

---

# Obsah

1.	ÚVOD — <i>Ing. M. Vocel, CSc.—Ing. V. Dufek, CSc.</i> . . . . .	11
1.1	K historii oboru tření a opotřebení . . . . .	12
1.2	Souvislost nauky o tření a opotřebení s jinými oblastmi vědy a techniky	16
2.	OBECNÁ ČÁST . . . . .	18
2.1	Význam tření a opotřebení v technice — <i>Ing. M. Vocel, CSc.</i> . . . .	18
2.2	Definice a klasifikace tření — <i>Ing. V. Dufek, CSc.—Ing. M. Vocel, CSc.</i>	21
2.3	Definice, klasifikace a identifikace základních druhů opotřebení — <i>Ing. M. Vocel, CSc.</i> . . . . .	23
2.3.1	Styk reálných těles . . . . .	24
2.3.2	Základní druhy opotřebení . . . . .	27
2.3.2.1	Adhezivní opotřebení . . . . .	28
2.3.2.2	Abrazivní opotřebení . . . . .	30
2.3.2.3	Erozivní opotřebení . . . . .	32
2.3.2.4	Kavitační opotřebení . . . . .	34
2.3.2.5	Únavové opotřebení . . . . .	36
2.3.2.6	Vibrační opotřebení . . . . .	37
2.3.3	Případy kombinovaného opotřebení a namáhání součástí . . . . .	39
2.4	Analýza opotřebení u strojních součástí — <i>Ing. M. Vocel, CSc.</i> . . . .	41
2.5	Cesty ke zvyšování životnosti exponovaných strojních částí — <i>Ing. M. Vocel, CSc.</i> . . . . .	46
2.5.1	Snížení nebo vyloučení tření u kluzných dvojic . . . . .	46
2.5.2	Zlepšení podmínek tření . . . . .	46
2.5.3	Použití vhodných materiálů . . . . .	47
2.5.4	Zvýšení rezervy životnosti exponovaných součástí . . . . .	48
2.5.5	Rovnoměrné rozdělení opotřebení na funkční ploše . . . . .	49
2.5.6	Řešení strojů se zřetelem na snadnou údržbu . . . . .	49
2.5.7	Kompenzace opotřebení . . . . .	50
2.5.8	Závěr . . . . .	50
3.	TŘENÍ — <i>Ing. V. Dufek, CSc.</i> . . . . .	51
3.1	Studium zákonitostí vnějšího tření . . . . .	51

3.1.1	Zákony odvozené z mechanické teorie tření . . . . .	53
3.1.2	Adhezni teorie tření . . . . .	56
3.2	Povrch a jeho význam při tření . . . . .	60
3.2.1	Morfologie povrchu . . . . .	60
3.2.2	Fyzikální stav povrchu . . . . .	65
3.2.3	Třecí mezivrstva . . . . .	67
3.2.4	Styk povrchů strojních součástí v podmínkách tření . . . . .	73
3.3	Vlastnosti materiálových dvojic, souvisící s třením . . . . .	74
3.3.1	Fyzikální a mechanické vlastnosti . . . . .	75
3.3.2	Kluzné a třecí vlastnosti . . . . .	78
3.4	Příklady typických materiálů kluzných a třecích dvojic . . . . .	83
3.4.1	Kluzná ložiska, ucpávky a těsnění . . . . .	84
3.4.2	Poznámka k materiálům valivých ložisek a ozubených kol . . . . .	88
3.4.3	Strojní součásti s povrchovou úpravou pomocí tuhých maziv . . . . .	89
3.4.4	Třecí materiály . . . . .	94
3.5	Souhrn zásad pro navrhování a konstrukci uzlů tření . . . . .	97
4.	OPOTŘEBENÍ . . . . .	102
4.1	Opotřebení — průběh a měřené veličiny — <i>Ing. M. Vocel, CSc.</i> . . . .	102
4.1.1	Časový průběh opotřebení . . . . .	102
4.1.2	Hodnocení opotřebení . . . . .	104
4.2	Adhezivní opotřebení — <i>Ing. J. Suchánek, CSc.</i> . . . . .	105
4.2.1	Podstata procesu adhezivního opotřebení . . . . .	105
4.2.1.1	Kvantitativní zákonitosti adhezivního opotřebení . . . . .	110
4.2.2	Vliv různých faktorů na adhezivní opotřebení . . . . .	113
4.2.2.1	Vliv zatížení . . . . .	113
4.2.2.2	Vliv tepelného režimu . . . . .	115
4.2.2.3	Vliv mazání . . . . .	116
4.2.2.4	Vliv použité dvojice materiálů . . . . .	117
4.2.2.5	Vliv výrobní technologie . . . . .	118
4.2.2.6	Vliv okolního prostředí . . . . .	120
4.2.3	Výběr dvojic materiálů pro případy adhezivního opotřebení . . . . .	121
4.2.4	Praktické příklady opotřebení některých důležitých strojních uzlů . . . .	123
4.2.4.1	Vložky válců a pístní kroužky . . . . .	123
4.2.4.2	Kluzná ložiska . . . . .	126
4.2.4.3	Axiální ucpávky odstředivých čerpadel . . . . .	128
4.2.4.4	Ventilová zdvihátka a vačkové hřídele . . . . .	129
4.2.4.5	Křížový čep diferenciálu . . . . .	131
4.2.4.6	Kovací zápustky . . . . .	132
4.2.4.7	Řezné nástroje . . . . .	134
4.3	Abrazivní opotřebení — <i>Ing. M. Vocel, CSc.</i> . . . . .	135
4.3.1	Závislost opotřebení na abrazivních částicích . . . . .	140
4.3.1.1	Kritická velikost abrazivních částic . . . . .	144

