyjne), modelowanie zawiesznień	27
1.8. Kinematyka pojazdu samochodowego	31
1.9. Niesprawności zawiesznień.....	36
Literatura	36
2. WAHACZE.....	38
2.1. Wahacze porzeczne.....	38
2.2. Wahacze poprzeczne w połączeniu z resorem piórowym	41
2.3. Wahacze porzeczne w zawieszeniu - kolumna McPhersona	43
2.4. Wahacze wzdluzne	44
2.5. Wahacze skośne.....	46
2.6. Obliczenia wytrzymałościowe wahaczy	48
2.7. Materiały stosowane do produkcji wahaczy	49
2.8. Produkcja wahaczy	51
2.8.1. Kucie matrycowe wahaczy	51
2.8.2. Odlewnictwo wahaczy	53
2.8.3. Wytlaczanie wahaczy.....	53
2.9. Uszkodzenia i naprawa wahaczy oraz elementów łączących	56
Literatura	57
3. RESORY PIÓROWE	59
3.1. Resory piórowe trapezowe o charakterystyce liniowej.....	60
3.2. Resory piórowe z charakterystyką progresywną.....	64
3.2.1. Resor piórowy trapezowy główny z resorem dodatkowym.....	64
3.2.2. Resor piórowy paraboliczny główny z resorem dodatkowym.....	65
3.2.3. Obliczenia wytrzymałościowe (rozkład naprężeń) w końcówkach (tzw. uchach) resora piórowego.....	67

3.3. Jednostronnie utwierdzone, poddane zginaniu pióro resora	68
3.4. Montaż - mocowanie piór oraz tulei	73
3.5. Tolerancje wykonawcze uch (końcówek) resora piórowego	76
3.6. Obliczenia optymalnej krzywizny pióra resorowego	77
3.7. Obliczenia wytrzymałościowe pióra parabolicznego resora piórowego	78
3.7.1. Przykład obliczeniowy	80
3.8. Materiały stosowane do produkcji resorów piórowych	81
3.9. Produkcja resorów piórowych	82
3.10. Uszkodzenia i naprawa resorów piórowych oraz elementów łączących	86
Literatura	89
4. SPRĘŻYNY ŚRUBOWE	90
4.1. Charakterystyki liniowe i progresywne sprężyn śrubowych	91
4.2. Podstawy obliczeniowe sprężyn śrubowych, naciskowych o charakterystyce liniowej	93
4.3. Sprężynowanie poprzeczne	97
4.4. Wyboczenie sprężyn	99
4.5. Obliczenia stopniowej sprężyny warstwowej	100
4.6. Obliczenia wytrzymałościowe sprężyny śrubowej	103
4.6.1. Przykład obliczeniowy	104
4.7. Materiały stosowane do produkcji sprężyn śrubowych	105
4.7.1. Standardowe materiały stosowane w produkcji sprężyn śrubowych	106
4.7.2. Wpływ dodatków stopowych	106
4.8. Produkcja – nawijanie/formowanie sprężyn resorowych na gorąco i zimno	107
4.8.1. Wybór procesu produkcyjnego	109
4.8.2. Nagrzewanie gazowe i indukcyjne	111
4.8.3. Ulepszanie cieplne	112
4.8.3.1. Hartowanie i schładzanie	113
4.8.3.2. Odpuszczanie	114
4.8.4. Zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej przez zastosowanie śrutowania	114
4.8.4.1. Śrutowanie naprężeniowe sprężyn śrubowych	115
4.8.5. Lakierowanie proszkowe sprężyn śrubowych	117
4.8.6. Kontrola rozkładu sił i rozkładu naprężeń w obciążonej sprężynie	118
4.9. Uszkodzenia i naprawa sprężyn śrubowych	119
Literatura	121
5. DRAŻKI SKRĘTNE	122
5.1. Obliczenia wytrzymałościowe i wymogi konstrukcyjne drążków skrętnych o przekroju kołowym	123
5.2. Obliczenia wytrzymałościowe i wymogi konstrukcyjne drążków skrętnych o zmiennym przekroju prostokątnym	130
5.3. Obliczenia wytrzymałościowe i wymogi konstrukcyjne drążków skrętnych o przekroju prostokątnym (pakiet płaskowników)	132
5.4. Obliczenia wytrzymałościowe i wymogi konstrukcyjne drążków skrętnych z dźwignią wahliwą	133
5.5. Obliczenia wytrzymałościowe i wymogi konstrukcyjne w układach równoległych drążków skrętnych	135
5.6. Obliczenia wytrzymałościowe i wymogi konstrukcyjne układu szeregowego drążek skrętny – rura skrętna	137
5.7. Obliczenia wytrzymałościowe drążka skrętnego	138
5.7.1. Przykład obliczeniowy	140
