FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ

DISERTAČNÍ PRÁCE

doktorský studijní program: P2301 Strojní inženýrství
studijní obor: Stavba strojů a zařízení

Výzkum využití nekovových materiálů ve stavbě strojů a zařízení

Autor: **Ing. Martin Gorschenek**
Školitel: **doc. Ing. Václav Vaněk, PhD.**

Plzeň 2019

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě písemnou práci ke státní doktorské zkoušce, zpracovanou na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.
Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma:
Výzkum využití nekovových materiálů ve stavbě strojů a zařízení
vypracoval samostatně, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne: ....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval paní Markétě Jančaříkové a Ing. Filipovi Tikalovi, Ph.D z firmy Megatech Industries Engineering CZ s.r.o. za vstřícnost a pomoc při realizaci výzkumné části práce. Dále děkuji katedře KKS a firmě STRKAN s.r.o. za podporu během studia.

ANOTACE

AUTOR	Příjmení (včetně titulů) Ing. Gorschenek	Jméno Martin
STUDIJNÍ OBOR	Stavba strojů a zařízení	
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Vaněk, Ph.D.	Jméno Václav
PRACOVIŠTĚ VEDOUCÍHO	ZČU – FST – KKS	
DRUH PRÁCE	**disertační**	
NÁZEV PRÁCE	Výzkum využití nekovových materiálů ve stavbě strojů a zařízení	

Fakulta: Strojní
Katedra: Stavba strojů a zařízení
Rok odevzdání: 2019

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

Celkem	152		**Textová část**	122		**Grafická část**	30

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Práce je zaměřena na možnosti využití polymerních materiálů v oblasti krytování jednoúčelových strojů a vytipování vhodného materiálu jako náhradu kovového materiálu (případně jiného) za účelem zlepšení některých vlastností (např. hmotnostní či cenová úspora). Hlavním přínosem práce by měl být nástroj pro výběr vhodného materiálu v oblasti krytování jednoúčelového stroje. V rámci této disertační práce se zaměřuji na metodiku výběru vhodného krytu a materiálu pomocí materiálových databází.
KLÍČOVÁ SLOVA	Polymery, termoplast, reaktoplast, elastomer, metodika, Granta, CES Edupack, stárnutí, degradace, recyklace, bioplasty, tahová zkouška, deformace polymerů, krytování strojů

SUMMARY

AUTHOR	Surname (including of Degrees) Ing. Gorschenek	Name Martin
FIELD OF STUDY	Materials Engineering and Engineering Metallurgy	
SUPERVISOR	Surname (including of Degrees) doc. Ing. Vaněk, Ph.D.	Name Václav
INSTITUTION	University of West Bohemia – Faculty of Mechanical Engineering – Department of Machine Design	
TYPE OF WORK	**dissertation**	
TITLE OF THE WORK	Research of using non-metallic materials in the area of Machines and Equipment	

Faculty: Mechanical Engineering
Department: Design of Machines and Equipment
Submitted in: 2019

Number of pages (A4 a eq. A4)

Totaly	152		**Text part**	122		**Graphical part**	30

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The work is focused on the possibility of using polymeric materials in the area of single-purpose machines covering and selecting suitable material as a replacement of metal (or other) in order to improve some characteristics (eg weight or price savings). The main benefit of the work should be a tool for selecting the right material in the area of the single-purpose machine covering. In this work I focus on the methodology of selection of suitable cover and material using material databases.
KEY WORDS	Polymers, thermoplastics, reactoplastics, elastomer, methodology, Granta CES Edupack, aging of plastics, plastic degradation, plastic recycling, bioplastics, tensile test, plastic deformation, covering machines

Obsah

Obsah 1
Seznam obrázků 3
Seznam tabulek a grafů 6
Seznam příloh 8
Seznam zkratek a použitých symbolů 9
1 Základní rozdělení nekovových materiálů využívaných ve strojírenství 12
1.1 Kompozitní materiály 12
1.2 Keramické materiály 13
1.3 Polymerní materiály 16
2 Mechanické chování a deformace polymerních materiálů 22
2.1 Mechanické chování při změně teplot 22
2.2 Teorie deformace polymerů [64] 24
3 Tahová zkouška plastů 25
3.1 Zkušební tělesa [24] 27
3.2 Postup zkoušky 28
3.3 Výpočet a vyjádření výsledků měření 28
3.4 Tahová zkouška v prostředí 3D softwaru 29
3.5 Vstupní hodnoty pro simulaci [12] 31
3.6 Výsledky simulace a vyhodnocení tahové zkoušky 32
3.7 Porovnání výsledků simulace se vstupními hodnotami a s hodnotami různých výrobců 35
3.8 Porovnání materiálových hodnot vybraných různých zdrojů 36
4 Výzkum vlivu stárnutí polymerních materiálů na jejich mechanické a fyzikální vlastnosti 37
4.1 Teorie stárnutí polymerních materiálů 37
4.1.1 Tepelné a tepelně oxidační stárnutí 38
4.1.2 Stárnutí vlivem povětrnosti 38
4.1.3 Stárnutí vlivem záření 39
4.1.4 Umělé povětrnostní stárnutí 39
4.2 Experimentální tahová zkouška 41
4.2.1 Vzorky před přetržením 43
4.2.2 Vzorky po přetržení 44
4.2.3 Záznamy tahových zkoušek a výsledné hodnoty 46
4.3 Shrnutí výsledků experimentální tahové zkoušky 53
4.3.1 Srovnání hodnot mechanických vlastností experimentálně zjištěných s hodnotami uváděnými výrobcem materiálu PA6 54
4.3.2 Srovnání hodnot mechanických vlastností nevystárnutých vzorků s uměle vystárnutými 54
4.3.3 Srovnání hodnot mechanických vlastností při různé orientaci vláken ke směru zatížení materiálu PA6 GF30 54
4.3.4 Zhodnocení vlivu stárnutí na degradaci vlastností 54
5 Využití plastových materiálů v oblasti výrobních strojů 55
5.1 Krytování strojů 55
5.1.1 Krytování pohyblivých částí strojů 56
5.1.2 Krytování statických částí strojů 69
5.1.3 Krytování kabelů 72
5.1.4 Normalizované strojní součásti 73

6 Zkoušky ochranných krytů....74
6.1 Postup zkoušky....74
6.2 Projektil....75
6.3 Zkoušené materiály....76
6.4 Vyhodnocení zkoušky....76
6.5 Zkoušení ochranných krytů obráběcích center, frézek a vyvrtávaček [25]....76
6.5.1 Vyhodnocení a posouzení výsledků [25]....77
6.5.2 Zkušební protokol [25]....77
6.5.3 Výsledky zkoušek pro zkoušené vzorky materiálů (m=0,1kg)....77
6.6 Zkoušení ochranných krytů soustruhů [25]....78
7 Metodika výběru vhodného materiálu při návrhu krytování....79
7.1 Potenciální vhodné materiály krytů....79
7.1.1 Kovové materiály....79
7.1.2 Polymery....79
7.2 Stanovení požadavků na materiál [15]....80
7.3 Klasifikace vlastností [15]....81
7.4 Stanovení požadavků na krytování....81
7.4.1 Stanovení konstrukčních vlastností nutných pro správnou funkci krytů pohyblivých částí strojů....83
7.4.2 Stanovení konstrukčních vlastností nutných pro správnou funkci statických částí strojů 86
7.5 Výběr vhodného materiálu pomocí materiálových databází....89
7.5.1 Program LPM RIWETA Material Selector....89
7.5.2 Program Granta CES Edupack....91
7.5.3 Volba kritérií při výběru materiálu pomocí materiálové databáze....92
7.6 Shrnutí vlastností materiálů vhodných pro konstrukci krytů....100
7.7 Hodnotová analýza při nahrazení materiálu u stávajících částí strojů [3]....100
8 Využití metodiky výběru materiálu při návrhu krytování u jednoúčelových strojů....101
8.1 Příklad 1: Krytování jednoúčelového stroje na dělení materiálu....101
8.2 Příklad 2: Jednoúčelový svařovací přípravek....105
8.3 Zhodnocení a závěr....114
9 Likvidace polymerních materiálů....116
9.1 Recyklace....116
9.2 Spalování a skládkování....116
9.3 Bioplasty....117
9.4 Závěr....117
10 Závěr a zhodnocení cílů....119
11 Použitá literatura....120
12 Přílohy....i
Příloha č. 1: MKP tahové zkoušky pro vybrané plasty....i
Příloha č. 2: Materiálový list PS....v
Příloha č. 3: Materiálový list SAN....viii
Příloha č. 4: Materiálový list PPA GF30 a PPA GF30 V0....xi
Příloha č. 5: Materiálový list PA66/6T GF60....xvii
Příloha č. 6: Materiálový list VMQ/FMVQ....xx
Příloha č. 7: Materiálový list zkušebního vzorku pro tahovou zkoušku PA6....xxvi
Příloha č. 8: Fotodokumentace z experimentální tahové zkoušky....xxvii
Příloha č. 9: Fotodokumentace z experimentálního umělého stárnutí plastů....xxx

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma rozdělení kompozitů [9] 13
Obr. 2: Příklady orientace a délky vláken v jednovrstvém kompozitu [10] 13
Obr. 3: Aplikace keramiky ve strojírenství [42] 15
Obr. 4: Periodická tabulka termoplastů [30] 18
Obr. 5: Schéma rozdělení polymerů [30] 19
Obr. 6: Technologie 3D tisku keramiky [54] 21
Obr. 7: Příklady 3D tiskáren [55,56,57] 21
Obr. 8: Modul pružnosti v tahu E v závislosti na teplotě [12] 23
Obr. 9: Poissonovo číslo v závislosti na teplotě [12] 23
Obr. 10: Tahová křivka v závislosti na teplotě pro PA66 [12] 23
Obr. 11: Deformační křivka v závislosti na rychlosti deformace [12] 23
Obr. 12: Závislost modulu pružnosti různých skupin plastů na teplotě [12] 24
Obr. 13: Deformace polymerů [64] 24
Obr. 15: Typické závislosti napětí na deformaci u plastů: 1- tvrdé plasty bez meze kluzu, 2 - měkké plasty bez meze kluzu, 3 - plasty s výraznou mezí kluzu [64] 25
Obr. 14: Záznam zkoušky tahem pro křehký plast (A), plast schopný prodloužení (B) a elastomer (C) [64] 25
Obr. 16: Vznik krčku [64] 26
Obr. 17: Závislost mechanických vlastností polymerů na teplotě [64] 27
Obr. 18: Zkušební těleso typ II. [24] 27
Obr. 19: Zkušební těleso typ I.[24] 27
Obr. 20: Uchycení zkušebního tělesa ve stroji [24] 28
Obr. 21: Model zkušebního tělesa typ I s tloušťkou 4mm vytvořený v Solidworks Professional 2016 30
Obr. 22: Nasíťovaný model 30
Obr. 23: Okrajové podmínky: levá strana - vetknutí; pravá strana - tahová síla v podélné ose zkušebního tělesa - 3000N 30
Obr. 24: Výsledné posunutí 32
Obr. 25: Výsledné napětí 33
Obr. 26: Výsledné posunutí 34
Obr. 27: Výsledné napětí 34
Obr. 28 vliv foto-oxidace na molekulární strukturu polyethylenu (s větší mírou fotooxidace vzrůstá větvení polymeru) [51] 38
Obr. 29: Klimakomora Typ KKP 8.000/40 N 40
Obr. 30: Umístění vzorků v klimakomoře 41
Obr. 31: Protokol umělého stárnutí z klimakomory - podle prováděcí normy pro plastové díly BMW automobilů 41
Obr. 32: Uchycení vzorku v čelistech na trhacím stroji: pohled zleva, čelně a zprava 42
Obr. 33: Vzorky před přetržením 43
Obr. 34: Vzorky po přetržení 45
Obr. 35: Záznam z protokolu měření vzorků A 46
Obr. 36: Záznam z protokolu měření vzorků B 47
Obr. 37: Záznam z protokolu měření vzorků C 48
Obr. 38: Záznam z protokolu měření vzorků D 49
Obr. 39: Záznam z protokolu měření vzorků E 50
Obr. 40: Záznam z protokolu měření vzorků F 51
Obr. 41: Záznam z protokolu měření vzorků G 52
Obr. 42: Záznam z protokolu měření vzorků H 53

Obr. 43: Příklady vnějšího a vnitřního krytování [50] 56
Obr. 44: Typy teleskopických krytů [49] 57
Obr. 45: Teleskopický kryt s nůžkovým systémem [48]....58
Obr. 46: Vodící prvky – rolny [49] 59
Obr. 47: Vodící prvky – kluzáky [49] 59
Obr. 48: Pracovní pozice teleskopického krytu: a) horizontální, b) vertikální, c) příčná [49] .59
Obr. 49: Různé polohy teleskopického krytu s nůžkovým mechanismem [48] 60
Obr. 50: Příklad dvouosého krytování cross-cover firmy kabel schlepp [46]....60
Obr. 51: Příklad teleskopického krytování na stroji....60
Obr. 52: Schéma teleskopického krytu [49] 61
Obr. 53: Skládaný měch kruhového a U-profilu [49] 61
Obr. 54: Schéma skládacího měchu [49]....62
Obr. 55: Rolovací kryt bez ochranného pouzdra a s ochranným pouzdrem [45] 65
Obr. 56: Uspořádání rolovacího krytu [45] 65
Obr. 57: Provedení spojování jednotlivých článků krytu [45]....65
Obr. 58: Roll-up-cover firmy P.E.I. dvouosé krytování [49] 66
Obr. 59: Ohebný hliníkový kryt [49]....66
Obr. 60: Roletový kryt z tkaniny [48] 67
Obr. 61: Systém SURE-SPRING firmy P.E.I. [49] 67
Obr. 62: Typy stíracích rámečků firmy Kabel schlepp [46] 67
Obr. 63: Spirálový kryt [2] 68
Obr. 64: Spirálový kryt [2] 69
Obr. 65: Vertikální kryty v sérii [5] 69
Obr. 66: Plné a snížené krytování [45]....70
Obr. 67: Typy plastových krytů [44]....70
Obr. 68: Krytování pracovního prostoru stroje s rozměrnými posuvnými dveřmi [44] 71
Obr. 69: Portálová frézka FPT dinomax [44] 71
Obr. 70: Oplocení X-guard firmy Haberkorn [71]....72
Obr. 71: Bezpečnostní kabina firmy FPT Industrie na obráběcím stroji Spirit [45]....72
Obr. 72: Krytování kabelů [48]....73
Obr. 73: Objímkové ložisko Iglidur a kulová ložiska Igubal firmy Igus [48]....73
Obr. 74: Ozubený plastový převod a lineární vedení drylin W [48]....73
Obr. 75: Zkušební zařízení [25] 74
Obr. 76: Projektil....75
Obr. 77: Kritéria volby materiálu [33] 80
Obr. 78: Požadavky v oblasti krytování 82
Obr. 79: Tabulka zadání kritérií pro vytřídění vhodného materiálu 90
Obr. 80: Databanka materiálů v prostředí programu....91
Obr. 81: Přístupy založené na vědě a návrhu [28] 91
Obr. 82: Prostředí programu Granta CES Edupack 2013....92
Obr. 83: Krytovaný a odkrytovaný jednoúčelový stroj....101
Obr. 84: Problematický konstrukční uzel vedení stroje 102
Obr. 85: Zadání požadavků do programu Riweta 104
Obr. 86: Zadání požadavků do programu Granta....105
Obr. 87: Pohled na upnutí svařovaných součástí 106
Obr. 88: Zadání požadavků do programu LPM Riweta 108
Obr. 89: Zadání požadavků do programu Granta....109
Obr. 90: Zadání požadavků do programu Riweta 109
Obr. 91: Zadání požadavků do programu Granta....110
Obr. 92: Celkový pohled na svařovací polohovací zařízení 111

Obr. 93: Zadání parametrů do programu Riweta 113
Obr. 94: Zadání parametrů do programu Granta 114
Obr. 95: Celkový pohled svařovacího pracoviště v 3D CAD 115
Obr. 96: Pracoviště z pohledu svařovacího robota v reálném provozu 115
Obr. 97: Koloběh plastových výrobků [62] 116
Obr. 98: Celosvětová produkce plastů v jednotlivých kontinentech [59] 118

Seznam tabulek a grafů

Tab. 1: Porovnání některých vlastností podle materiálové databáze Granta CES EduPack verze 6.2.0 16
Tab. 2: Rozměry zkušebních těles [24] 28
Tab. 3: Výchozí parametry pro MKP výpočet 31
Tab. 4: Porovnání hodnot zjištěných simulací s hodnotami vstupními 35
Tab. 5: Porovnání hodnot simulace s hodnotami výrobců 36
Tab. 6: Porovnání hodnot mezi výrobci 36
Tab. 7: Odolnost vybraných plastů proti povětrnostním vlivům a záření pro středoevropské klima [12] 39
Tab. 8: Tabulka zkušebních vzorků 42
Tab. 9: Shrnutí materiálů a označení vzorků 53
Tab. 10: Materiály pro výrobu krycích měchů firmy Hennlich [48] 63
Tab. 11: Materiály pro krycí měchy firmy P.E.I. [49] 64
Tab. 12: Příklady materiálů [25] 76
Tab. 13: Třídy odolnosti [25] 76
Tab. 14: Výsledky zkoušek pro zkoušené vzorky materiálů (m=0,1kg) [25] 77
Tab. 15: Specifikace vlastností 83
Tab. 16: Stanovení konstrukčních vlastností nutných pro správnou funkci krytů pohyblivých částí strojů 84
Tab. 17: Požadované vlastnosti na jednotlivé typy krytů 85
Tab. 18: Vhodnost použití materiálu na pohyblivé kryty 85
Tab. 19: Požadované vlastnosti na jednotlivé typy materiálů 86
Tab. 20: Stanovení konstrukčních vlastností nutných pro správnou funkci krytů statických částí strojů 88
Tab. 21: Požadované vlastnosti na jednotlivé typy krytů 88
Tab. 22: Vhodnost použití materiálu na nepohyblivé kryty 89
Tab. 23: Požadované vlastnosti krytů 103
Tab. 24: výběr vhodného materiálu pro vybrané kryty 103
Tab. 25: Požadované vlastnosti na jednotlivé typy materiálů 104
Tab. 26: Požadované vlastnosti statických krytů 107
Tab. 27: výběr vhodného materiálu pro vybrané kryty 107
Tab. 28: Požadované vlastnosti statických krytů 112
Tab. 29: výběr vhodného materiálu pro vybrané kryty 112

Graf 1: Vstupní tahový diagram pro PA6 31
Graf 2: Vstupní tahový diagram pro PEEK 32
Graf 3: Výsledný tahový diagram PA6 33
Graf 4: Výsledný tahový diagram PEEK 35
Graf 5: Porovnání pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu různých materiálů 93
Graf 6 Porovnání tvrdosti různých materiálů 93
Graf 7: Porovnání maximálních a minimálních teplot použití materiálů v databázi Granta CES EDUPACK 94
Graf 8: Porovnání hustoty a ceny jednotlivých materiálů 94
Graf 9: Porovnání pevnosti v tahu [MPa] podle ISO 527-2 [27] 94
Graf 10: Porovnání pevností u různých typů plastů 95
Graf 11: Porovnání modulů pružnosti u různých typů plastů 96

Graf 12: Porovnání modulů pružností plněných polyamidů s různým procentuálním zastoupením skelných vláken 96
Graf 13: Porovnání pevnostních hodnot plněných polyamidů s různým procentuálním zastoupením skelných vláken 97
Graf 14: Porovnání tvrdostí plněných polyamidů s různým procentuálním zastoupením skelných vláken 97
Graf 15: Porovnání tvrdosti podle Vickerse u různých typů plastů 98
Graf 16: Porovnání teplotních charakteristik plněných polyamidů s různým procentuálním zastoupením skelných vláken 98
Graf 17: Porovnání maximálních teplot a teploty tání u různých typů plastů 99
Graf 18: Porovnání minimálních teplot u různých typů plastů 99
Graf 19: Světová produkce plastů [58] 117