4.3.1.2	Tvar abrazivních částic . . . . .	147
4.3.1.3	Pevnost abrazivních částic . . . . .	149
4.3.1.4	Vliv kluzné rychlosti na abrazivní opotřebení . . . . .	153
4.3.1.5	Vliv tvrdosti abraziva na opotřebení . . . . .	155
4.3.1.6	Vliv vlhkosti na abrazivní opotřebení . . . . .	161
4.3.1.7	Závislost poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení $\Psi$ na některých fyzikálně mechanických veličinách . . . . .	163
4.3.1.8	Vliv struktury na abrazivní opotřebení . . . . .	169
4.3.1.9	Vliv legování a tepelného zpracování na odolnost proti abrazivnímu opotřebení . . . . .	172
4.3.1.10	Odolnost jiných heterogenních materiálů v podmínkách abraze . . . . .	179
4.3.2	Opotřebení abrazivními částicemi mezi dvěma funkčními povrchy . . . . .	183
4.3.2.1	Kritická velikost abrazivního zrna u kluzných dvojic . . . . .	188
4.3.2.2	Vliv provozních parametrů na abrazivní opotřebení kluzných dvojic . . . . .	189
4.3.3	Hodnocení odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení . . . . .	191
4.3.3.1	Porovnávací zkoušky abrazivního opotřebení . . . . .	192
4.3.4	Volba materiálu pro podmínky abrazivního opotřebení . . . . .	197
4.3.4.1	Hodnocení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení u ocelí třídy 11 až 17 . . . . .	200
4.3.4.2	Nástrojové oceli třídy 19 . . . . .	207
4.3.4.3	Odolnost některých návarových slitin proti abrazivnímu opotřebení . . . . .	211
4.3.4.4	Některé typy speciálních bílých litin . . . . .	215
4.3.4.5	Odolnost některých materiálů na odlitky proti abrazivnímu opotřebení . . . . .	217
4.3.4.6	Oceli se zvýšenou mezí kluzu a zvýšenou odolností proti atmosférické korozi . . . . .	221
4.3.4.7	Odolnost proti abrazivnímu opotřebení některých neželezných kovů, dřev a epoxidových pryskyřic s plnivý . . . . .	221
4.3.5	Příklady řešení strojních součástí do podmínek intenzivního abrazivního opotřebení . . . . .	225
4.3.5.1	Segmenty klasifikátorů . . . . .	225
4.3.5.2	Matrice granulátorů . . . . .	226
4.3.5.3	Závady u 13 % Mn austenitické oceli na tlukadlech pro mlýny . . . . .	229
4.3.5.4	Rypné orgány velkorýpadel na hnědouhelných povrchových dolech . . . . .	231
4.4	Erozivní opotřebení — <i>Ing. M. Vocel, CSc.</i> . . . . .	233
4.4.1	Erozivní opotřebení částicemi . . . . .	235
4.4.1.1	Kritická velikost zrna . . . . .	242
4.4.1.2	Vliv rychlosti dopadu částic na intenzitu opotřebení . . . . .	242
4.4.1.3	Změny koncentrace dopadajících částic při proudění média . . . . .	245
4.4.1.4	Vliv chemického působení média . . . . .	248
4.4.2	Eroze vyvolaná proudícím médiem bez tvrdých částic . . . . .	250
4.4.2.1	Eroze vyvolaná kapkovým úderem kapaliny . . . . .	252
4.4.3	Metody hodnocení odolnosti materiálů proti erozi . . . . .	254
4.4.3.1	Provozní zkoušky . . . . .	256
4.4.4	Volba materiálu pro podmínky erozivního opotřebení částicemi . . . . .	258