5.8. Materiały stosowane do produkcji drążków skrętnych	142
5.9. Produkcja drążków skrętnych	143
5.9.1. Tolerancje wykonawcze drążków skrętnych	144
5.10. Uszkodzenia i naprawa drążków skrętnych oraz elementów łączących	145
Literatura	145

6. DRAŻKI REAKCYJNE	147
6.1. Drażek Panharda	147
6.2. Drażek Watta.....	149
Literatura	151
7. STABILIZATORY SAMOCHODOWE	152
7.1. Konstrukcja stabilizatora samochodowego.....	154
7.2. Podstawy obliczeń wytrzymałościowych stabilizatorów samochodowych	155
7.2.1. Obliczeniowe ugięcie pionowe stabilizatora 2s	158
7.2.2. Obliczenie naprężeń w obciążonym stabilizatorze	159
7.3. Przykład obliczeniowy	160
7.4. Rodzaje stali stosowanych do produkcji stabilizatorów	163
7.4.1. Wpływ dodatków stopowych na własności stali.....	166
7.4.2. Uwagi.....	168
7.5. Produkcja stabilizatorów, gięcie – formowanie na gorąco i zimno	169
7.5.1. Fosforanowanie – tworzenie powłok fosforanowych	173
7.5.2. Śrutowanie kulkowe	174
7.5.3. Nawęglanie (opcjonalnie)	176
7.5.4. Lakierowanie proszkowe	177
7.5.5. Kształtowanie końcówek	178
7.6. Uszkodzenia i naprawa stabilizatorów oraz elementów łączących.....	180
Literatura	181
8. AMORTYZATORY	183
8.1. Typowe amortyzatory współczesnych samochodów osobowych.....	184
8.1.1. Zasada działania jednorurowego amortyzatora hydropneumatycznego (hydraulicznego)	185
8.1.2. Zasada działania dwururowego amortyzatora hydropneumatycznego (hydraulicznego)	185
8.2. Podstawy obliczeniowe amortyzatorów samochodowych.....	186
8.3. Modele obliczeniowe amortyzatorów samochodowych	188
8.4. Uszkodzenia i naprawa amortyzatorów	189
8.5. Diagnostyka amortyzatorów	191
Literatura	194
9. ŁOŻYSKOWANIE ELASTYCZNE	195
9.1. Cechy charakteryzujące łożyskowanie elastyczne.....	196
9.1.1. Naprężenia dopuszczalne.....	197
9.1.2. Osadzanie lub pełzanie gumowych elementów sprężystych	198
9.1.3. Zmiany stałej sprężystej w zależności od zmian twardości Shore'a.....	198
9.1.4. Współczynnik usztywnienia stałej sprężystej przy dynamicznym obciążeniu	199
9.1.5. Obliczenia wytrzymałościowe typowych gumowych elementów sprężystych	199
9.2. Podstawowe teoretyczne wytyczne do obliczeń wytrzymałościowych łożyskowania elastycznego stabilizatorów	205
9.3. Obliczenia wytrzymałościowe łożysk elastycznych stabilizatora	206
9.3.1. Przykład obliczeniowy	208
9.4. Ograniczniki skoku i dodatkowe elementy sprężyste.....	208
9.5. Materiały stosowane do produkcji elementów sprężystych / gumowych.....	210
9.6. Uszkodzenia i naprawa elementów sprężystych / gumowych.....	211
Literatura	212
10. METODY BADAWCZE ELEMENTÓW SPRĘŻYSTYCH ZAWIESZEŃ POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH	213
10.1. Badania metalograficzne	214
10.2. Badania metalograficzne makroskopowe.....	214

10.3.	Badania metalograficzne mikroskopowe	218
10.3.1.	Metoda obserwacji w polu jasnym	218
10.3.2.	Metoda obserwacji w polu ciemnym	219
10.3.3.	Metoda obserwacji w świetle spolaryzowanym	219
10.3.4.	Metoda obserwacji w kontraście interferencyjnym	220
10.3.5.	Metoda obserwacji w kontraście fazowym	220
10.4.	Przygotowanie próbek	221
10.4.1.	Przygotowanie próbek do badań metalograficznych	221
10.4.2.	Przykłady obserwacji zglądów do badań metalograficznych mikroskopowych	222
10.5.	Mikroskopy metalograficzne	223
10.5.1.	Zdolność rozdzielcza mikroskopu	224
10.5.2.	Powiększenie użyteczne mikroskopu	224
10.5.3.	Przykład doboru okularu do obiektywu	224
Literatura		225
10.6.	Metody pomiarów twardości	226
10.6.1.	Pomiar twardości metodą Brinella	226