Seznam příloh

Příloha č. 1: MKP tahové zkoušky pro vybrané plasty

Příloha č. 2: Materiálový list PS

Příloha č. 3: Materiálový list SAN

Příloha č. 4: Materiálový list PPA GF30 a PPA GF30 V0

Příloha č. 5: Materiálový list PA66/6T GF60

Příloha č. 6: Materiálový list VMQ a FVMQ

Příloha č. 7: Materiálový list zkušebního vzorku pro tahovou zkoušku PA6

Příloha č. 8: Fotodokumentace z experimentální tahové zkoušky

Příloha č. 9: Fotodokumentace z experimentálního umělého stárnutí plastů

Seznam zkratek a použitých symbolů

PE ..... Polyetylén
HDPE..... vysokohustotní lineární polyetylén
LDPE ..... nízkohustotní rozvětvený polyetylén
PP..... Polypropylén
PA..... Polyamid
PET (PETP) ..... Polyetyléntereftalát
PC ..... Polykarbonát
POM ..... Polyoxymetylén
PMMA ..... Polymetylmetakrylát
PTFE..... Polytetrafluóretylén
PS..... Polystyrén
ABS ..... Akrylonitril-butadien-styrén
SAN ..... Styrén-akrylonitril
ASA ..... Akrylonitril-styrén-akrylát
PVC ..... Polyvinylchlorid
PEEK ..... Polyéteréterketon
PPS ..... Polyfenylénsulfid
PES ..... Polyétersulfon
PI ..... Polyimyd
PVAC..... Polyvinylacetát
UF..... Močovinoformaldehydová pryskyřice
MF ..... Melaminová pryskyřice
PF..... Fenolformaldehydová pryskyřice
EP ..... Epoxidová pryskyřice
PESL..... Polyesterový skelný laminát
PPO..... Polyfenyloxid
PSU..... Polysulfon
PEI..... Polyeterimid
SBS ..... Styrén-butadien-styrén kopolymer
TPE..... Termoplastický elastomer
TPU..... Termoplastický polyuretan elastomer
EBA ..... Etylénbutylakrylát
EMA ..... Etylénmetylakrylát
PCT..... Polycyclohexylenedimetylentereftalát
PBT..... Polybutylentereftalát
PE-LLD..... Lineární nízkohustotní polyetylen
PE-UHMW ..... Ultravysokomolekulární polyetylén
EPDM ..... Terpolymer etylén-propylén-dién
SMA ..... Styrén-maleinanhydridová pryskyřice
PA6..... Silon
PA66..... Nylon
GF..... „Glass fiber“ – skelná vlákna
CF..... „Carbon fiber“ – karbonová vlákna
PPE ..... Polyefenylenéter
SBR..... Styrén-butadien kopolymer
SIS ..... Styrén-izoprénový kopolymer
TPE..... Termoplastický elastomer
TPE-A..... Termoplastický polyamid

TPE-O ..... Termoplastický polyolefin
TPE-U ..... Termoplastický polyuretan
T_G ..... Teplota skelného přechodu
T_m ..... Teplota tání
T_f ..... Teplota viskózního toku
TPV ..... Termoplastický polyuretan
PSH ..... Houževnatý polystyren
NVH ..... Noise, vibration, harshness
PPA GF V0 ..... Glass fiber, flame retarded polyphthalamid
PPA ..... Polyphthalamid
VMQ ..... Vinyl methyl silikon
FVMQ ..... Trifluoropropyl vinyl methyl silikon
Rm ..... Mez pevnosti [MPa]

Úvod – cíle disertační práce

Upřesnění tématu práce

Tématem této práce jsou nekovové materiály ve strojírenství, jejichž spektrum je však natolik široké, že jej rozsah práce neumožňuje zcela obsáhnout. Z tohoto důvodu se práce hlouběji zabývá polymerními materiály a jejich využitím ve stavbě strojů a zařízení, konkrétně při návrhu krytování jednoúčelových strojů a zařízení. Důvodem zaměření na polymery je fakt, že konstruktéři při návrhu nemají dostatek informací o vlastnostech těchto materiálů, nemají v ně důvěru, a tudíž je často nezvažují jako alternativu při návrhu částí strojů či zařízení. Drží se raději zavedených standardů a osvědčených kovových materiálů. To je dáno jednak tím, že polymerní materiály dříve skutečně nevyhovovaly vysokým požadavkům strojního průmyslu, ale také tím, že některé nevydařené aplikace nebyly navrhovány s dostatečnou odbornou znalostí výběru vhodného polymeru a optimálního řešení tvaru výsledné součásti. Díky neustálému vývoji se polymery svými vlastnostmi stávají adekvátní alternativou kovových materiálů a začínají se prosazovat v širším měřítku i ve strojírenství.

Cíle disertační práce

V této práci byly vytyčeny následující cíle:

- zpracování rešerše využití polymerních materiálů v oblasti výrobních strojů a zařízení
- vytvoření uceleného přehledu a metodiky návrhu při výběru materiálu pro danou aplikaci
- provedení experimentální tahové zkoušky u vybraných vzorků plastů
- provedení umělého stárnutí stejných vzorků plastů a následné provedení experimentální tahové zkoušky. Výzkum vlivu stárnutí na mechanické vlastnosti
- vyladění výpočtového matematického modelu v prostředí 3D softwaru tak, aby se přiblížilo reálnému mechanickému chování
- stanovení oblastí uplatnění polymerních materiálů a jejich možná implementace v krytování jednoúčelových strojů a zařízení
- zohlednění možnosti recyklace plastových částí stroje a dopad na životní prostředí

Závěrečným cílem práce bylo prováděný výzkum celkově zhodnotit a popsat jeho přínos pro konstruktéry jednoúčelových strojů a zařízení.

1 Základní rozdělení nekovových materiálů využívaných ve strojírenství

1.1 Kompozitní materiály

Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně ani prostou sumací. Vlastnosti výsledného kompozitu závisí na vlastnostech jeho jednotlivých složek [9].

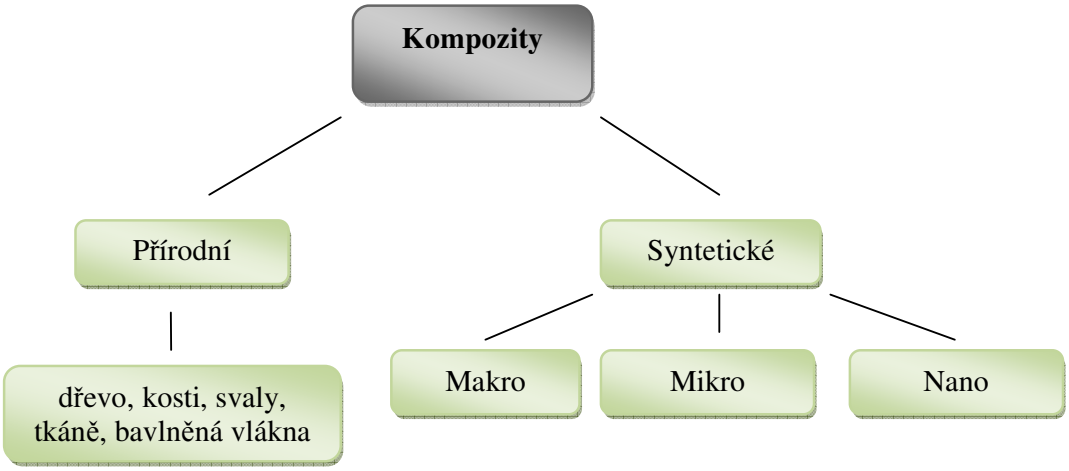
Vhodné vlastnosti oproti kovovým materiálům

- vysoká pevnost a tuhost
- nízká hmotnost
- vysoké materiálové tlumení

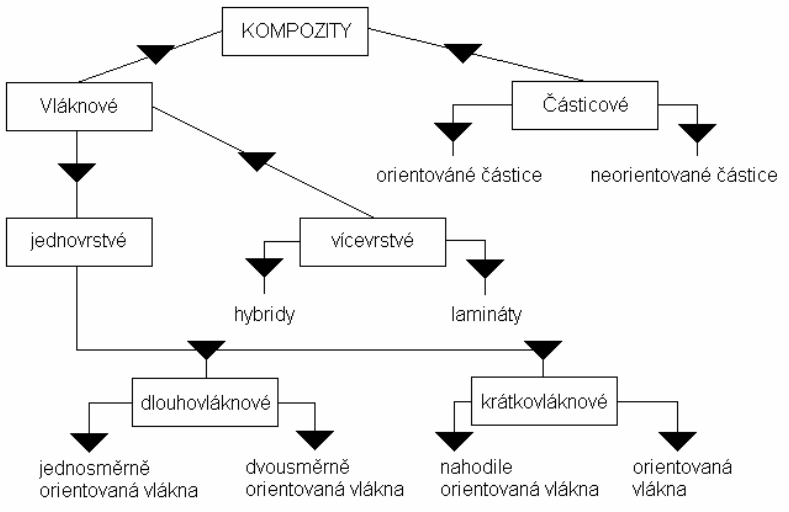
Ovlivnitelné vlastnosti u kompozitních materiálů

- korozivzdornost
- žáruvzdornost
- tepelná a elektrická vodivost
- tvarová a chemická stálost
- třecí vlastnosti

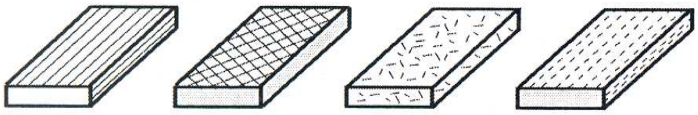
Základní rozdělení kompozitních materiálů



Makrokompozity – výztuž má příčný rozměr 1-100mm (železobeton, polymerbeton)
Mikrokompozity – příčný rozměr výztuže je 1-100μm (ve strojírenství nejpoužívanější kompozity)
Nanokompozity – výztuž má řádově rozměry v nm.



Obr. 1: Schéma rozdělení kompozitů [9]



Obr. 2: Příklady orientace a délky vláken v jednovrstvém kompozitu [10]

Základní části kompozitu:

Výztuž – složena z jedné nebo více nespojitých fází. Je obvykle tvrdší, tužší a pevnější než matrice. Přenáší převážnou část vnějšího zatížení. Výztuž může být částicová (např. granule, koule, krychle, destičky nebo jiné pravidelné či nepravidelné tvary) nebo vláknová (kontinuální nebo sekaná vlákna). Výztuž musí mít vysokou pevnost a modul pružnosti v tahu.

Matrice – je spojitá fáze. Hlavní funkcí je přenos vnějšího zatížení do vyztužující části. Plní funkci pojiva výztuže, tzn., drží ji v požadované poloze, vzájemně ji odděluje a chrání před poškozením. Musí mít dobrou soudržnost s materiálem vyztužující fáze a nízkou hmotnost.

1.2 Keramické materiály

Keramika je materiál převážně krystalický, složený především z anorganických sloučenin nekovového charakteru. Vyznačuje se svou křehkostí, což značně komplikuje a zužuje výběr jejich použití. Obecně se keramické materiály vyznačují velmi dobrou tvrdostí, tuhostí, odolností proti opotřebení, korozní odolností, jsou využitelné i při vysokých teplotách a mají vysoké moduly pružnosti [65].

Vhodné vlastnosti oproti kovovým materiálům

- nízká elektrická a tepelná vodivost
- korozní odolnost
- vysoká tvrdost, pevnost
- odolnost vůči vysokým teplotám
- dobrá otěruvzdornost
- výborná chemická odolnost

Ovlivnitelné vlastnosti u keramických materiálů

- teplotní odolnost (dlouhodobě T>>100°C)
- chemická odolnost
- křehkost

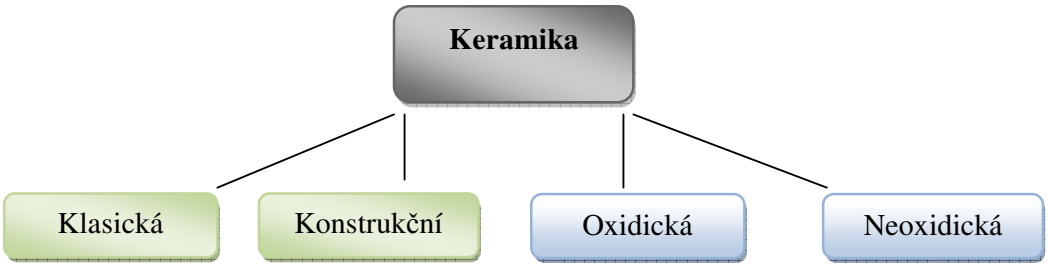
Nevhodné vlastnosti oproti kovovým materiálům [9]

Hlavní nevýhoda keramik je jejich křehkost. V současné době ji lze zčásti eliminovat několika způsoby:

- nanášením křehkých keramik na vhodný kov. V takovém případě bývá problémem zajištění dobré přilnavosti mezi keramikou a kovem. Nejčastěji používanými materiály pro keramické povlaky jsou Cr_2O_3, Al_2O_3, TiO_2 a Zr_2O_3.
- vytvoření kompozitu z keramických destiček kombinovaných s tažnějším a měkčím podkladem (např. speciální plastová matrice).
- zvýšením počtu skluzových systémů, ve kterých se mohou pohybovat dislokace. Malá plasticita keramik je totiž důsledkem malého počtu skluzových systémů. Zvýšení počtu těchto systémů je pravděpodobně možné pomocí vhodných příměsí a vhodného technologického zpracování keramiky.

Tyto materiály se vyznačují vysokým modulem pružnosti, vysokou tvrdostí, tuhostí, odolností proti opotřebení při vysokých teplotách a výbornou korozní odolností. Ve strojírenství nalézají uplatnění především při vysokých teplotách v agresivním prostředí [9].

Základní rozdělení keramických materiálů



Klasická keramika – vyrábí se z přírodních surovin (jílu, křemene, živce). Patří sem např. porcelán, sanitární potřeby, dlaždice apod.

Konstrukční keramika – vyrábí se z čistých, práškových, uměle připravených sloučenin jako jsou oxidy, nitridy a karbidy.

Oxidická keramika:

Některé oxidické keramiky se v přírodě nalézají v poměrně čisté formě, je však nutné je vhodnou chemickou cestou čistit. Dají se získat i tepelným rozkladem z hydroxidu nebo uhličitanu.

Al_2O_3 (korund) – díky vysoké tvrdosti se používá k broušení vyjma diamantu všech ostatních minerálů. V současné době je snaha o vytvoření kombinace s kovy a karbidy.

Vlastnosti:

- vysoká teplota tání (kolem 2000°C)
- vysoká tvrdost (3500 HV)
- vysoký tepelný a elektrický odpor (izolátor při vysokých teplotách)
- odolnost vůči abrazivnímu a erozivnímu prostředí

- vysoká chemická odolnost (odolnost proti kyselinám i taveninám)
- žáruvzdornost do 2000°C
- mez pevnosti v tlaku 3000 MPa
- mez pevnosti v tahu 150 MPa
- nízká houževnatost

ZrO_2 (zirkonia) – díky své vysoké teplotní odolnosti se využívá jako žáruvzdorný materiál např. pro tavicí nádoby a vnitřní stěny tavicích pecí. Je však ve srovnání s klasickými žáruvzdornými materiály výrazně dražší.

Vlastnosti:

- vysoká pevnost
- vysoká teplota tání
- vysoká tvrdost
- odolnost proti kyselým struskám
- houževnatost

Další oxidické keramiky: **BeO, Cr_2O_3**

Neoxidická keramika [65]:

Patří sem všechny zbývající, ve kterých není obsažena oxidická sloučenina (karbidy, nitridy, boridy, silicidy, směsné neoxidické systémy). Vynikají vysokou žáruvzdorností a mají velmi dobré mechanické a chemické vlastnosti. Mají zejména kovovou (TiC,WC, TaC, TiN) nebo kovalentní vazbu (SiC, B_4C, Si_3N_4).

SiC (karborundum) – vyznačuje se vysokou hustotou a pevností, špatně se však dále opracovává a tvaruje.

Vlastnosti:

- vysoká tvrdost
- vysoká křehkost
- dobrá odolnost vůči oxidaci
- použitelnost do 1000°C (poté se začne rozkládat na oxidy, nad 1600°C měkne, při dosažení 2700°C dojde k definitivnímu rozkladu bez přítomnosti kyslíku)

Si_3N_4 (nitrid křemičitý) – je vhodný pro vysoké tepelné namáhání (tepelné šoky ve válcích motorů). Používá se k výrobě žhavících svíček u naftových motorů.

Vlastnosti:

- odolnost proti abrazi a korozi
- oxiduje při 1200°C (definitivní rozklad nastane při 1900°C)
- vysoký elektrický odpor (používá se jako izolant ve výrobě integrovaných obvodů)

Obr. 3: Aplikace keramiky ve strojírenství [42]

1.3 Polymerní materiály

Polymery jsou tvořeny makromolekulami, které jsou složeny z mnoha monomerů. Monomery mohou být jednoho druhu nebo více druhů (kopolymery, případně heteropolymery či terpolymery). Polymery jsou na rozdíl od kovových materiálů tvořeny makromolekulárními řetězci (dlouhé molekuly s opakujícími se základními strukturními jednotkami), které mohou být mezi sebou spojeny chemickými vazbami.
Polymery jsou obecně charakteristické svojí dobrou tvářitelností, odolností proti korozi, nízkým koeficientem tření, dobrými tlumícími vlastnostmi, nízkými moduly pružnosti a nízkou hmotností při poměrně dobré pevnosti.
Pevnost v tahu se u plastů pohybuje v širokém rozmezí. Některé druhy předčí pevností hliník a dosahují hodnot některých druhů ocelí. Modul pružnosti v tahu u plastů (např. u PEEKu 40GF – 24 GPa) se blíží hodnotám mědi (123 GPa) a hliníku (71 GPa). Nevýhodou plastů je jejich malá odolnost proti vysokým teplotám (PTFE krátkodobě cca do +270 ^{o}C), některé druhy jsou však vhodné pro práci za minusových teplot (PTFE krátkodobě cca do -270 ^{o}C). **Termoplasty** je možno obecně použít v rozmezí teplot -50 až +90 ^{o}C (pro dlouhodobé použití), **reaktoplasty** jsou ke změnám teploty méně citlivé. Plasty (termo + reakto) mají malý součinitel tepelné vodivosti. Naopak součinitel tepelné roztažnosti je oproti kovům 3krát až 7krát vyšší.

	měrná tepelná kapacita [J/kg.°C]	tepelná vodivost [W/m.°C]	součinitel tepelné roztažnosti [mm/°C]	max. teplota použití [°C]	modul pružnosti v tahu [GPa]
POM	1300	0,239	0,202	97	3,59
PA 6	1500	0,306	0,092	130	3,53
PEEK CF30%	1410	0,97	0,015	280	24,1
Ocel	470	23	0,012	750	204
Hliník	982	213	0,023	200	72
Měď	387	398	0,0169	87	123

Tab. 1: Porovnání některých vlastností podle materiálové databáze Granta CES EduPack verze 6.2.0

Vhodné vlastnosti oproti kovovým materiálům

- tlumení vibrací a rázů
- nízký součinitel tření za sucha a velká odolnost proti opotřebení
- nízká tepelná vodivost
- odolnost vůči korozi způsobené vlhkostí a vodou
- odolnost vůči kyselinám, zásadám, rozpouštědlům a jiným činidlům je různá podle druhu plastu
- velmi dobré elektrické izolační vlastnosti
- dobrá otěruvzdornost

Nevhodné vlastnosti oproti kovovým materiálům

- Rozměrová a tvarová stálost (dáno přesností při tváření, smršťováním, creepem, teplotní roztažností, absorpcí vlhkosti nebo vody u navlhavých typů plastů).
- Tepelná odolnost je nepoměrně horší než u kovů. Běžné plasty 60-80°C, konstrukční 100-120°C, hi-tech plasty nad 200°C. U všech plastů se při vyšší teplotě snižuje pevnost a modul pružnosti a roste tažnost a houževnatost až do měknutí. Při nižších teplotách plasty křehnou (pod teplotou T_G).

- Odolnost proti stárnutí, vzdušné oxidaci a slunečnímu záření je u různých plastů různá, všeobecně však horší než u kovů.