4.4.4.1	Zkoušky nástrojových ocelí na tryskači . . . . .	262
4.4.4.2	Odolnost některých ocelí na odlitky proti erozivnímu opotřebení . . . . .	263
4.4.4.3	Odolnost některých nekovových materiálů proti erozi na tryskači . . . . .	263
4.4.4.4	Odolnost některých tvrdých návarů a nástřiků v podmínkách erozivního opotřebení . . . . .	264
4.4.5	Příklady řešení některých zařízení pracujících v podmínkách intenzivní eroze . . . . .	265
4.4.5.1	Životnost bagrovacích čerpadel . . . . .	265
4.4.5.2	Zvyšování životnosti ventilátorových uhelných mlýnů . . . . .	267
4.4.5.3	Životnost vrtulové míchačky v chemické úpravě rud . . . . .	277
4.5	Kavitační opotřebení — <i>Ing. A. Koutný</i> . . . . .	278
4.5.1	Fyzikální podstata kavitace . . . . .	279
4.5.2	Vliv obsahu plynů v kapalině . . . . .	281
4.5.3	Vliv teploty a tlaku . . . . .	282
4.5.4	Vliv povrchového napětí a viskozity kapaliny . . . . .	283
4.5.5	Mechanismus kavitačního poškozování . . . . .	283
4.5.6	Časový průběh kavitačního opotřebení . . . . .	287
4.5.7	Odolnost materiálů proti kavitačnímu opotřebení . . . . .	288
4.5.7.1	Vliv koroze na kavitační odolnost materiálu . . . . .	294
4.5.7.2	Vliv eroze tvrdými částicemi na kavitační odolnost materiálu . . . . .	295
4.5.8	Možnosti snížení kavitačního opotřebení . . . . .	297
4.5.9	Případy kavitačního opotřebení v provozních podmínkách . . . . .	299
4.6	Vibrační opotřebení — <i>Ing. V. Sláma</i> . . . . .	304
4.6.1	Vliv různých faktorů na vibrační opotřebení . . . . .	307
4.6.1.1	Vliv amplitudy pohybu . . . . .	307
4.6.1.2	Vliv kmitočtu . . . . .	308
4.6.1.3	Vliv měrného tlaku . . . . .	309
4.6.1.4	Vliv času . . . . .	311
4.6.1.5	Vliv prostředí . . . . .	311
4.6.1.6	Vliv vlastností materiálu . . . . .	312
4.6.2	Mechanismus vibračního opotřebení . . . . .	314
4.6.3	Důsledky vibračního opotřebení . . . . .	316
4.6.4	Způsoby jak předcházet nebo zmírnit účinky vibračního opotřebení . . . . .	317
4.6.4.1	Konstruktivní řešení . . . . .	317
4.6.4.2	Povrchové úpravy . . . . .	319
4.6.4.3	Mazání . . . . .	320
4.6.4.4	Zajištění strojů při přepravě . . . . .	322
4.6.5	Zkoušky vibračního opotřebení . . . . .	323
4.7	Únavové opotřebení — <i>Ing. V. Linhart, CSc.</i> . . . . .	324
4.7.1	Únavové opotřebení a kontaktní únavové poškození . . . . .	324
4.7.2	Kontaktní namáhání a porušování, odolnost proti kontaktnímu únavovému opotřebení . . . . .	329
4.7.3	Materiálové faktory, které ovlivňují kontaktní porušování a opotřebení . . . . .	337

4.7.3.1	Závislost na tvrdosti . . . . .	337
4.7.3.2	Vliv vměstků a nečistot . . . . .	339
4.7.3.3	Kontaktní únosnost povrchově tvrzených částí . . . . .	340
4.7.4	Jiné faktory, které působí na kontaktní únosnost . . . . .	342
5.	<b>PROBLEMATIKA ZKOUŠEK ODOLNOSTI MATERIÁLU PROTI RŮZNÝM TYPŮM OPOTŘEBENÍ — Ing. J. Suchánek, CSc.</b> . . . .	343
5.1	Experimentální zařízení na zkoušení odolnosti materiálů proti adhezivnímu opotřebení . . . . .	344
5.2	Experimentální zařízení na zkoušení odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení . . . . .	346
5.3	Experimentální zařízení na zkoušení odolnosti materiálů proti erozivnímu opotřebení . . . . .	348
5.4	Experimentální zařízení na zkoušení odolnosti materiálů proti kavitacnímu opotřebení . . . . .	351
5.5	Experimentální zařízení na zkoušení odolnosti materiálů proti únavovému opotřebení . . . . .	352
5.6	Experimentální zařízení na zkoušení odolnosti materiálů proti vibračnímu opotřebení . . . . .	353
6.	<b>PROBLÉMY ŽIVOTNOSTI, SPOLEHLIVOSTI A EKONOMIE V SOUVISLOSTI S OPOTŘEBENÍM STROJŮ — Ing. M. Vocel, CSc.</b> . . . .	354
	LITERATURA . . . . .	358
	REJSTŘÍK . . . . .	371