10.6.2.	Pomiar twardości metodą Vickersa	227
10.6.3.	Pomiar twardości metodą Rockwella	229
10.7.	Zależności pomiędzy wynikami pomiarów twardości Brinella, Vickersa i Rockwella oraz wytrzymałością na rozciąganie R_m	230
Literatura		233
10.8.	Statyczna próba rozciągania	234
10.8.1.	Interpretacja wykresu rozciągania próbki z materiału sprężysto-plastycznego i sprężysto-kruchego	235
10.8.2.	Przygotowanie próbek do statycznej próby rozciągania	237
10.8.3.	Maszyny wykorzystywane do statycznej próby rozciągania	238
Literatura		240
10.9.	Badania wytrzymałościowe	241
10.9.1.	Wielkości wpływające na zmęczenie materiału	241
10.9.2.	Współczynnik kształtu α_k	242
10.9.3.	Współczynnik działania karbu β_k	245
10.9.4.	Współczynnik stanu powierzchni β_p	246
10.9.5.	Współczynnik spiętrzenia naprężeń β	248
10.9.6.	Współczynnik wielkości przedmiotu γ_k	248
10.10.	Badania zmęczeniowe (Wöhler - Smith - Haigh)	249
10.11.	Krzywe Wöhlera	254
10.12.	Wykresy zmęczeniowe Smitha i Haigha	257
10.13.	Obliczenia wytrzymałościowe dla prostego stanu naprężenia – przypadek symetrycznego cyklu obciążenia	261
10.14.	Przełomy zmęczeniowe, typowe uszkodzenia elementów sprężystych pojazdów samochodowych	267
Literatura		269
11. PRZYKŁADY OBLICZENIOWE		271
11.1.	Przykład obliczeń wytrzymałościowych naciskowej sprężyny śrubowej z wykorzystaniem programu obliczeniowego KissSoft	271
11.2.	Przykład obliczeń wytrzymałościowych drążka skrętnego z wykorzystaniem programu obliczeniowego KissSoft	278
11.3.	Przykład obliczeń wytrzymałościowych obciążonego, pracującego stabilizatora samochodowego z wykorzystaniem programu obliczeniowego firmy TKF&S	282
11.4.	Przykład obliczeń wytrzymałościowych drążka skrętnego podlegającego jednoczesnemu współfazowemu, wahadłowemu zginaniu i skręcaniu	284
Literatura		288
Streszczenie		289

TABLE OF CONTENTS

1. INTRODUCTION	11
1.1. Historical outline	12
1.2. Types of suspensions used in modern cars	14
1.3. Dependent suspensions	15
1.4. Independent suspensions	17
1.4.1. Types of independent front axle suspensions	17
1.4.2. Types of independent rear axle suspensions	19
1.5. Semi-independent suspensions with coupled suspension arms	21
1.6. Components of vehicle suspension	22
1.6.1. Suspension arms	22
1.6.2. Leaf springs	23
1.6.3. Coil springs	24
1.6.4. Torsion bars	24
1.6.5. Reaction rods	25
1.6.6. Anti-roll bar	25
1.6.7. Elastic rubber elements	26
1.6.8. Shock absorbers	27
1.7. Division of suspensions (functional criterium), suspension modelling	27
1.8. Motor vehicle kinematics	31
1.9. Suspension faults	36
Literature	36
2. SUSPENSION ARMS	38
2.1. Wishbones	38
2.2. Wishbones combined with leaf spring	41
2.3. Wishbones in the suspension – MacPherson strut	43
2.4. Trailing arms	44
2.5. Track control arms	46
2.6. Strength calculations for suspension arms	48
2.7. Materials used to manufacture suspension arms	49
2.8. Manufacturing of suspension arms	51
2.8.1. Die forging of suspension arms	51
2.8.2. Founding of suspension arms	53
2.8.3. Extrusion of suspension arms	53
2.9. Defects and repair of suspension arms and connecting elements	56
Literature	57
3. LEAF SPRINGS	59
3.1. Trapezoidal leaf springs with linear characteristics	60
3.2. Leaf springs with progressive characteristic	64
3.2.1. Main trapezoidal leaf spring with additional spring	64
3.2.2. Main parabolic leaf spring with additional leaf spring	65
3.2.3. Strength calculations (distribution of stresses) at leaf spring ends (so-called lugs)	67
3.3. One-side fixed, bent spring leaf	68