Ovlivnitelné vlastnosti u polymerních materiálů

Vlastnosti základního polymeru lze vhodnými přísadami měnit:

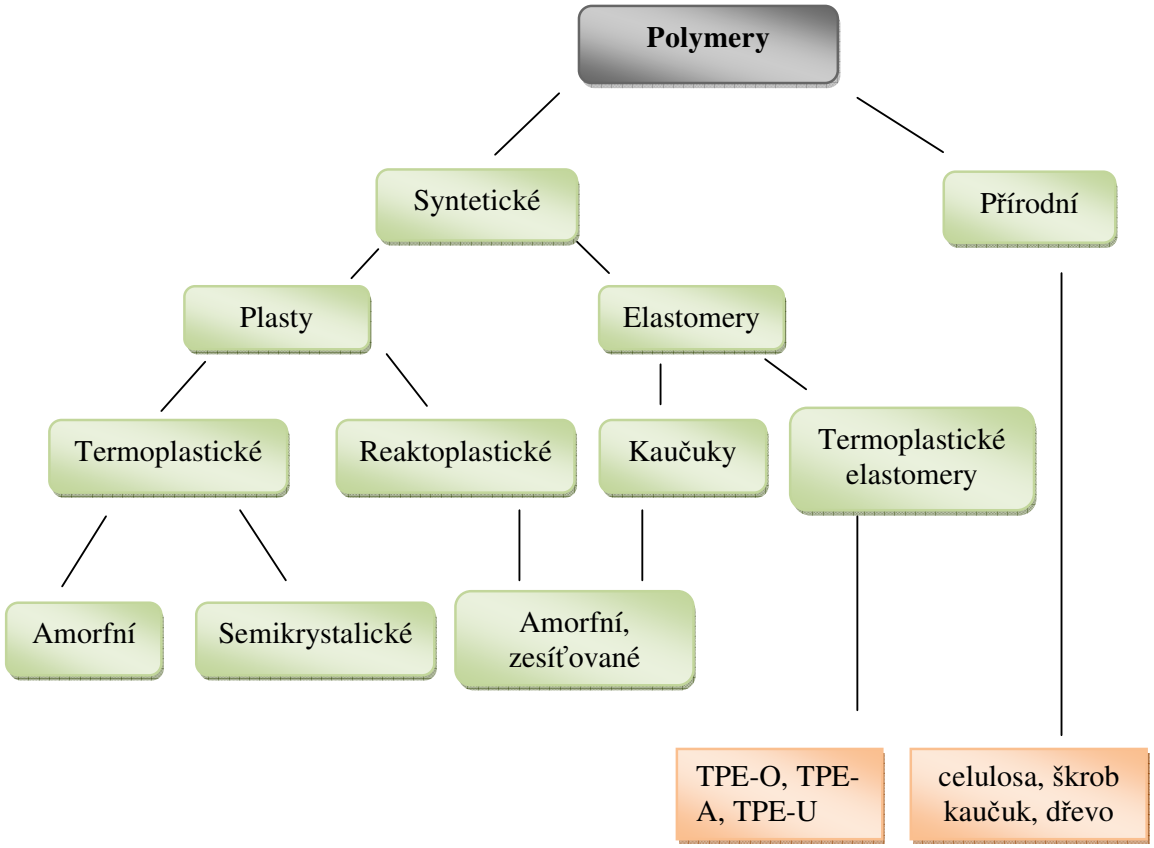
Plniva - Přidáním práškového plniva změnit fyzikální vlastnosti (zvýšit tepelnou vodivost, zmenšit tření, atd.). Vláknitými plnivy dojde především k vyztužení hmoty a zvýšení pevnosti a modulu pružnosti.

Změkčovadla - Přidávají se k tvrdým polymerům pro získání měkkosti a ohebnosti.

Stabilizátory - Zlepšují odolnost polymeru proti zvýšeným teplotám, oxidaci, ultrafialovému záření a povětrnostním podmínkám.

Na výsledné vlastnosti polymerů mají velký vliv také zpracovatelské podmínky, např. u vstřikování je to teplota taveniny, formy, vstřikovací rychlost, atd.. Tyto parametry ovlivňují výslednou hustotu, rozměry, izotropii a velikost vnitřního pnutí [64]. Veškeré vlastnosti plastů uváděné v materiálových listech, tabulkách a grafech v této práci jsou střední a průměrné hodnoty získané při optimálních zpracovatelských podmínkách.

Základní dělení - „Mapa polymerů“



Termoplasty – jsou polymery, které zahříváním (nad teplotu skelného přechodu T_G) přecházejí do plastického stavu, ve kterém je lze snadno tvářet a zpracovávat pomocí různých technologií. Zpět do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání T_m (u semikrystalických plastů), resp. pod teplotu viskózního toku T_f (u amorfních plastů). Při

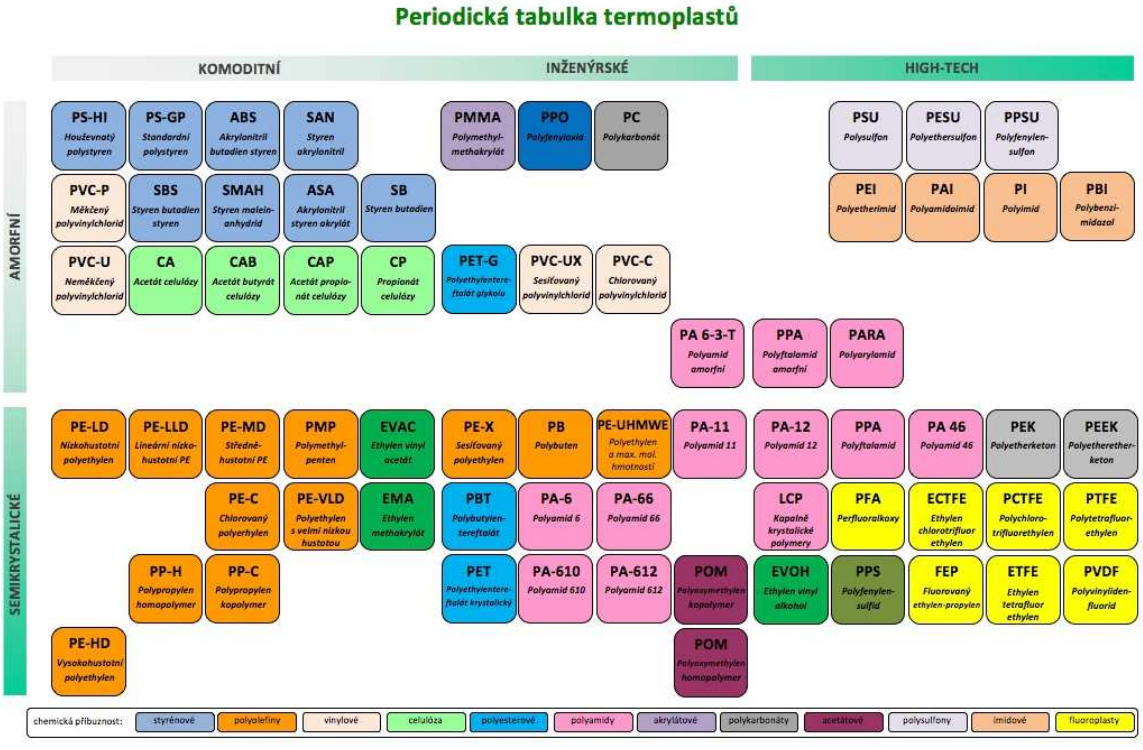
zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury jako je tomu u reaktoplastů, lze tedy proces zahřívání a ochlazování opakovat. Mezi termoplasty patří většina zpracovávaných hmot, např. PE, PP, PS, PVC, PA, apod.

Reaktoplasty – jedná se o zesíťované polymery, které vytvářejí prostorovou trojrozměrnou síť. Zesíťování (tzv. vytvrzování) se děje za pomoci tepla a tlaku při tváření plastu. Jakmile je zesíťování dokončeno, nelze tyto plasty dále tvářet a zpracovávat. Dochází k chemickému provázání struktury a plast je možno považovat za jednu makromolekulu. Vytvrzené reaktoplasty již tedy není možné znovu roztavit či rozpustit. Dalším zahříváním by došlo k rozkladu hmoty a degradaci. Mezi nejznámější reaktoplasty patří fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty, apod.

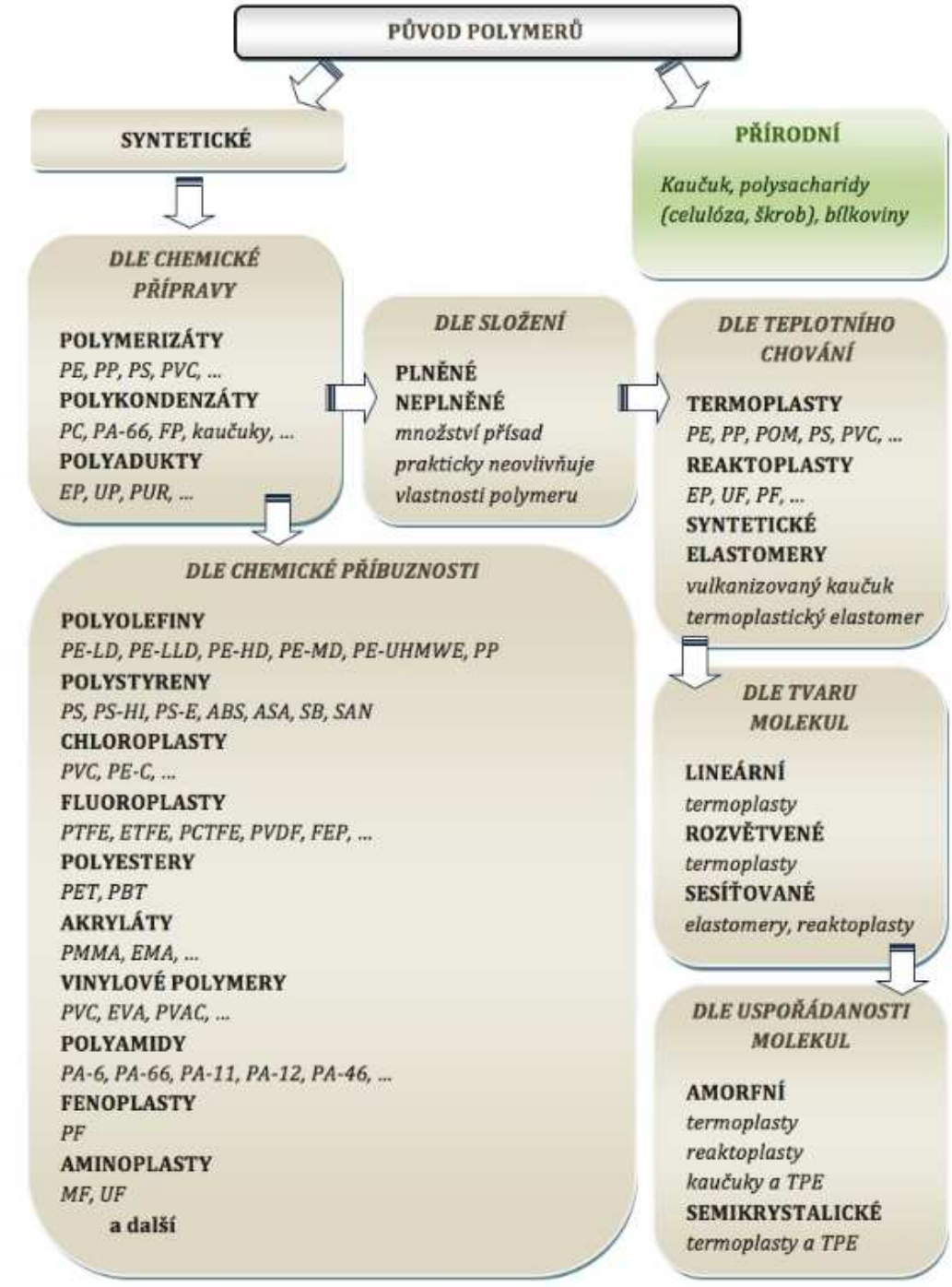
Elastomery, kaučuky, pryže – jsou polymery, které zahříváním opět měknou a lze je tvářet. Jejich vytvrzování se nazývá vulkanizace. Produktem vulkanizace je pryž.

Termoplastické elastomery (TPE) - Svými vlastnostmi jsou podobné pryžím. Jejich struktura je tvořena měkkými (elastomery) a tvrdými (termoplasty) segmenty. TPE mají zesíťovanou strukturu a lze je opětovně zahřívat a ochlazovat, nedochází zde ke změnám chemické struktury. TPE mají o něco menší elastické vlastnosti než pryže, jejich výhoda spočívá ve výrobě technologií vstřikování na běžně dostupných vstřikolisech a lze je snadno recyklovat [64].

Polymery lze rozdělit podle dalších kritérií (např. dle původu, chemické reakce jejich přípravy, chemické příbuznosti, teplotního chování, molekulární struktury či dle tvaru molekul, uspořádanosti makromolekulárních řetězců, složení, polarity nebo podle postavení na trhu). Schéma dalších rozdělení jsou na obr. (4 a 5)

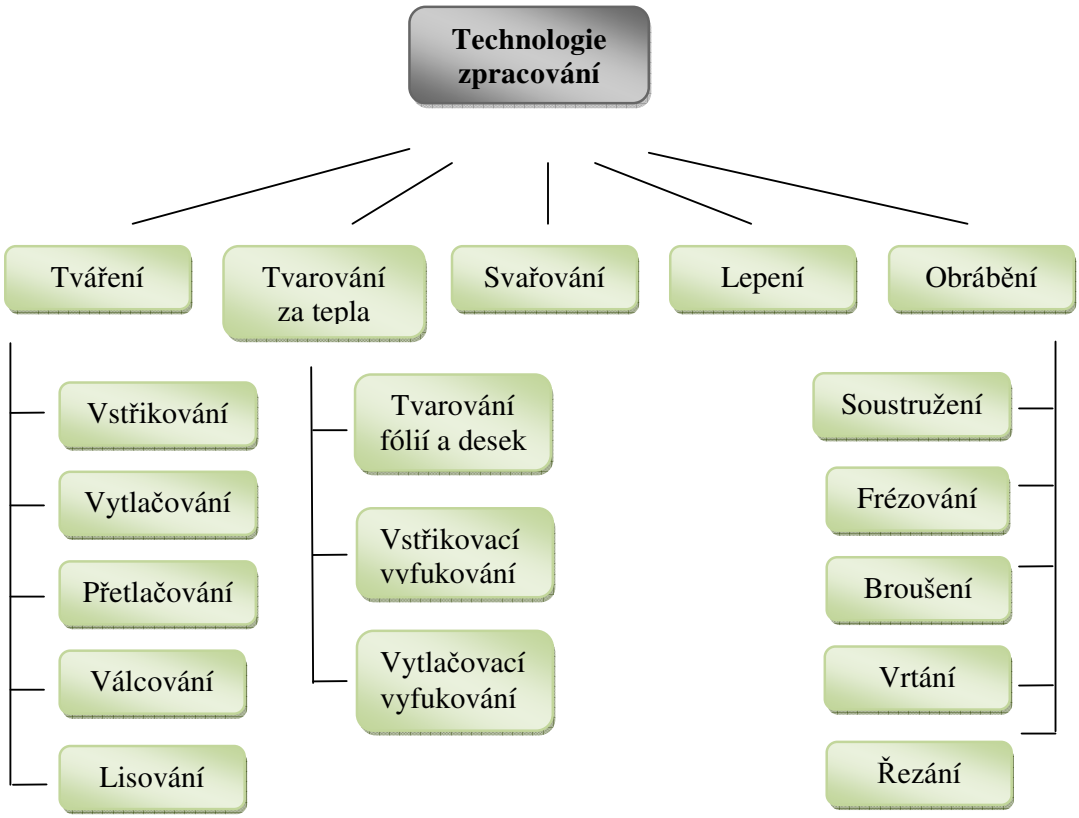


Obr. 4: Periodická tabulka termoplastů [30]



Obr. 5: Schéma rozdělení polymerů [30]

Technologie zpracování polymerů



Zpracování polymerů tvářením se děje v plastickém stavu a používá se pro elastomery, termoplasty i reaktoplasty. Při tváření termoplastů nedochází při zahřátí k chemické reakci, která by ovlivňovala konzistenci taveniny. Mohou být proto v plastickém stavu delší dobu než kaučuky či reaktoplasty. Naproti tomu je však nutné termoplasty před vyjmutím z formy ochladit, aby nedošlo k deformaci výrobku. Reaktoplastické a kaučukové výrobky je možné vyjímat z formy bez předběžného ochlazení. Polymery přechodem z plastického do tuhého stavu zmenšují objem, dochází k takzvanému smrštění. Největší smrštění mají plasty, které při přechodu z plastického stavu do tuhého krystalizují, čímž zvětšují svou hustotu (např. polyamid, polyetylén).
Teploty tváření se pohybují v širším rozmezí, záleží zejména na charakteru makromolekul, přísadách, apod. Např. polyetylén se dá tvářet za teplot od 120°C – 200°C, polyamid od 200°C – 260°C, reaktoplasty a kaučuky obvykle od 140°C – 180°C [64].

Nové technologie - 3D tisk

Technologií 3D tisku existuje hned několik. Nejpoužívanější technologie funguje na principu přidávání materiálu (tzv. additivní proces, narozdíl od obrábění, kde se materiál odebírá) ve formě struny plastového materiálu. Výsledná součást vzniká vrstvu po vrstvě natavováním materiálu v trysce za vysokých teplot (obvykle nad 200°C). Výhodou této technologie je, že je velmi dostupná (cena 3D tiskárny se pohybuje kolem desítek tisíc kč). V současnosti patří mezi nejvyužívanější materiály používanými v 3D tisku termoplasty ABS a PLA. V případě ABS spočívá výhoda v jeho velké tuhosti a odolnosti vůči vysokým i nízkým teplotám. PLA není tak odolný proti teplotním výkyvům a není tak pružný, naproti tomu je vyroben z

biologicky odbouratelných zdrojů a je tedy ekologicky šetrný. PLA je také snadněji zpracovatelný. Další materiál, který vyniká svými vlastnostmi je flexibilní TPU (termoplastický polyuretan), ve světě 3D tisku známý jako tzv. FLEXFILL. Jedná se o velice pružný materiál, který může svými vlastnostmi nahradit např. silikon.
Oblast 3D tisku jde v posledních letech neustále kupředu a každým dnem vznikají nové tiskárny s možností větších přesností (v současnosti je přesnost v desetinnách milimetrů), větších tisknutelných ploch (běžně dostupné tiskárny disponují plochou 250x250x200mm) a v neposlední řadě tvarově náročnějších objektů. Novinky v oblasti 3D tisku se zaměřují také na kovové materiály, objevují se první zmínky o tisku z keramiky, dřeva, polymerů obohacených o bavlněná vlákna pro tisk oblečení a už není tabu ani tisk baterií a elektrotechnických součástek. V nedávné době byla také vyvinuta 3D tiskárna enormních rozměrů, pomocí které byl vytištěn prototyp rodinného domu. Oblasti výzkumu na poli 3D tisku toho nabízejí spoustu, ať už se týkají vývoje zařízení (tiskáren), tisknutelných materiálů či složitosti objektů [54].

Obr. 6: Technologie 3D tisku keramiky [54]

Obr. 7: Příklady 3D tiskáren [55,56,57]

2 Mechanické chování a deformace polymerních materiálů

V této části jsou popsány základní odlišnosti v chování od kovových materiálů. Mechanické chování a obecné vlastnosti jsou zde uvažovány pro celou materiálovou skupinu polymerů.

2.1 Mechanické chování při změně teplot

Mechanické chování při změnách teplot charakterizuje značnou odlišnost od kovů. Zatímco u kovů existují tři stavy (tuhý, kapalný, plynný), u plastů jsou to pouze stav tuhý (sklovitý) a kapalný (viskózní). Hranice mezi těmito stavy se nazývá kaučukovitý stav a charakterizuje se tzv. teplotou skelného přechodu T_G.

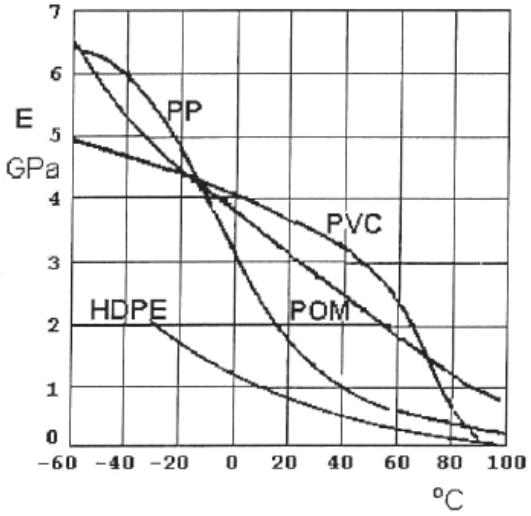
Tuhý stav (pod T_G) se u polymerů značí tím, že jsou makromolekuly tuhé a mechanickým napětím dojde převážně jen k malým pružným deformacím. Platí zde Hookův zákon lineární úměrnosti napětí a deformace. Při ohřevu na oblast skelného přechodu (kolem T_G) se řetězce makromolekul vlivem napětí začínají rozvinovat a schopnost deformace se zvětšuje. Polymer měkne, modul pružnosti klesá, naproti tomu vibrační a rázové tlumení dosahuje svého maxima. Při dalším zvýšení teplot (nad T_G) se řetězce makromolekul v závislosti na čase dále rozvinují. Po uvolnění napětí se pozvolna vracejí do původního neuspořádaného stavu, který je pro ně nejstabilnější. Tato zpožděně elastická deformace se nazývá viskoelastická deformace a je charakteristická právě pro chování plastů. Amorfní termoplasty a elastomery jsou v tomto stavu měkké a pružně tvárné, semikrystalické termoplasty jsou pevné a houževnaté, protože pevnost krystalických oblastí je stále dosti vysoká. Kaučukovitý stav se projeví jen v amorfních oblastech polymeru. Reaktoplasty v této oblasti měknou jen málo a pokles modulu pružnosti je u nich tedy nepatrný. Kapalný stav se objevuje u lineárních polymerů a to u amorfních nad teplotou měknutí T_f, u semikrystalických nad teplotou tání krystalů T_m. V tomto stavu se mohou řetězce již volně přemisťovat, nastává viskózní tok způsobující nevratnou plastickou deformaci. U zesíťovaných polymerů viskózní stav v podstatě nenastává, takže je není možno roztavit.

Deformační stav polymeru je dán nejen teplotou, ale i velikostí a dobou působení mechanického zatížení, tedy rychlostí deformace. Viskoelastická deformace současně s platickou deformací se proto mohou objevovat v malé míře současně v kaučukovitém a nepatrně i ve sklovitém stavu polymeru, zejména u termoplastů. Jsou také příčinou tečení (creepu) a relaxace napětí.

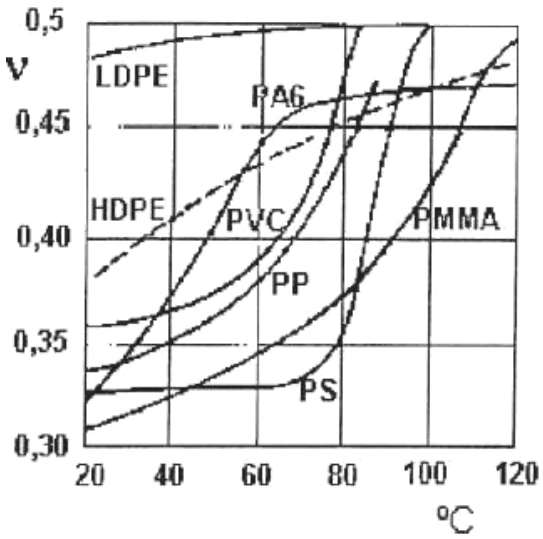
Tečení je vratná a nevratná deformace narůstající s časem, vyvolaná dlouhodobým mechanickým namáháním. Je větší u semikrystalických termoplastů, neboť se používají převážně nad teplotou T_G a malá u amorfních termoplastů, neboť ty lze používat jen pod teplotou T_G.

Relaxace napětí je časově závislý pokles napětí v konstantně deformovaném předepjatém tělese z termoplastu. Ze stejných důvodů jako u creepu je relaxace malá u amorfních a větší u semikrystalických termoplastů. U reaktoplastů se creep a relaxace objevují jen v nepatrné míře. Oblasti nejčastějšího funkčního použití plastů jsou u reaktoplastů a amorfních termoplastů ve stavu sklovitém, u elastomerů a semikrystalických termoplastů ve stavu kaučukovitém [22].

Mechanické vlastnosti polymerů jsou tedy velmi rozdílné a silně závislé na **teplotě a rychlosti deformace**, jak je patrné z obr. 8 až 12**.**

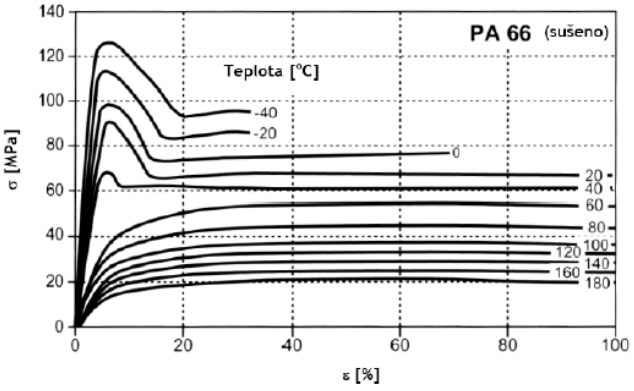


Obr. 8: Modul pružnosti v tahu E v závislosti na teplotě [12]

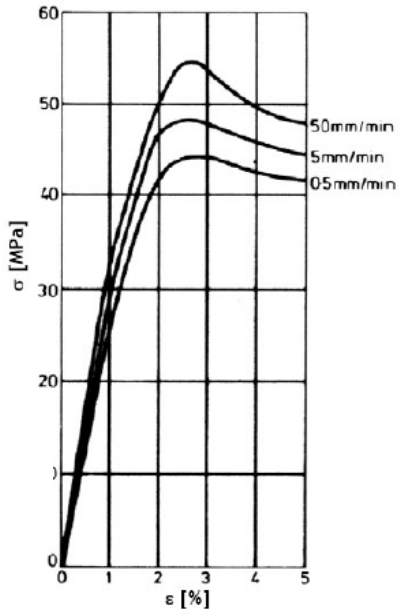


Obr. 9: Poissonovo číslo v závislosti na teplotě [12]

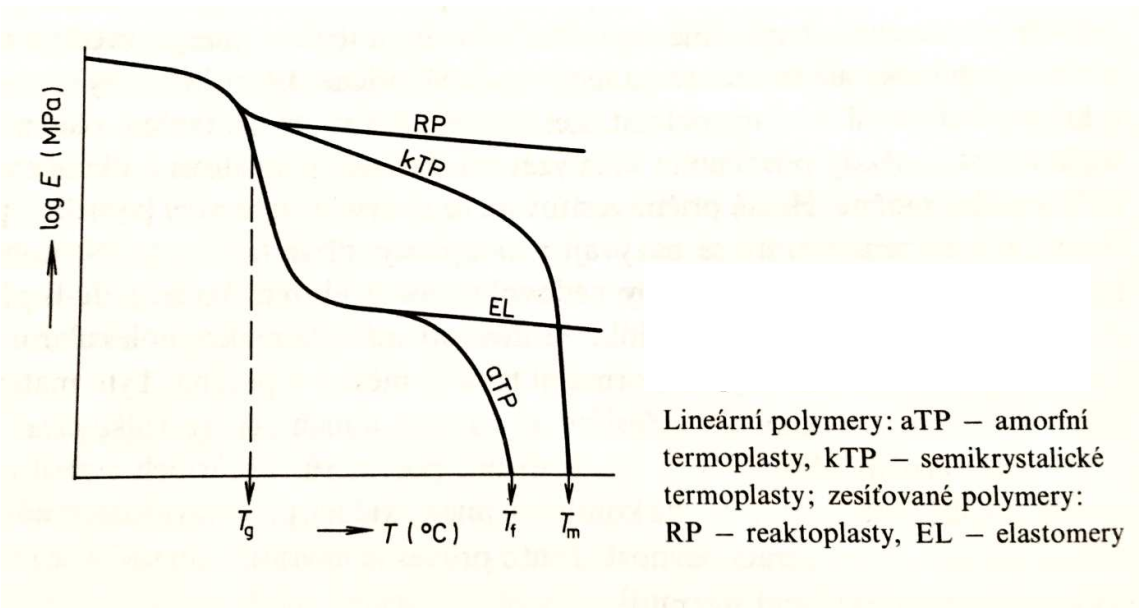
- V praxi jsou skutečné vlastnosti ovlivněny také tvarem výrobku a stavem materiálu po zpracování (orientace makromolekul, vnitřní pnutí, krystalizace, stupeň vytvrzení, apod.).



Obr. 10: Tahová křivka v závislosti na teplotě pro PA66 [12]

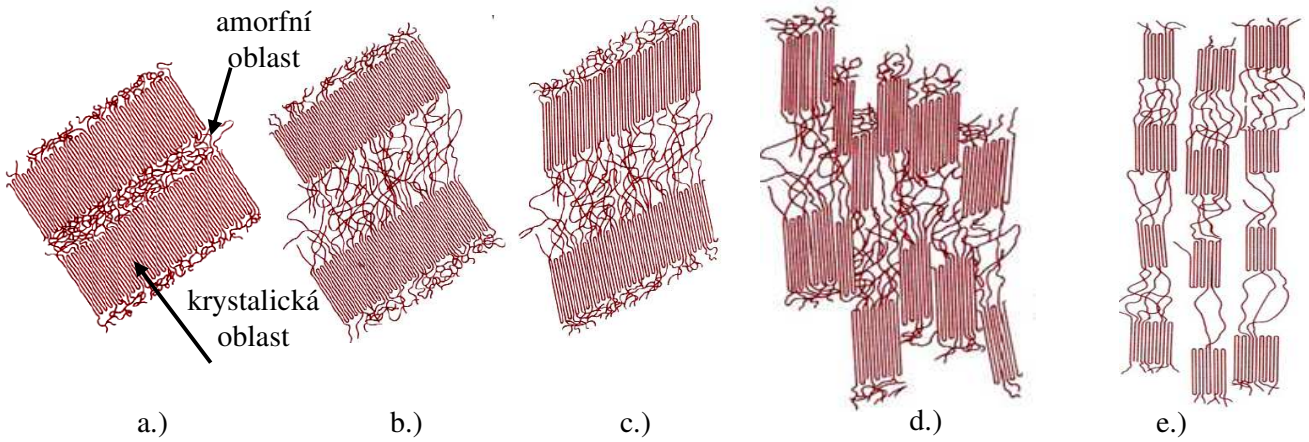


Obr. 11: Deformační křivka v závislosti na rychlosti deformace [12]



Obr. 12: Závislost modulu pružnosti různých skupin plastů na teplotě [12]

2.2 Teorie deformace polymerů [64]



Obr. 13: Deformace polymerů [64]

- Na počátku deformace odpovídá struktura polymeru případu (a) tj. v oblasti mezi krystalickými oblastmi se nachází amorfní oblasti.
- V prvním stádiu deformace (elastická oblast (b)) dochází k malému prodloužení řetězců, které mezi sebou vážou krystalické oblasti.
- Během druhého stádia ((c) počátek plastické oblasti) dochází k naklánění lamelárních krystalických vrstev.
- Ve třetím stádiu (d) dochází již k separaci jednotlivých krystalických bloků.
- Na závěr deformace (e) pak dochází k orientaci krystalických segmentů a řetězců makromolekul v amorfní oblasti do směru působícího napětí.

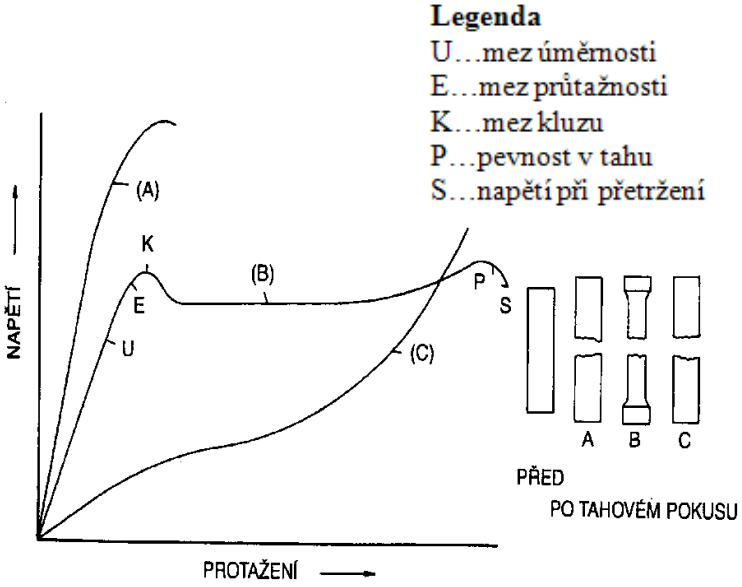
3 Tahová zkouška plastů

Nejdůležitější mechanické vlastnosti plastů se zjišťují pomocí tahové zkoušky. Výsledkem zkoušky je závislost napětí na deformaci, z čehož dále zjistíme modul pružnosti v tahu, mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a celkové chování materiálu při deformaci včetně typu lomu. Z těchto hodnot odvodíme dovolené tahové namáhání.

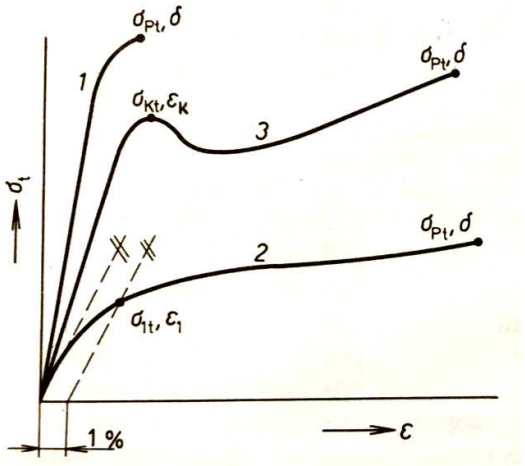
U termoplastů se provádí dva druhy tahových zkoušek:

- krátkodobá zkouška tahem (kratší než 1minuta)
- dlouhodobá zkouška tahem

Při **krátkodobé zkoušce** se zjišťuje modul pružnosti v tahu, napětí na mezi kluzu, poměrné prodloužení na mezi kluzu, nominální poměrné prodloužení při přetržení, napětí při poměrném prodloužení 50%, napětí při přetržení, poměrné prodloužení při přetržení a krátkodobá pevnost v tahu.
Zkouška se provádí na trhacím stroji obdobném jako pro kovy, který zajišťuje stanovenou rychlost deformace a umožňuje plynule zaznamenávat průběh síly a velikost deformace. V grafu (obr. 14) jsou znázorněny křivky zkoušek tahem na křehkém materiálu (např. PVC-U) a na materiálu tažném (např. PE).

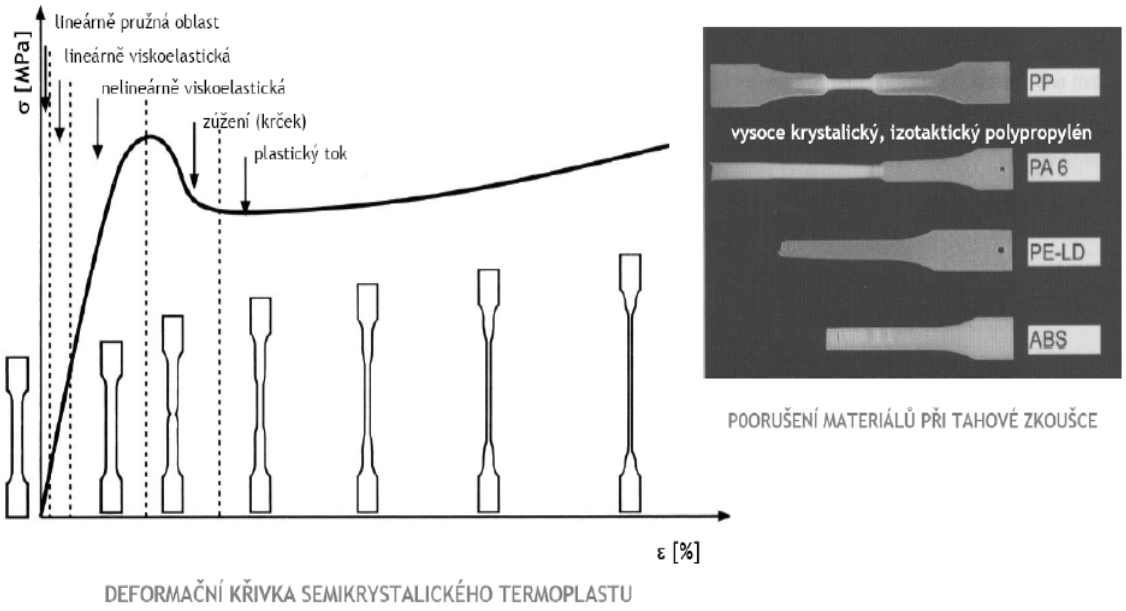


Obr. 14: Záznam zkoušky tahem pro křehký plast (A), plast schopný prodloužení (B) a elastomer (C) [64]



Obr. 15: Typické závislosti napětí na deformaci u plastů:
1- tvrdé plasty bez meze kluzu, 2 - měkké plasty bez meze kluzu, 3 - plasty s výraznou mezí kluzu [64]

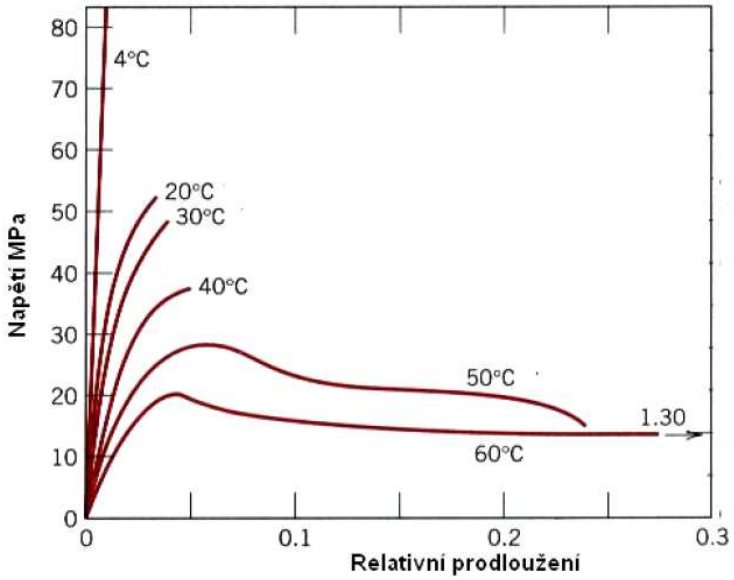
Křivka 3 na obr. 15 znázorňuje plast s výraznou mezí kluzu (jedná se o semikrystalický termoplast za normální teploty, obr. 16). U plastů vykazujících výraznou mez kluzu σ_{Kt} se považuje tato mez za horní hranici přípustného napětí při provozu součásti (nad touto hranicí vznikají již velké trvalé deformace). Dovolené napětí je pak podělen o koeficient bezpečnosti ($\sigma_{Dt} = \sigma_{Kt} / k$), který bývá za normální teploty kolem 2,5. Pokud plast nevykazuje žádnou mez kluzu (křivka 1 a 2 na obr. 15), vztahuje se u tvrdých plastů (křivka 1) dovolené napětí k mezi pevnosti σ_{Pt} a platí $\sigma_{Dt} = \sigma_{Pt} / k$, kde koeficient bezpečnosti je v tomto případě kolem 1,25. U měkkých materiálů bez meze kluzu (křivka 2 na obr. 15) je nutné mít na paměti deformaci součásti, a proto se jako dovolené napětí určí takové napětí, při kterém vzniká trvalá deformace 1%. Toto napětí se označuje jako σ_{1t} (viz obr. 15). Při provádění zkoušky za vyšších teplot klesá u všech typů plastů pevnost a modul pružnosti a mizí mez kluzu. Křivky 1 a 3 (obr. 15) nabývají charakter křivky 2 [64].



Obr. 16: Vznik krčku [64]

Pro konkrétní materiály je předepsaná zkušební rychlost zkoušky, která musí být podle ISO 527-1. Např. pro PE je rychlost 50 mm/min, pro PP rychlost 20 mm/min a pro PVC-U rychlost 10 mm/min. Krátkodobá pevnost v tahu je důležitou charakteristickou veličinou pro výpočet. Používá se v případě, že namáhání plastové součásti je časově omezené (např. na 1hod).

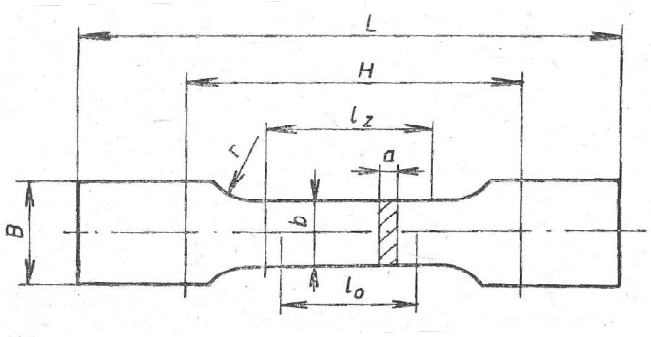
Pro dlouhodobé zatížení se používají výsledky z **dlouhodobé zkoušky** tahem (tzv. životnostní zkoušky).