3.4.	Assembly - leaf and bushing fastening	73
3.5.	Leaf spring lug (end) fabrication tolerances	76
3.6.	Optimal leaf spring curvature calculations	77
3.7.	Strength calculations for parabolic leaf of leaf spring	78
3.7.1.	Calculation example.....	80
3.8.	Materials used to manufacture of leaf springs	81
3.9.	Leaf spring manufacturing	82
3.10.	Defects and repair of leaf springs and connecting elements.....	86
	Literature	88
4.	COIL SPRINGS	90
4.1.	Linear and progressive characteristics of coil springs.....	91
4.2.	Calculation bases for pressure coil springs with linear characteristics	93
4.3.	Transverse springing	97
4.4.	Spring buckling	99
4.5.	Calculations for graduated layered spring.....	100
4.6.	Coil spring strength calculations	103
4.6.1.	Calculation example	104
4.7.	Materials used to manufacture coil springs.....	105
4.7.1.	Standard materials used to manufacture coil springs	106
4.7.2.	Effect of alloying additions	106
4.8.	Manufacturing - coiling / hot and cold forming of suspension springs.....	107
4.8.1.	Manufacturing process selection	109
4.8.2.	Gas and induction heating	111
4.8.3.	Toughening.....	112
4.8.3.1.	Hardening and cooling.....	113
4.8.3.2.	Tempering.....	114
4.8.4.	Increasing fatigue strength by the use of shot peening.....	114
4.8.4.1.	Stress shot peening of coil springs.....	115
4.8.5.	Powder coating of coil springs	117
4.8.6.	Checking distribution of forces and distribution of stresses in a spring under load.....	118
4.9.	Defects and repair of coil springs.....	119
	Literature	121
5.	TORSION BARS.....	122
5.1.	Strength calculations and design requirements of torsion bars with circular cross-section	123
5.2.	Strength calculations and design requirements of torsion bars with variable rectangular cross-section.....	130
5.3.	Strength calculations and design requirements for torsion bars with rectangular cross-section (flat bar pack)	132
5.4.	Strength calculations and design requirements for torsion bars with rocking lever	133
5.5.	Strength calculations and design requirements in parallel arrangements of torsion bars	135
5.6.	Strength calculations and design requirements for torsion bar - torsion tube serial arrangement	137
5.7.	Torsion bar strength calculations.....	138
5.7.1.	Calculation example.....	140
5.8.	Materials used to manufacture torsion bars	142
5.9.	Manufacturing of torsion bars	143
5.9.1.	Torsion bar fabrication tolerances.....	144
5.10.	Defects and repair of torsion bars and connecting elements	145
	Literature	145
6.	REACTION ROD.....	147
6.1.	Panhard rod	147
6.2.	Watt's linkage	149
	Literature	151

7. CAR STABILIZER BARS	152
7.1. Stabilizer bar design	154
7.2. Bases for stabilizer bar strength calculations	155
7.2.1. Computational vertical deflection of 2s stabilizer bar	158
7.2.2. Calculation of stresses in a stabilizer bar under load	159
7.3. Calculation example	160
7.4. Steel used to manufacture stabilizer bars	163
7.4.1. Effect of alloying additions on steel properties	166
7.4.2. Remarks	168
7.5. Manufacturing of stabilizer bars, bending - hot and cold forming	169
7.5.1. Phosphatizing (phosphate coating)	173
7.5.2. Shot blasting	174
7.5.3. Carburizing (optional)	176
7.5.4. Powder coating	177
7.5.5. End forming	178
7.6. Defects and repair of stabilizer bars and connecting elements	180
Literature	181
8. SHOCK ABSORBERS	183
8.1. Typical shock absorbers in modern motor cars	184
8.1.1. Single-tube hydropneumatic (hydraulic) shock absorber working principle	185