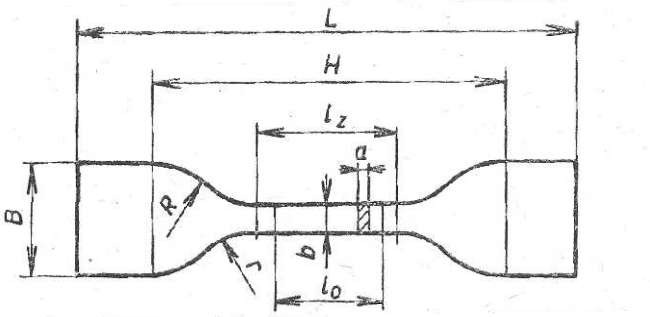
Obr. 17: Závislost mechanických vlastností polymerů na teplotě [64]

3.1 Zkušební tělesa [24]

Ke zkouškám tahem se používají zásadně 2 typy zkušebních těles, jejichž tvar a rozměry jsou předepsány normou **ČSN 64 0605**[1] (Tab.2). Zkušební těleso I se používá při zkouškách materiálu s vysokou tažností (PE, měkčený PVC apod.). Zkušební těleso II se používá pro zkoušky materiálu s nižší tažností (tvrdé termoplasty, vrstvené hmoty, lisovací hmoty, tvrditelné apod.). Výjimečně se dovoluje použití zkušebního tělesa typu III u materiálů na bázi tvrditelných pryskyřic, kde povaha materiálu nedovoluje reprodukovatelnou a spolehlivou přípravu zkušebního tělesa II.



Obr. 19: Zkušební těleso typ I.[24]



Obr. 18: Zkušební těleso typ II. [24]

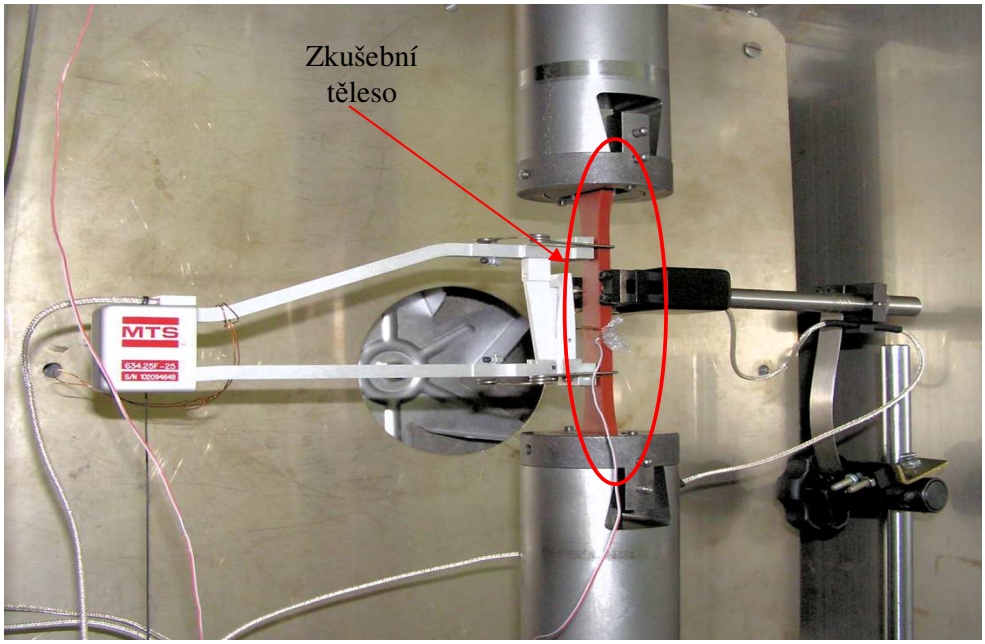
[1] Tato norma byla v roce 2003 nahrazena normou ČSN EN ISO 3167 (ČSN 64 0209).

Označení rozměrů zkušebního tělesa	Rozměry v mm pro typ		
	I	*II*	*III*
L — celková délka (nejméně)	115	150	200
B — šířka upínací hlavy	25 ± 1	20 ± 0,5	40 ± 1
l_z — zkušební (pracovní) délka	33 ± 1	60 ± 0,5	60 ± 1
b — šířka zkušební části	6 ± 0,4	10 ± 0,5	25 ± 0,5
r — malý poloměr	14 ± 0,5	min. 60	35 ± 0,5
R — velký poloměr	25 ± 1	—	—
l_o — měřená délka (vzdálenost mezi referenčními ryskami)	25 ± 1	50 ± 0,5	50 ± 1
H — upínací délka	80 ± 5	115 ± 5	120 ± 5
a — tloušťka	viz text normy		4 ± 0,2

Tab. 2: Rozměry zkušebních těles [24]

3.2 Postup zkoušky

1. Proměří se tloušťka a šířka zkušebního tělesa ve zkušební části alespoň ve 3 místech.
2. Zkušební těleso se upne do čelistí tak, aby směr síly působící na těleso a přenášený na něj čelistmi souhlasil s jeho podélnou osou.
3. Stanoví se: napětí při dosažení meze kluzu, změna délky Δl při dosažení meze kluzu, zatížení při přetržení nebo největší zatížení, průběh závislosti napětí – prodloužení (celé nebo částečné). Jestliže na křivce napětí – prodloužení není mez kluzu zřetelně vyznačena, je obvykle nutné stanovit smluvní mez kluzu.



Obr. 20: Uchycení zkušebního tělesa ve stroji [24]

3.3 Výpočet a vyjádření výsledků měření

Při pevnostních výpočtech se předpokládá, aby byl plast namáhán pouze elastickými deformacemi (v mezích Hookova zákona). Plasty však mají relativně úzkou oblast platnosti

Hookova vztahu, neboť modul pružnosti E se následkem viskoelastického chování polymerů značně mění a to tak, že klesá s rostoucím napětím, s rostoucí teplotou a dobou působení napětí. Naopak při dynamickém namáhání modul pružnosti roste s frekvencí. U plastů tedy není modul pružnosti materiálovou konstantou jako je tomu u kovových materiálů při běžných teplotách použití. Rovněž deformace plastů není pružnou deformací jako při běžném namáhání kovových součástí, ale je součtem deformace ideálně elastické, viskoelastické a plastické. Hookův vztah platný pro plastové součásti je upraven následovně [12]:

$$\sigma = \varepsilon_{celk}.E_k \quad [MPa] \tag{3.3.1}$$

σ .....napětí

ε_{celk} ....celková deformace

E_k ..... konstrukční modul pružnosti daného plastu závislý na působícím napětí, teplotě, době působení napětí nebo na frekvenci zatěžování při dynamickém namáhání.

Modul pružnosti označený E je pro krátkodobou zkoušku za normální teploty a označení E_k je pro modul pružnosti redukovaný podle určitého napětí, teploty a času.

Mez kluzu

$$\sigma_{Kt} = \frac{F_{Kt}}{S_o} \quad [MPa] \tag{3.3.2}$$

F_{Kt}…zatížení na mezi kluzu

S_o…počáteční průřez zkušebního tělesa

Poměrné prodloužení na mezi kluzu

$$\varepsilon_{Kt} = \frac{\Delta l}{l_o} \cdot 100 \quad [\%] \tag{3.3.3}$$

Δl…přírůstek měřené délky příslušející mezi kluzu

l_o…počáteční měřená délka

Mez pevnosti v tahu při přetržení

$$\sigma_{Ptr} = \frac{F_{Ptr}}{S_o} \quad [MPa] \tag{3.3.4}$$

F_{Ptr}…síla odečtená v okamžiku přetržení zkušebního tělesa

S_o…počáteční průřez zkušebního tělesa

Poměrné prodloužení při přetržení (tažnost)

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_o} \cdot 100 \quad [\%] \tag{3.3.5}$$

Δl…přírůstek měřené délky v okamžiku přetržení zkušebního tělesa

l_o…počáteční měřená délka

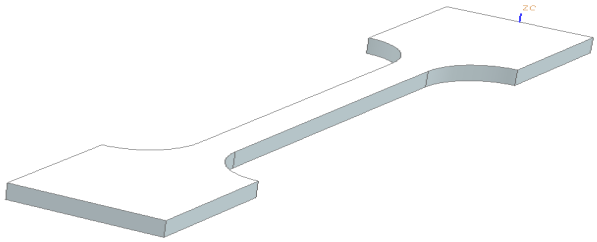
3.4 Tahová zkouška v prostředí 3D softwaru

Jedním z cílů této práce bylo odladění výpočtového modelu v prostředí 3D softwaru, tak aby odpovídali vypočtené hodnoty s hodnotami uváděnými výrobci plastů. Následoval experiment skutečné tahové zkoušky na zkušebním zařízení Zwick/Roell a ověření získaných vlastností s materiálovým listem dodaným výrobcem polotovaru. Tímto experimentem jsem chtěl nastínit

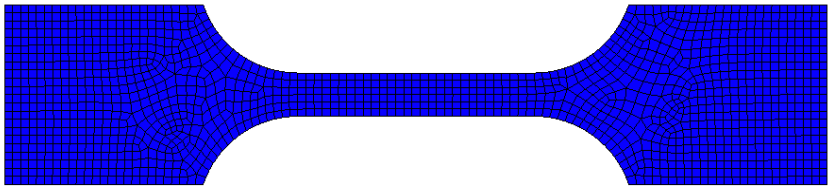
problematiku výpočetních simulací u součástí s neizotropními vlastnostmi. Konstruktéři v praxi často volí konvenční kovové (izotropní) materiály právě z důvodů jejich snadného dimenzování a jednoduchého výpočtového ověření ve 3D CAD systému. Materiály s izotropními vlastnostmi jsou snáz definovatelné a 3D CAD systémy umožňují nasimulovat chování složitějších součástí v relativně krátkém čase, bez nutnosti zadávání většího množství materiálových charakteristik a parametrů. U materiálů s neizotropními vlastnostmi (kompozity či plasty) je dimenzování součástí často velmi problematické a výpočetní ověření, zda součást vyhovuje danému zatížení, se stává pro běžně vybaveného konstruktéra na běžně dostupných zařízení neuskutečnitelné. Problematikou výpočetních simulací pro tyto materiály se zabývají pouze specializované firmy.

Model zkušebního tělesa byl namodelován v prostředí 3D softwaru Solidworks Professional 2016.
Simulace byla provedena v prostředí softwaru Marc and Mentat 2010

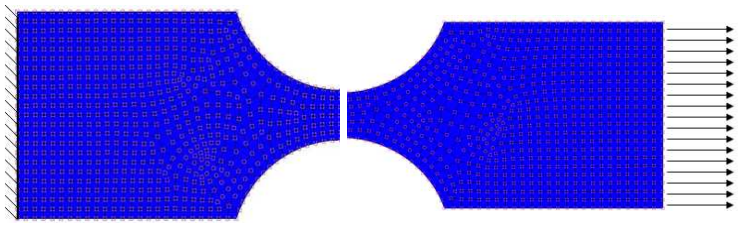
Následující obrázky zobrazují vytvořený 3D model zkušebního tělesa dle normy (ČSN EN ISO 3167), tvorbu sítě a zadání okrajových podmínek.



Obr. 21: Model zkušebního tělesa typ I s tloušťkou 4mm vytvořený v Solidworks Professional 2016



Obr. 22: Nasíťovaný model



Obr. 23: Okrajové podmínky: levá strana - vetknutí; pravá strana - tahová síla v podélné ose zkušebního tělesa - 3000N

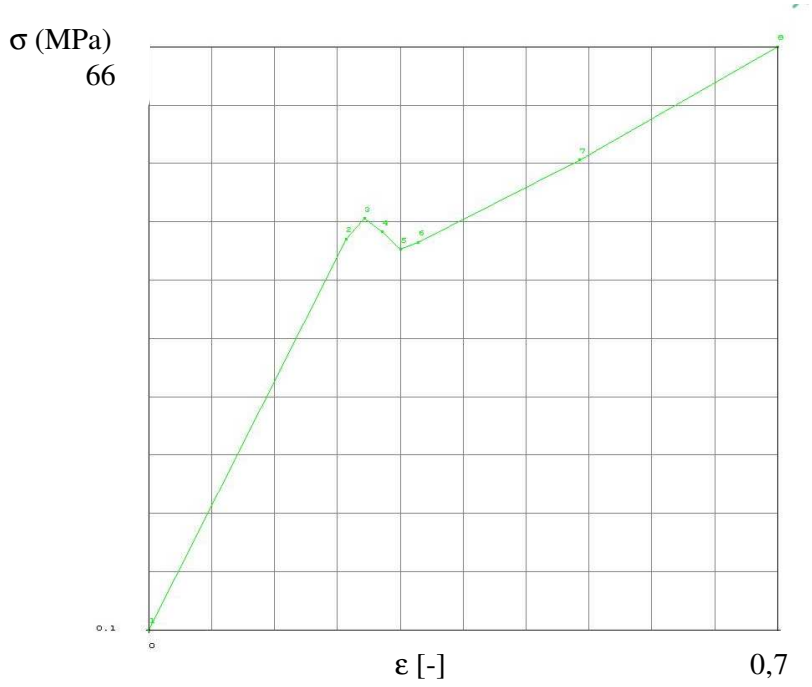
3.5 Vstupní hodnoty pro simulaci [12]

V prostředí výpočetního 3D softwaru bylo nutné zadat některé vstupní hodnoty a "predikované" chování při zatížení ve formě tahového diagramu.

	Křehký plast (PEEK)	Plast s výraznou mezí kluzu (PA6)
Tažnost [%]	25	70
Mez kluzu [MPa]	97	46
Mez pevnosti [MPa]	100	66
E-modul [MPa]	3600	3200
Poissonovo číslo [-]	0,4	0,34

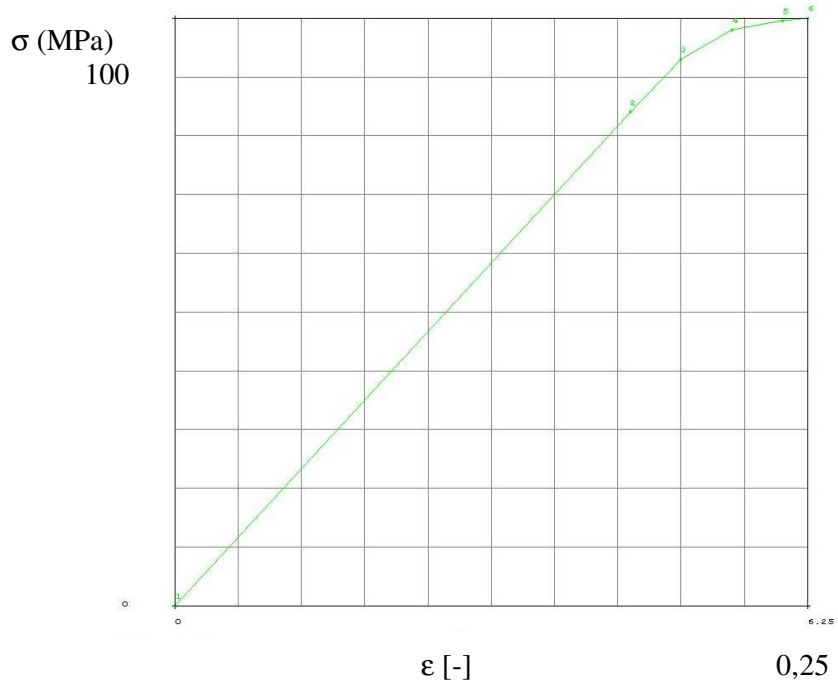
Tab. 3: Výchozí parametry pro MKP výpočet

- tahový diagram pro plasty s výraznou mezí kluzu (PA6)
- mez pevnosti = 66MPa při Δl = 17,5mm



Graf 1: Vstupní tahový diagram pro PA6

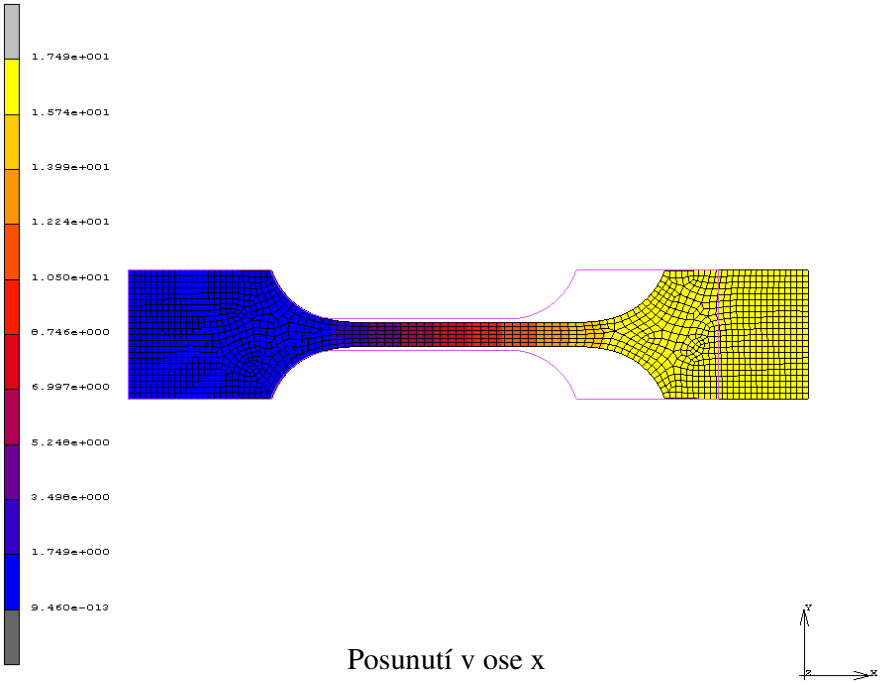
- tahový diagram pro tvrdé, křehké plasty (PEEK)
- mez pevnosti = 100MPa při Δl = 6,25mm



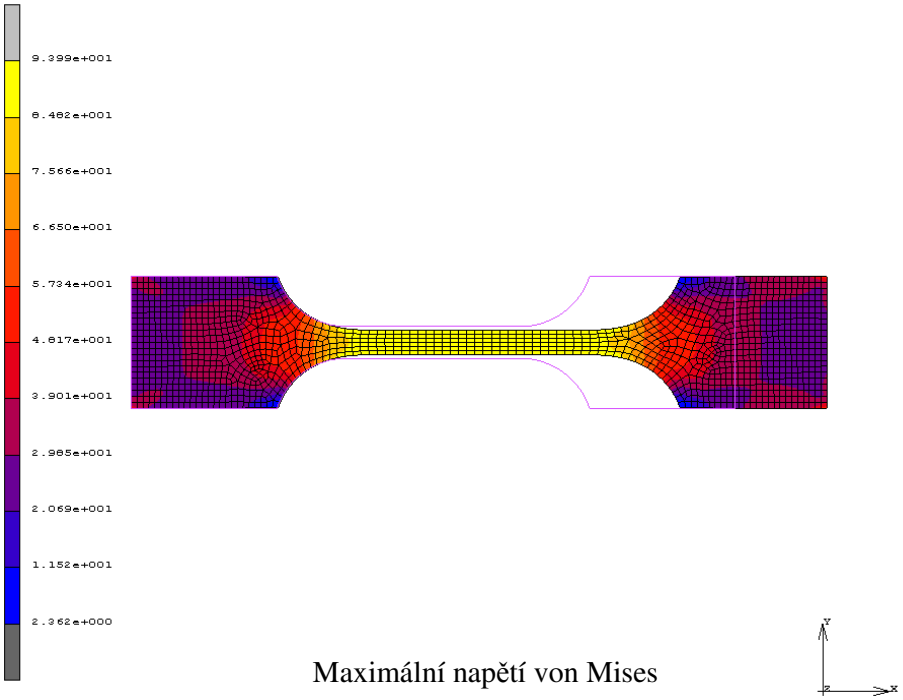
Graf 2: Vstupní tahový diagram pro PEEK

3.6 Výsledky simulace a vyhodnocení tahové zkoušky

PA6

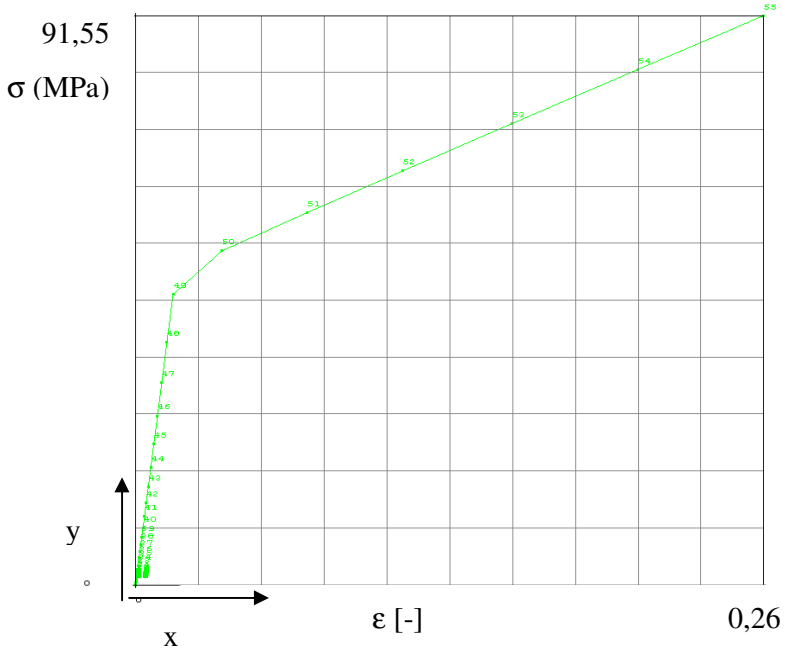


Obr. 24: Výsledné posunutí



Obr. 25: Výsledné napětí

- tahové namáhání zkušební tyčky z plastu s výraznou mezí kluzu při teplotě **20°C**, silou **3000N**, doba zatížení **10s**.
- maximální tahové napětí = **91,55MPa**