8.1.2. Twin-tube hydropneumatic (hydraulic) shock absorber working principle	185
8.2. Computational bases for car shock absorbers	186
8.3. Computational models of car shock absorbers	188
8.4. Defects and repair of shock absorbers	189
8.5. Shock absorber diagnostics	191
Literature	194
9. FLEXIBLE MOUNTING	195
9.1. Characteristic features of flexible mounting	196
9.1.1. Permissible stresses	197
9.1.2. Setting or creeping of rubber elastic elements	198
9.1.3. Elastic constant variations depending on Shore hardness variations	198
9.1.4. Stiffness ratio of elastic constant with dynamic load	199
9.1.5. Strength calculations for typical rubber elastic elements	199
9.2. Basic theoretical guidelines for stabilizer bar flexible mounting strength calculations	205
9.3. Strength calculations for flexible shock absorber bearings	206
9.3.1. Calculation example	208
9.4. Travel limiters and additional elastic elements	208
9.5. Materials used to manufacture elastic / rubber elements	210
9.6. Defects and repair of elastic elements	211
Literature	212
10. METHODS FOR TESTING ELASTIC ELEMENTS OF MOTOR VEHICLE SUSPENSIONS	213
10.1. Metallographic testing	214
10.2. Macroscopic metallographic research	214
10.3. Microscopic metallographic research	218
10.3.1. Bright field observation	218
10.3.2. Dark field observation	219
10.3.3. Polarized light observation	219
10.3.4. Interference contrast observation	220
10.3.5. Phase contrast observation	220
10.4. Specimen preparation	221
10.4.1. Specimen preparation for metallographic testing	221
10.4.2. Examples of microsection observation for microscopic metallographic testing	222

10.5. Metallographic microscopes.....	223
10.5.1. Microscope resolving power.....	224
10.5.2. Useful microscope magnification	224
10.5.3. Example of objective eyepiece selection	224
Literature	225
10.6. Hardness testing methods	226
10.6.1. Hardness testing using Brinell method	226
10.6.2. Hardness testing using Vickers method	227
10.6.3. Hardness testing using Rockwell method	229
10.7. Relationships between Brinell, Vickers and Rockwell hardness testing results and tensile strength R_m	230
Literature	233
10.8. Static tensile test	234
10.8.1. Interpretation of elastic-plastic and elastic-brittle material tensile specimen diagram.....	235
10.8.2. Specimen preparation for static tensile test.....	237
10.8.3. Machines used for static tensile testing.....	238
Literature	240
10.9. Strength testing.....	241
10.9.1. Values influencing material fatigue	241
10.9.2. Shape factor α_k	242
10.9.3. Notch factor β_k	245
10.9.4. Surface condition factor β_p	246
10.9.5. Stress concentration factor β	248
10.9.6. Object size factor γ_k	248
10.10. Fatigue testing (Wöhler - Smith - Haigh).....	249
10.11. Wöhler's curves	254
10.12. Smith and Haigh fatigue diagrams	257
10.13. Strength calculations for simple stress condition – symmetric load cycle case	261
10.14. Fatigue breakthroughs, typical damages to elastic elements in motor cars	267
Literature	269
11. CALCULATION EXAMPLES	271
11.1. Example of pressure coil spring strength calculations using KissSoft calculation program.....	271
11.2. Example of torsion bar strength calculations using the KissSoft calculation program	278
11.3. Example of working, loaded shock absorber strength calculations bars using the TKF&S calculation program.....	282
11.4. Example of strength calculations for a torsion bar subject to simultaneous cophasal, oscillatory bending and torsion	284
Literature	288
Abstract	290