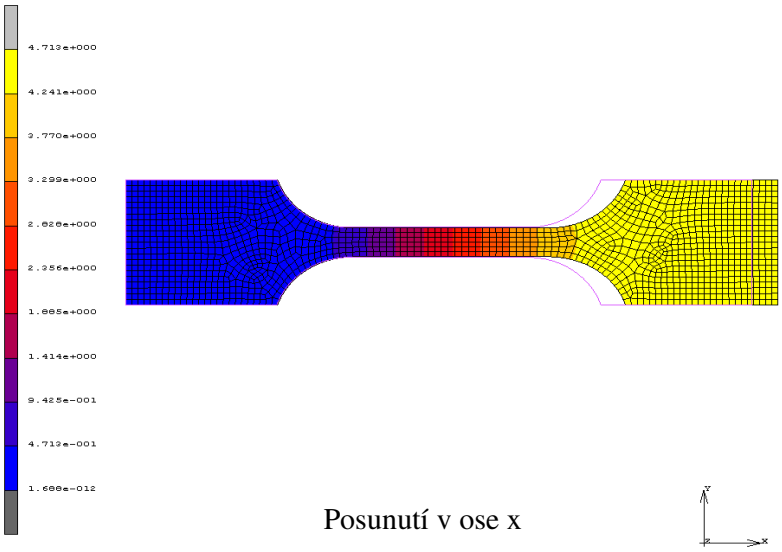


Graf 3: Výsledný tahový diagram PA6

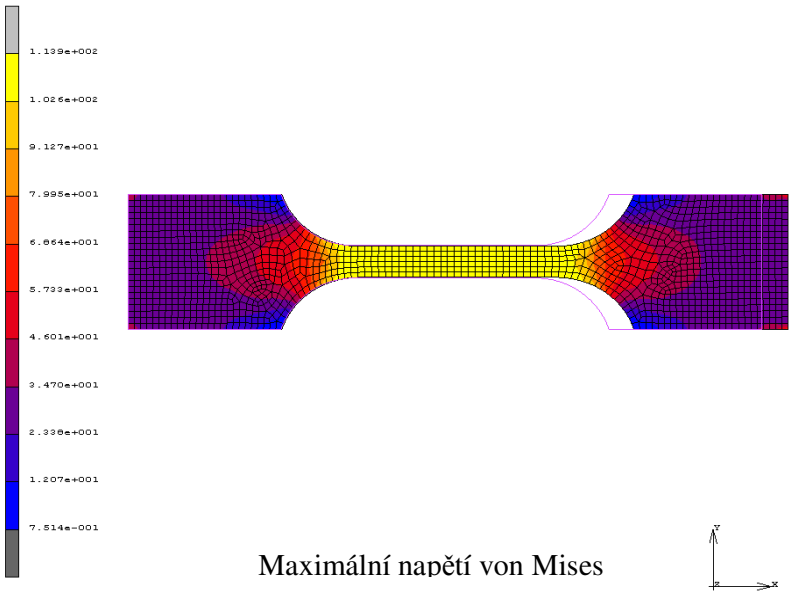
- graf závislosti deformace ve směru x na vnějším zatížení ve směru osy y.
- síla 3000N je rozpočítána na jednotlivé uzly, maximální síla na jednom uzlu = **130N**

- maximální posunutí při daném zatížení a čase = **6,515mm.**
- mez kluzu ≈ **55MPa**

PEEK

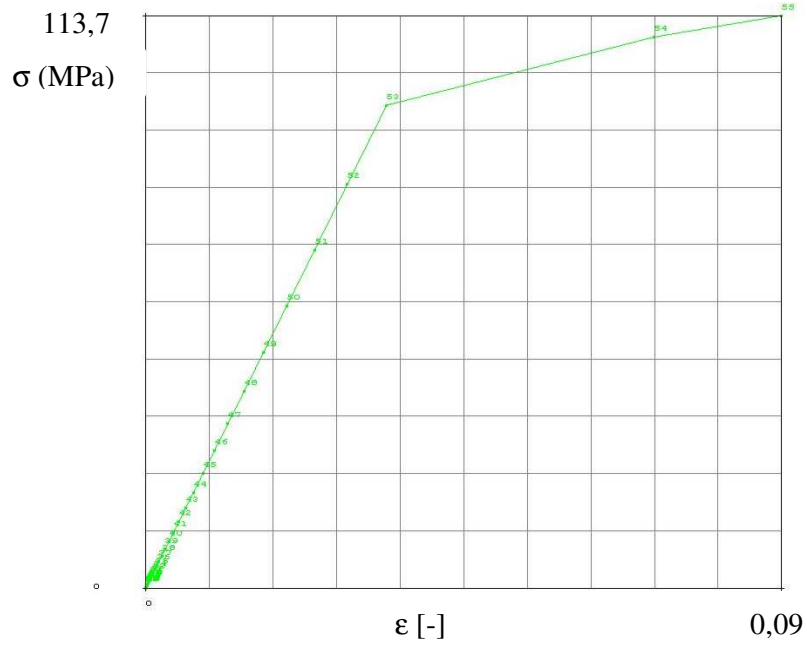


Obr. 26: Výsledné posunutí



Obr. 27: Výsledné napětí

- tahové namáhání zkušební tyčky z křehkého plastu při teplotě **20°C**, silou **3000N**, doba zatížení **10s**.
- maximální tahové napětí = **113,7MPa**



Graf 4: Výsledný tahový diagram PEEK

- graf závislosti deformace ve směru x na vnějším zatížení ve směru osy y.
- síla 3000N je rozpočítána na jednotlivé uzly, maximální síla na jednom uzlu = **130N**
- maximální posunutí při daném zatížení a čase = **2,285mm**
- mez kluzu ≈ **96,5MPa**

3.7 Porovnání výsledků simulace se vstupními hodnotami a s hodnotami různých výrobců

	Mez pevnosti [MPa] Simulace/vstupní hodnoty	**Mez kluzu [MPa] Simulace/ vstupní hodnoty**	**Tažnost [%] Simulace/ vstupní hodnoty**
PA6	91,55/85	55/60	26/70
PEEK	113,7/100	96,5/97	9/25

Tab. 4: Porovnání hodnot zjištěných simulací s hodnotami vstupními

Jak již bylo řečeno, mechanické vlastnosti plastů (a nejen ty) jsou značně závislé na teplotě, rychlosti zatěžování (rychlosti deformace), struktuře, přísadách a v neposlední řadě také na technologii výroby. Tyto faktory mají značný vliv v odchylkách mezi výslednými hodnotami ze simulace, ze vstupních hodnot a z hodnot od různých výrobců (tab.5).
Srovnávací tabulka 5 znázorňuje rozdíly v hodnotách získaných ze simulace tahové zkoušky v MSC Marc od hodnot uváděných výrobcem polotovarů z plastů firmy LPM a materiálovou databází CES Edupack společnosti Granta. V některých případech se hodnoty blíží spíše těm uváděných v katalogu firmy LPM (např. mez kluzu), v jiných případech jsou blíže hodnotám uváděných v CES Edupack (mez pevnosti). Simulace tahové zkoušky neproběhla za přesných podmínek daných normou. Z důvodu zjednodušení výpočtového modelu (popř. software neumožňoval zadání některých parametrů) nebylo uvažováno např. přesné složení daného

plastu, přísady, podíl krystalické a amorfní oblasti, technologie výroby zkušebního vzorku, apod. Problematické z hlediska přesnosti bylo také zadání výchozích hodnot křivky pro plast s výraznou mezí kluzu. I přes tato zjednodušení se výsledky příliš neliší a lze říci, že jsou věrohodné a výpočtový model se podařilo v tomto případě přiblížit skutečnému chování, respektive hodnotám uváděnými výrobci.

PEEK	LPM	Granta	MSC Marc
Mez pevnosti [MPa]	100	70-103	113,7
Mez kluzu [MPa]	97	87-95	96,5
Tažnost [%]	>60	30-150	9

PA6	LPM	Granta	MSC Marc
Mez pevnosti [MPa]	85	82-90,5	91,55
Mez kluzu [MPa]	60-90	86-90,5	55
Tažnost [%]	20-60	20-45	25

Tab. 5: Porovnání hodnot simulace s hodnotami výrobců

3.8 Porovnání materiálových hodnot vybraných různých zdrojů

Výrobci plastů mnohdy uvádějí rozdílná data vlastností plastů. Dokonce i při použití stejných normalizovaných zkoušek je často možné použít široký rozsah přípustných alternativních podmínek pro provedení zkoušek, a proto se získaná data bez uvedení těchto podmínek stávají nesrovnatelnými. Metody a zkušební podmínky, které umožní platné srovnání plastových materiálů, určuje norma ČSN EN ISO 11403-2 [19].

V tabulce 6 je srovnání parametrů PEEKu, POMu a PA6 od předního výrobce plastů firmy LPM a z materiálové databáze CES EduPack verze 6.2.0 firmy Granta.

PEEK	LPM	Granta
Mez pevnosti [MPa]	100	70-103
Mez kluzu [MPa]	97	87-95
Tažnost [%]	>60	30-150

PA6	LPM	Granta
Mez pevnosti [MPa]	85	82-90,5
Mez kluzu [MPa]	60-90	86-90,5
Tažnost [%]	20-60	20-45

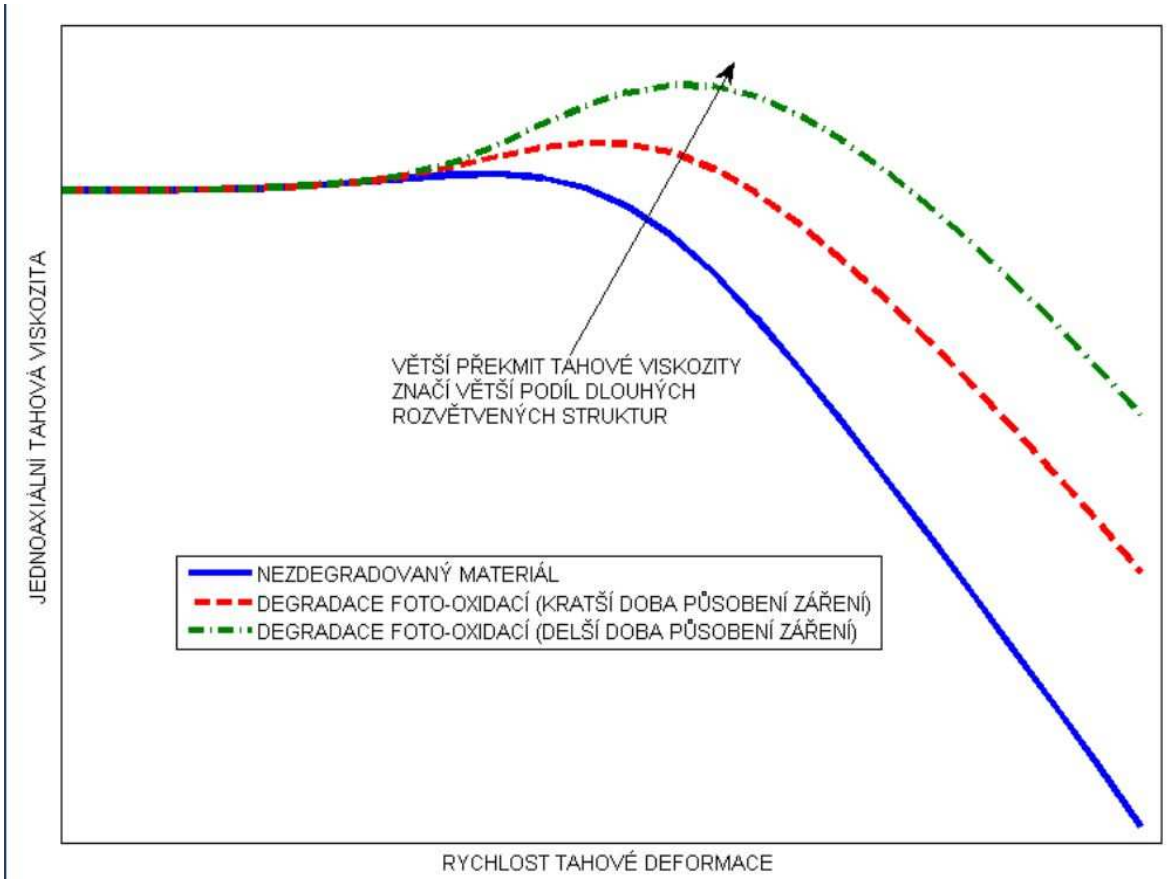
POM	LPM	Granta
Mez pevnosti [MPa]	75	67-69
Mez kluzu [MPa]	72	65-69
Tažnost [%]	50	10-75

Tab. 6: Porovnání hodnot mezi výrobci

4 Výzkum vlivu stárnutí polymerních materiálů na jejich mechanické a fyzikální vlastnosti

4.1 Teorie stárnutí polymerních materiálů

Vliv vnějších vlivů (působení reflektivních vlastností) má za následek změnu fyzikálně-chemických vlastností, které je dáno např. mechanickým opotřebením, změnami teplot, UV zářením, oxidací, apod. Obecně se jedná o pomalý a nevratný proces (tzv. stárnutí materiálu) měnící fyzikálně-chemické vlastnosti vedoucí ke ztrátě požadované funkcionality (degradaci), popřípadě až k úplné destrukci. Mezi typy degradací u polymerních materiálů patří fotooxidace, termální degradace a chemická degradace způsobená oxidací, ozonizací nebo hydrolýzou. To vede ke změně molekulové hmotnosti a polydisperzity (struktura polymeru obsahující makromolekuly více různých velikostí). Tyto změny ve struktuře způsobené degradací zachycuje metoda reologické charakterizace. Tato metoda vychází z principu, že každá chemická změna materiálu má vliv na změnu fyzikální (např. dojde-li ke změně délky makromolekulárního řetězce, změna se projeví na mechanických vlastnostech materiálu). V procesu výroby (vytlačování, vyfukování, vstřikování, tváření) hrají reologické vlastnosti (smyková viskozita, tahová viskozita, poměr elastické a smykové složky) také určitou roli a ovlivňují vlastnosti finálního výrobku. Reologické vlastnosti polymerních materiálů jsou dány zejména jejich molekulární hmotností, polydisperzitou a topologií molekuly, která může být lineární, větvená (různá míra větvení a typ) nebo zesíťovaná (případně částečně zesíťovaná). Reologický test poskytuje informace o procesu tečení materiálu pod vlivem vnějších sil a má značný význam ve zpracovatelské technologii polymerních materiálů. Základní vztah pro formulování zákonitostí toku je Newtonův zákon pro ideální kapalinu [12].
Reologický test probíhá na reometru (buď rotačním nebo kapilárním). Na obou reometrech se dá změřit tahová viskozita, která udává míru vnitřního odporu materiálu vůči vnějšímu namáhání (natahování materiálu). Kapilární pracuje na principu vytlačování zkoušeného materiálu skrz kapiláru o přesně definované délce a průměru. Měřením tlaku v kapiláře a rychlosti posunu pístu je možné vypočítat rychlost smykové deformace a smykovou viskozitu. Rotační reometr pracuje na principu rotačního pohybu mezi dvěma kruhovými deskami (dva souosé válce nebo kužel a deska). U této metody se měří otáčky a kroutící moment vyvolaný zkoušeným materiálem mezi těmito deskami, z těchto hodnot je opět stanovena smyková deformace a smyková viskozita. S kratší délkou polymerního řetězce ustálená smyková viskozita klesá. Při degradaci materiálu dochází ke změně délky řetězce náhodným způsobem (mění se jeho polydisperzita). U fotooxidační degradace (např. u polyethylenu) dochází nejprve k dělení řetězců a poté k opětovnému slučování do složitějších rozvětvených struktur. Rozvětvenost struktur je možné sledovat měřením tahové viskozity (obr.28) [51].



Obr. 28 vliv foto-oxidace na molekulární strukturu polyethylenu (s větší mírou fotooxidace vzrůstá větvení polymeru) [51]

Změnu fyzikálně-chemických vlastností (degradaci polymerních materiálů) je možné zachytit mechanicky pomocí reologických charakteristik. V oblasti zpracování polymerních materiálů přináší identifikace změny větvení polymerního řetězce pomocí reologických charakteristik důležité poznatky [51].

4.1.1 Tepelné a tepelně oxidační stárnutí

Působení nadměrně zvýšených teplot po určitou dobu zčásti rozrušuje makromolekulární řetězce polymerů a má za následek křehnutí plastu. U semikrystalických termoplastů způsobuje dodatečnou krystalizaci, která se rovněž projevuje snížením tažnosti a rázové a vrubové houževnatosti. U plastů náchylných k hydrolýze urychluje stárnutí voda, např. křehnutí PA6 ve vodě za nepříliš zvýšených teplot po delší době, nebo PC v horké vodě či páře. Cyklické tepelné namáhání plastu je rovněž příčinou rychlejšího stárnutí. Pokud je plastová součást současně vystavena nadměrným teplotám a přístupu vzduchu, může kyslík být další příčinou porušování makromolekulárních řetězců a mluvíme o stárnutí tepelně oxidačním. Na druhé straně při zamezení přístupu vzduchu (např. v inertní atmosféře nebo v olejové lázni) umožní zvýšit teplotní hranice použití některých plastů (u PA z 80°C až na 120°C) [12].

4.1.2 Stárnutí vlivem povětrnosti

Pod pojmem vliv povětrnosti rozumíme současné a střídavé působení vzdušného kyslíku a slunečního záření, vlhka a sucha či tepla a zimy na plastové součásti. Souhrn uvedených vlivů má po určité době opět za následek rozrušování makromolekulárních řetězců a tím křehnutí,

vznik trhlin, žloutnutí, ztrátu barev a povrchového lesku. Stárnutí postupuje pozvolna s časem, mechanické vlastnosti se snižují přibližně lineárně s dobou expozice vzorku ovzduší, přičemž pokles vlastností bude rychlejší napři. v tropech za současného působení tepla, vlhka a intenzívního slunečního záření než ve střední Evropě. Účinnost vlivu záření závisí tedy na zeměpisné šířce, podnebí, expoziční době plastových součástí apod. Stárnutí vlivem povětrnosti se zkouší buď přirozeným stárnutím (vystavení vzorků venku), nebo urychleným umělým stárnutím (vzorky se umístí do komory, v níž se napodobí vliv slunečního záření, vlhkosti a teplotních změn se zvýšenou intenzitou). Reaktoplasty mají vesměs lepší odolnost proti povětrnosti než většina termoplastů. U termoplastů obsahující změkčovadla (např. měkčený PVC) dochází působením povětrnostních vlivů k vytěkání změkčovadla a křehnutí. Odolnost je možné zlepšit přísadou stabilizátorů proti ultrafialovému záření, antioxidantů, apod. Účinnou přísadou jsou např. aktivní saze do polyolefinů [12].

4.1.3 **Stárnutí vlivem záření**

Obvykle se jedná o záření typu beta, gama , paprsky X či neutronové. Účinek bývá různý, někdy se rozrušují makromolekulární řetězce a polymer křehne, jindy se iniciuje zesíťování lineárních řetězců a zvýší se pevnost polymeru na úkor jeho tažnosti. Záměrné ozařování za účelem zesíťování a zvýšení pevnosti a tepelné odolnosti se používá např. u PE pro speciální aplikace. Odolnost proti záření se zkouší jednak vysokými dávkami záření na tlustostěnných vzorcích v atmosféře bez kyslíku, jednak malými dávkami na tenkostěnných vzorcích na vzduchu. V prvním případě jde o odolnost krátkodobou, v druhém o odolnost dlouhodobou [12].

Zkratka plastu	Odolnost proti povětrnostním vlivům (roky)	Odolnost proti záření	Zkratka plastu	Odolnost proti povětrnostním vlivům (roky)	Odolnost proti záření
rPE	1 – 2	střední	PC	2 – 4	střední
lPE	< 1	střední	PETP	2 – 4	
PE + aktivní saze	10 – 20		PI	2	dobrá
PP	< 1	nízká	PTFE, FEP	10 – 20	nízká
PP + aktivní saze	5 – 10		ETFE, PVDF	10 – 20	dobrá
PVC	2 – 4	střední	CA, CAB	< 1	
PS	1 – 2	dobrá	CA, CAB stabilizované	2 – 4	
hPS	2 – 4	nízká	PF + minerální plniva		
SAN	5 – 10	nízká	nebo skleněná vlákna	10 – 20	dobrá
ABS	1 – 2		PF + organická plniva	5 – 10	dobrá
ASA	5 – 10				
PMMA	5 – 10	střední	UP skelné lamináty	asi 10	dobrá
PA	2 – 4	střední	EP skelné lamináty	10 – 20	dobrá
POM	2 – 4	nízká	SI	10 – 20	

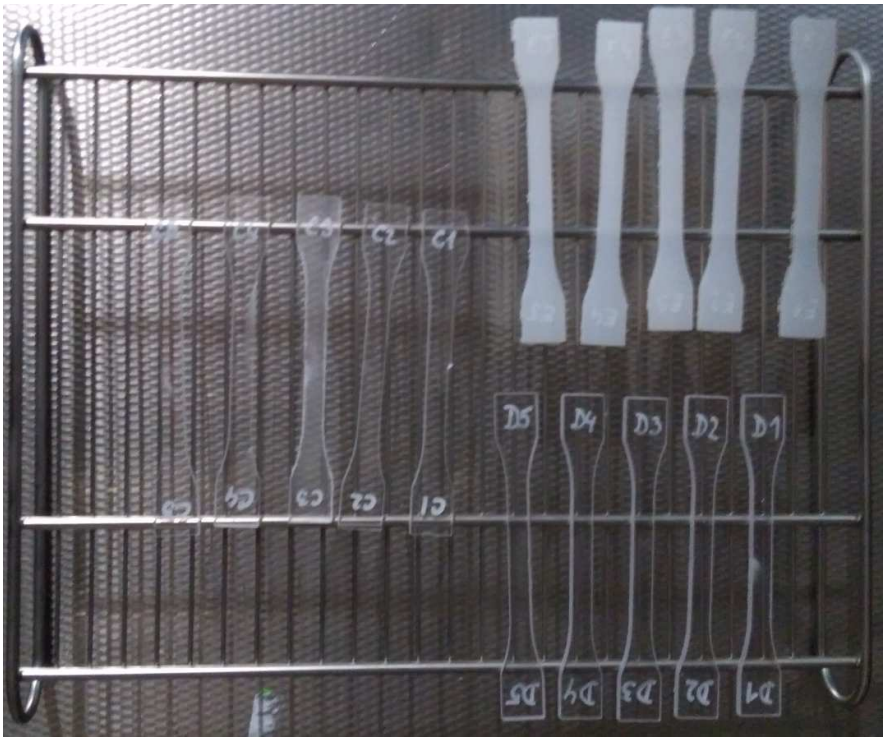
Tab. 7: Odolnost vybraných plastů proti povětrnostním vlivům a záření pro středoevropské klima [12]

4.1.4 **Umělé povětrnostní stárnutí**

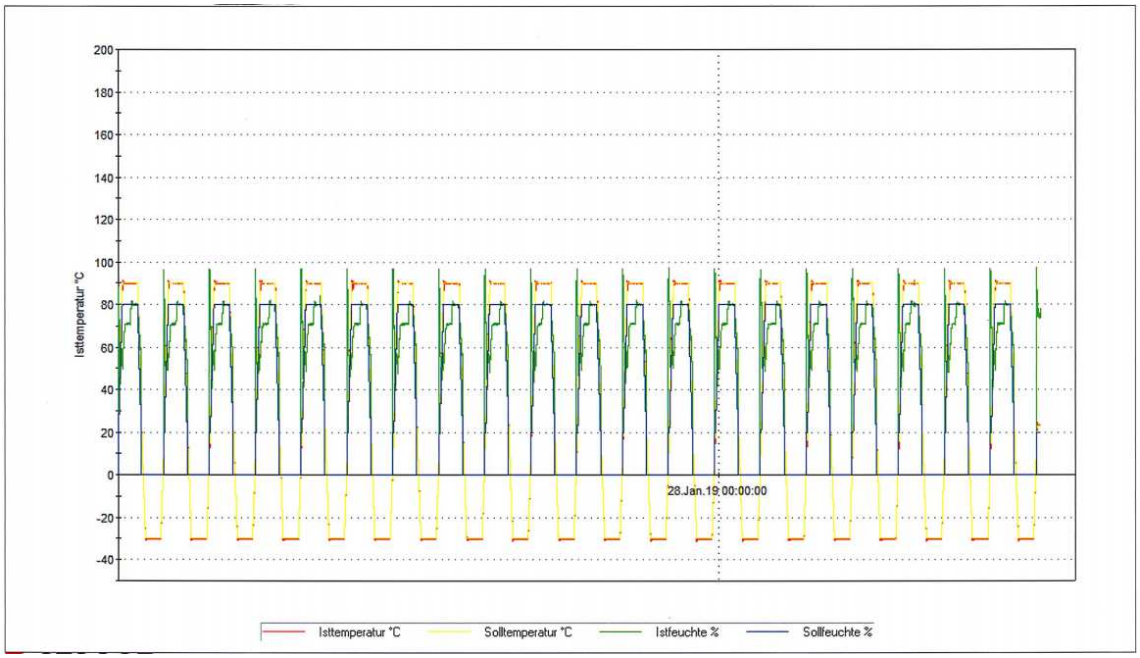
Podrobit materiál přirozenému stárnutí by bylo velmi problematické a časově značně náročné, z tohoto důvodu dovoluje norma (ČSN 64 0770) uměle napodobit klimatické podmínky. Metoda spočívá ve vystavení zkušebních těles umělým klimatickým podmínkám. Po stanoveném intervalu expozice se zjistí změny sledovaných vlastností. Ke zkoušce se používá zkušební zařízení pro umělé povětrnostní stárnutí zaručující nepřetržité udržování umělých klimatických činitelů (denní a noční cyklus, změna vlhkosti vzduchu, atd.) se zdrojem

světelného záření zaručujícím zářivý tok s intenzitou ozáření, přičemž musí být docíleno stejnoměrného ozáření zkušebních těles. Počet umělých klimatických činitelů současně působících na zkušební těleso se určí podle programu zkoušky, stejně tak jako doba, po kterou nepřetržitě probíhá zkoušení. Pro účely této práce byla využita Klimakomora firmy Megatech s.r.o. Prováděcí norma umělého stárnutí byla norma PER, kterou používají pro zkoušení svých dílů přední značky v automobilovém průmyslu. Všechny vzorky byly vystaveny teplotám od +90 do -30 °C ve dvanáctihodinových intervalech po dobu 10 dní (viz. obr. 31). Tyto vzorky byly následně přetrženy na trhacím zařízení Zwick/Roell.

Obr. 29: Klimakomora Typ KKP 8.000/40 N



Obr. 30: Umístění vzorků v klimakomoře



Obr. 31: Protokol umělého stárnutí z klimakomory - podle prováděcí normy pro plastové díly BMW automobilů

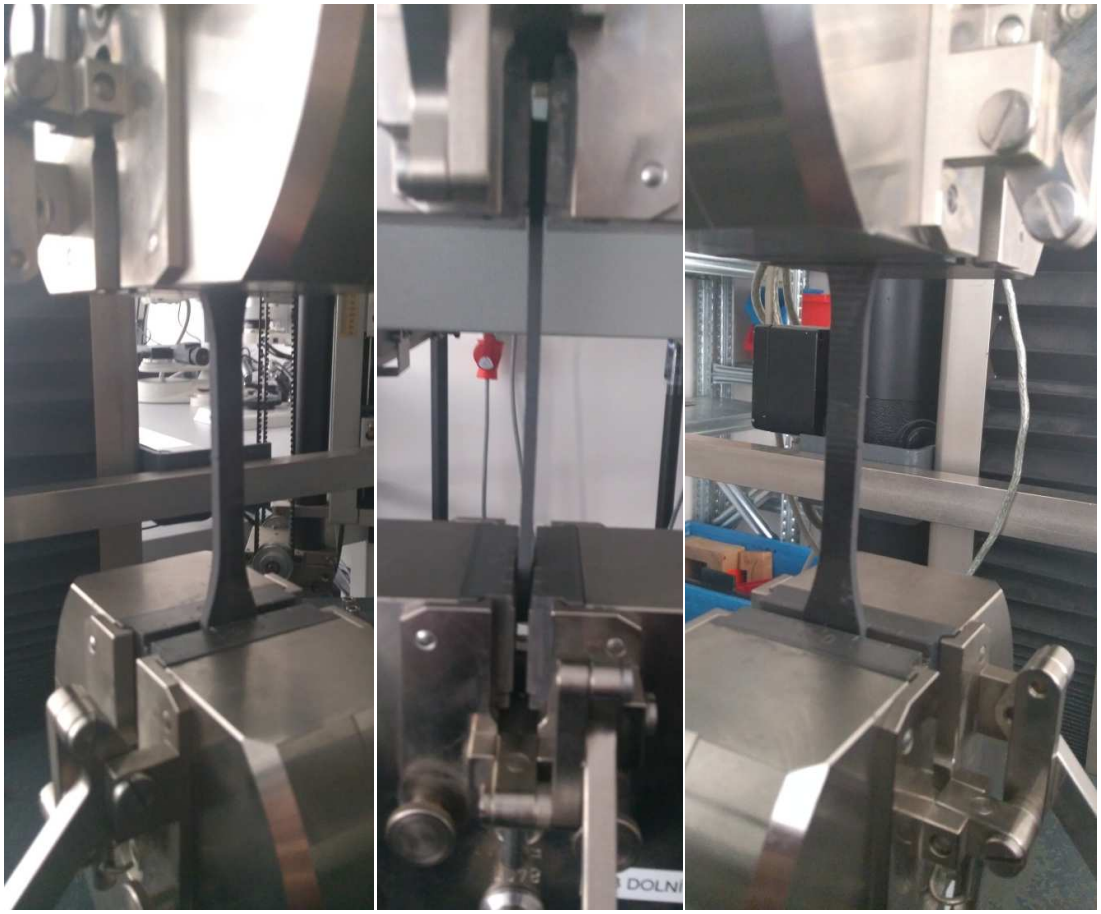
4.2 Experimentální tahová zkouška

Tahová zkouška probíhala dle normy ČSN 527-1 (Plasty - Stanovení tahových vlastností).
Pro experimentální tahovou zkoušku jsem zvolil běžně dostupné plasty využívané v konstrukci strojů a zařízení. Jedná se o vzorky z materiálů používaných jako průhledné kryty,

průzory, apod. (PC, PMMA), dále pak zástupce běžně dostupného konstrukčního polyamidu (PA 6) a high-tech polyamidu vyztuženého 30% skelnými vlákny (PA 6GF 30). U tohoto materiálu byly zkušební vzorky zhotoveny v podélném i příčném směru vláken. U všech vzorků byly přetrženy minimálně čtyři sady vzorků kvůli odstranění možného vlivu chybovosti. Jak bylo zmíněno v předchozím textu, vzorky z těchto materiálů byly rovněž uměle vystárnuté (vyjma PA6 30GF) a poté přetrženy na trhacím zařízení.

Označení vzorku	Materiál	Specifikace	Vystárnutý
A1-A4	PA6 30GF	Vlákna v příčném směru na směr zatížení	NE
B1-B4	PA6 30GF	Vlákna v podélném směru na směr zatížení	NE
C1-C5	PMMA		ANO
D1-D5	PC		ANO
E1-E5	PA6		ANO
F1-F5	PMMA		NE
G1-G5	PC		NE
H1-H5	PA6		NE

Tab. 8: Tabulka zkušebních vzorků

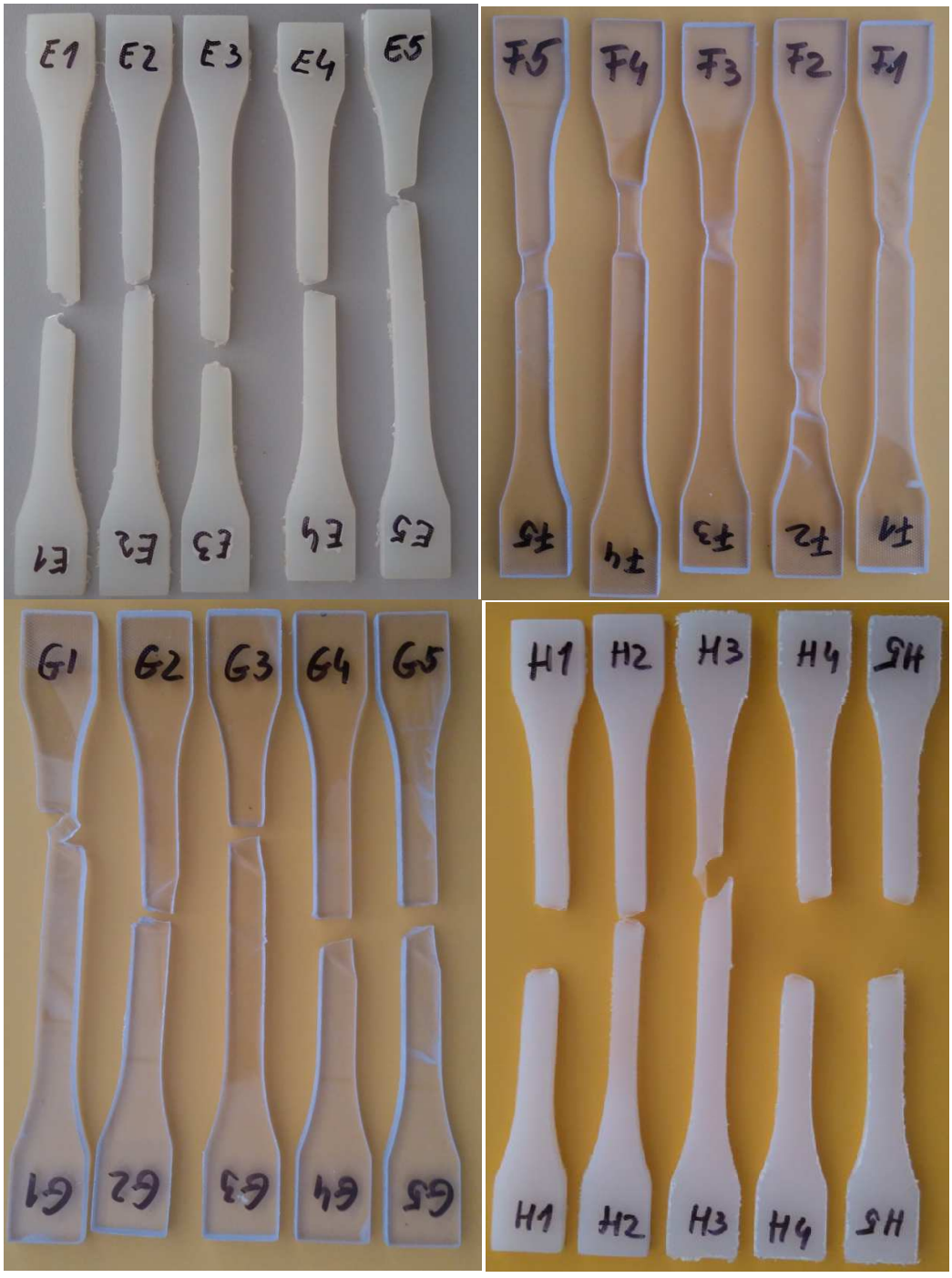


Obr. 32: Uchycení vzorku v čelistech na trhacím stroji: pohled zleva, čelně a zprava

4.2.1 **Vzorky před přetržením**

Obr. 33: Vzorky před přetržením

4.2.2 **Vzorky po přetržení**



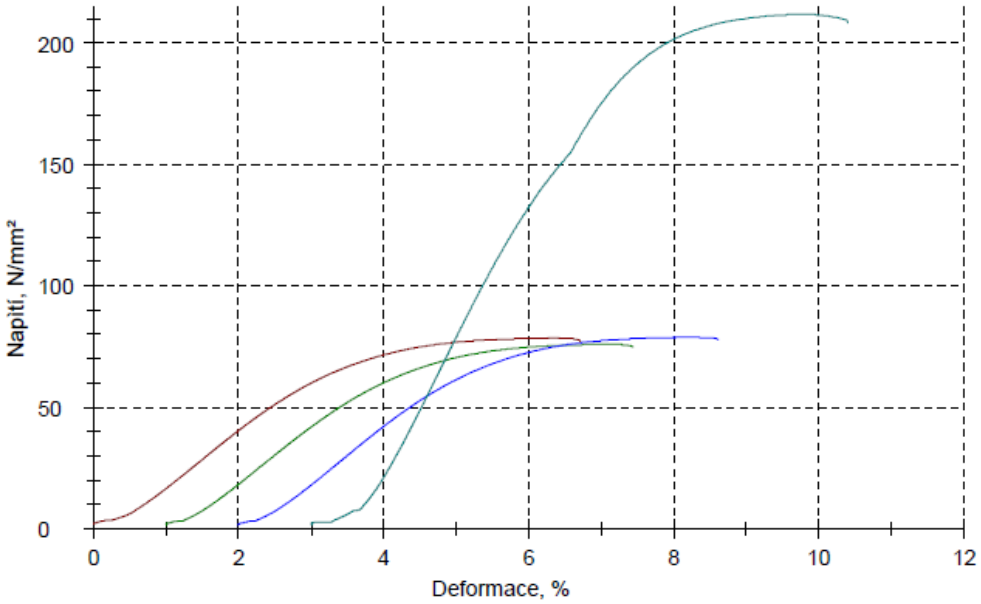
Obr. 34: Vzorky po přetržení

4.2.3 Záznamy tahových zkoušek a výsledné hodnoty

Výsledky:

Nr	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
1	105,00	-	-	-	78,37	6,33	6,71
2	105,00	-	-	-	75,78	6,00	6,44
3	105,00	-	-	-	78,65	6,19	6,62
4	105,00	5,98	145,32	-	211,69	6,83	7,41

Grafické záznamy zkoušek:



Statistika:

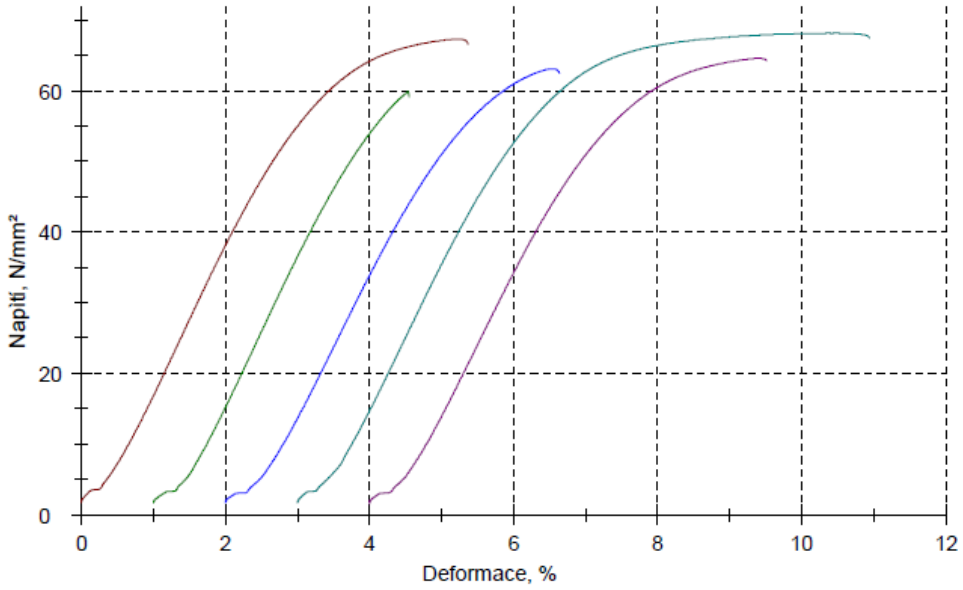
Série n = 4	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
x̄	105,00	5,98	145,32	-	111,12	6,34	6,79
s	0,00	-	-	-	67,06	0,36	0,42
v	0,00	-	-	-	60,35	5,61	6,23

Obr. 35: Záznam z protokolu měření vzorků A

Výsledky:

Nr	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
1	105,00	-	-	-	67,29	5,20	5,37
2	105,00	-	-	-	59,78	3,54	3,55
3	105,00	-	-	-	63,11	4,54	4,64
4	105,00	-	-	-	68,16	7,46	7,94
5	105,00	-	-	-	64,61	5,40	5,51

Grafické záznamy zkoušek:



Statistika:

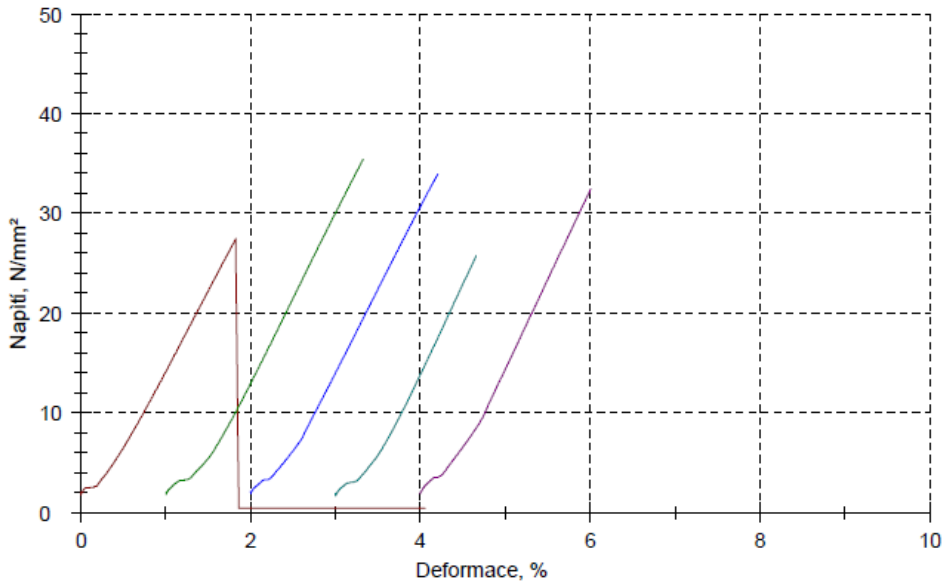
Série n = 5	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
$\bar{x}$	105,00	-	-	-	64,59	5,23	5,40
s	0,00	-	-	-	3,37	1,44	1,62
v	0,00	-	-	-	5,21	27,59	29,94

Obr. 36: Záznam z protokolu měření vzorků B

Výsledky:

Nr	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
1	105,00	-	-	-	27,43	1,83	-
2	105,00	-	-	-	35,42	2,33	2,33
3	105,00	-	-	-	33,92	2,21	2,21
4	105,00	-	-	-	25,72	1,66	1,66
5	105,00	-	-	-	32,41	2,01	2,01

Grafické záznamy zkoušek:



Statistika:

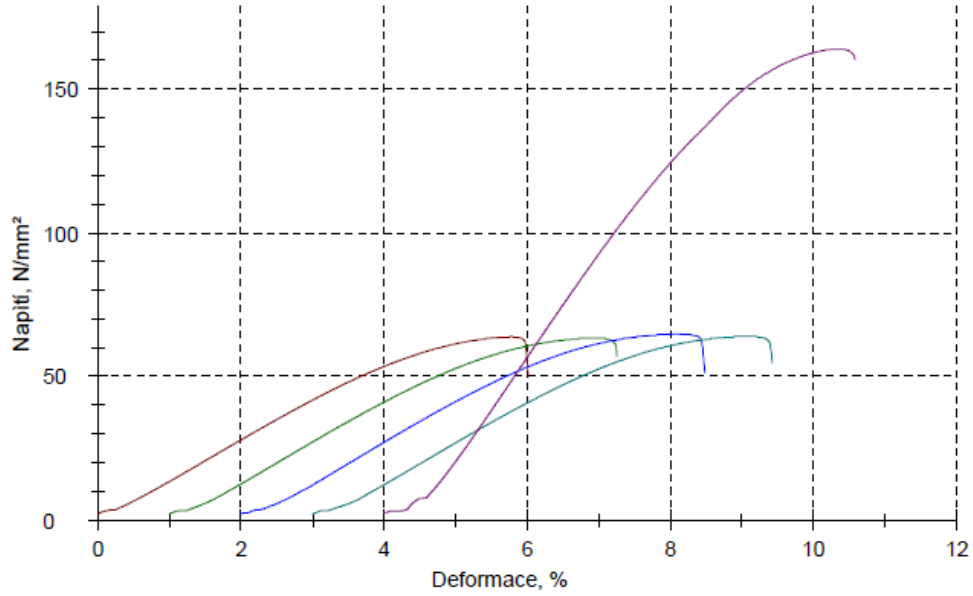
Série n = 5	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
$\bar{x}$	105,00	-	-	-	30,98	2,01	2,05
s	0,00	-	-	-	4,20	0,27	0,29
v	0,00	-	-	-	13,56	13,57	14,27

Obr. 37: Záznam z protokolu měření vzorků C

Výsledky:

Nr	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
1	105,00	-	-	-	63,74	5,78	6,02
2	105,00	-	-	-	63,28	5,95	6,26
3	105,00	-	-	-	64,64	6,09	6,49
4	105,00	-	-	-	63,86	6,07	6,42
5	105,00	3,66	129,75	-	163,98	6,35	6,58

Grafické záznamy zkoušek:



Statistika:

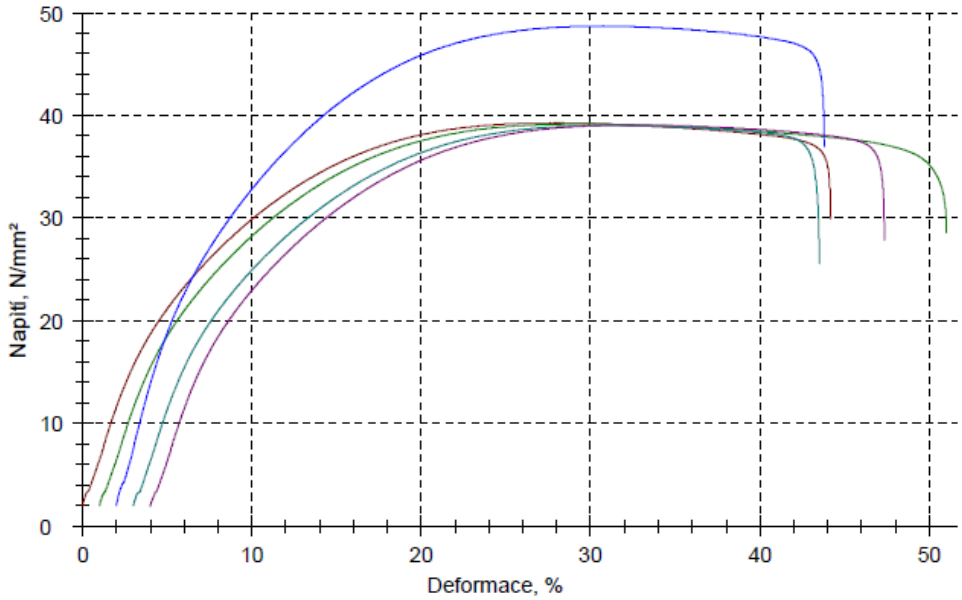
Série n = 5	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
$\bar{x}$	105,00	3,66	129,75	-	83,90	6,05	6,35
s	0,00	-	-	-	44,77	0,21	0,22
v	0,00	-	-	-	53,36	3,44	3,51

Obr. 38: Záznam z protokolu měření vzorků D

Výsledky:

Nr	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
1	105,00	-	-	-	39,25	27,93	44,18
2	105,00	-	-	-	39,14	28,22	50,03
3	105,00	-	-	-	48,70	28,75	41,80
4	105,00	-	-	-	39,01	28,15	40,52
5	105,00	-	-	-	39,04	28,16	43,36

Grafické záznamy zkoušek:



Statistika:

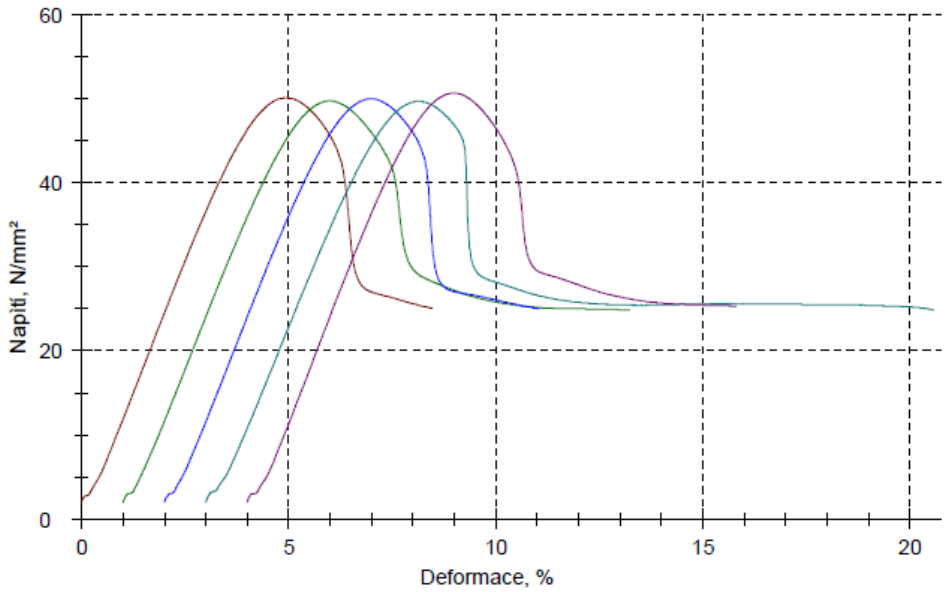
Série n = 5	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
$\bar{x}$	105,00	-	-	-	41,03	28,24	43,98
s	0,00	-	-	-	4,29	0,30	3,67
v	0,00	-	-	-	10,45	1,07	8,34

Obr. 39: Záznam z protokolu měření vzorků E

Výsledky:

Nr	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
1	105,00	-	-	-	50,02	4,91	8,48
2	105,00	-	-	-	49,65	5,01	12,23
3	105,00	-	-	-	49,88	4,97	9,08
4	105,00	-	-	-	49,60	5,13	17,58
5	105,00	-	-	-	50,57	4,96	11,80

Grafické záznamy zkoušek:



Statistika:

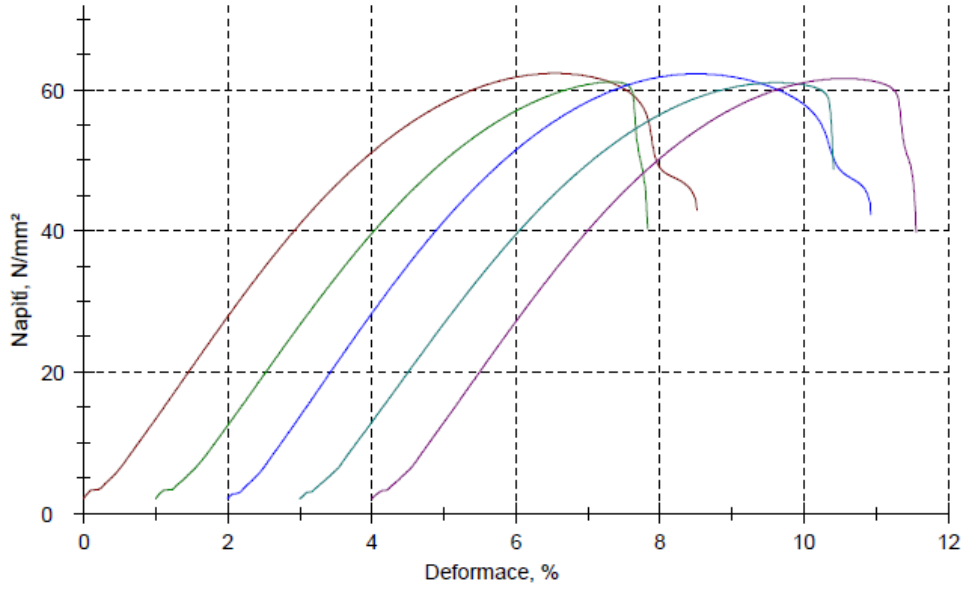
Série n = 5	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
$\bar{x}$	105,00	-	-	-	49,95	4,99	11,83
s	0,00	-	-	-	0,39	0,08	3,61
v	0,00	-	-	-	0,78	1,63	30,47

Obr. 40: Záznam z protokolu měření vzorků F

Výsledky:

Nr	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
1	105,00	-	-	-	62,35	6,58	8,52
2	105,00	-	-	-	61,12	6,34	6,83
3	105,00	-	-	-	62,28	6,51	8,92
4	105,00	-	-	-	61,01	6,63	7,40
5	105,00	-	-	-	61,59	6,56	7,55

Grafické záznamy zkoušek:



Statistika:

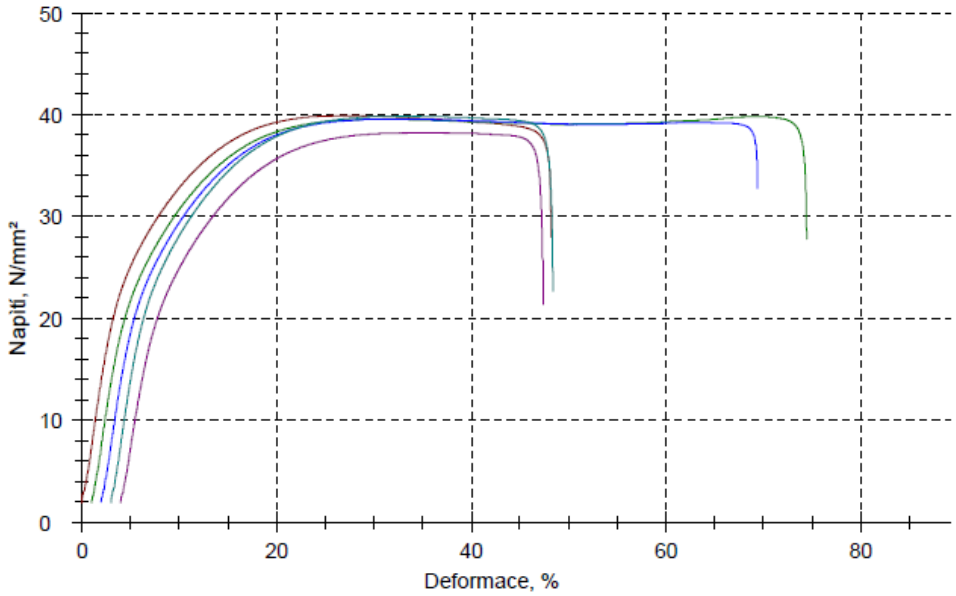
Série n = 5	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
$\bar{x}$	105,00	-	-	-	61,67	6,52	7,85
s	0,00	-	-	-	0,63	0,11	0,86
v	0,00	-	-	-	1,02	1,70	10,90

Obr. 41: Záznam z protokolu měření vzorků G

Výsledky:

Nr	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
1	105,00	-	-	-	39,90	27,40	48,22
2	105,00	-	-	-	39,78	68,18	73,45
3	105,00	-	-	-	39,54	29,77	67,42
4	105,00	-	-	-	39,81	29,79	45,40
5	105,00	-	-	-	38,21	31,71	43,40

Grafické záznamy zkoušek:



Statistika:

Série n = 5	L0 mm	E modul kN/mm²	Rp x N/mm²	ReH N/mm²	Rm N/mm²	ε Fmax. %	εlom. %
$\bar{x}$	105,00	-	-	-	39,45	37,37	55,58
s	0,00	-	-	-	0,70	17,29	13,83
v	0,00	-	-	-	1,79	46,27	24,89

Obr. 42: Záznam z protokolu měření vzorků H

4.3 Shrnutí výsledků experimentální tahové zkoušky

Označení vzorku	Materiál
A1-A4	PA6 30GF
B1-B4	PA6 30GF
C1-C5	PMMA
D1-D5	PC
E1-E5	PA6
F1-F5	PMMA
G1-G5	PC
H1-H5	PA6

Tab. 9: Shrnutí materiálů a označení vzorků

4.3.1 Srovnání hodnot mechanických vlastností experimentálně zjištěných s hodnotami uváděnými výrobcem materiálu PA6

U zkoušených materiálů byly přímo zjištěny konkrétní mechanické vlastnosti na sadu vzorků z daného materiálu. Materiál PA6 byl dodán včetně materiálového listu výrobce s garantovanými vlastnostmi (viz. příloha č.7). Těmto hodnotám se zkoušený vzorek blížil spíše na spodní hranici. Mez pevnosti (Rm) uváděná výrobcem se pohybuje v rozmezí od 45-70MPa; maximální prodloužení při přetržení je mezi 50-180%. Experimentálně naměřené hodnoty vzorků z PA6 jsou Rm = 38-48MPa; maximální prodloužení je 40-74% (viz obr. 39 a 42).

Tyto vzorky byly zhotoveny pomocí vodního paprsku.

4.3.2 Srovnání hodnot mechanických vlastností nevystárnutých vzorků s uměle vystárnutými

U hodnot PA6 jsou rozdíly mezi zestárnutým (E1-E5) a nezestárnutým (H1-H5) vzorkem nepatrné co se týká mezi pevnosti, respektive maximálního napětí. Pokud jde o maximální deformaci, zde už jsou rozdíly patrnější a z grafů lze usoudit, že nezestárnuté vzorky vykazovaly větší houževnatost. U vzorků zestárnutého materiálu PA6 došlo u jednoho vzorku k výraznějšímu skoku mezi pevnosti, jinak u všech vzorků stejných materiálů bylo chování velmi podobné.

U vzorků zestárnutého PC je z obr. 33 patrné, že jeden vzorek byl porušen již v klimakomoře vlivem působení vysokých teplot (vzorek D1-D5). Tento vzorek se při zkoušení odchýlil od ostatních vzorků. Ostatní mechanické vlastnosti nevykazovaly při srovnání s nevystárnutými vzorky (G1-G5) větších rozdílů. U zestárnutých vzorků došlo k mírnému nárůstu pevnosti, avšak při lehké ztrátě houževnatosti.

U PMMA je rozdíl mezi zestárnutým a nezestárnutým vzorkem poměrně značný. Hodnoty maximálních napětí jsou téměř na polovičních hodnotách u zestárnutých vzorků a poměrné prodloužení dosahuje rozdílu hodnot ještě výraznějšího.

Vzorky PMMA a PC byly zhotoveny na vodním paprsku.

4.3.3 Srovnání hodnot mechanických vlastností při různé orientaci vláken ke směru zatížení materiálu PA6 GF30

Při zkoušení těchto vzorků (A1-A4) se objevila jedna odchylka. Z důvodu, že předchozí 3 měření byly velice podobné, jsem tuto odchylku zanedbal.
U vzorků s příčným směrem vláken ke směru zatížení byly naměřené hodnoty meze pevnosti vyšší než ve srovnání u stejného vzorku materiálu s vlákny orientovanými v podélném směru, stejně tomu tak je v případě poměrné deformace.

Vzorky materiálu PA6 GF30 byly zhotoveny obráběním a vodním paprskem.

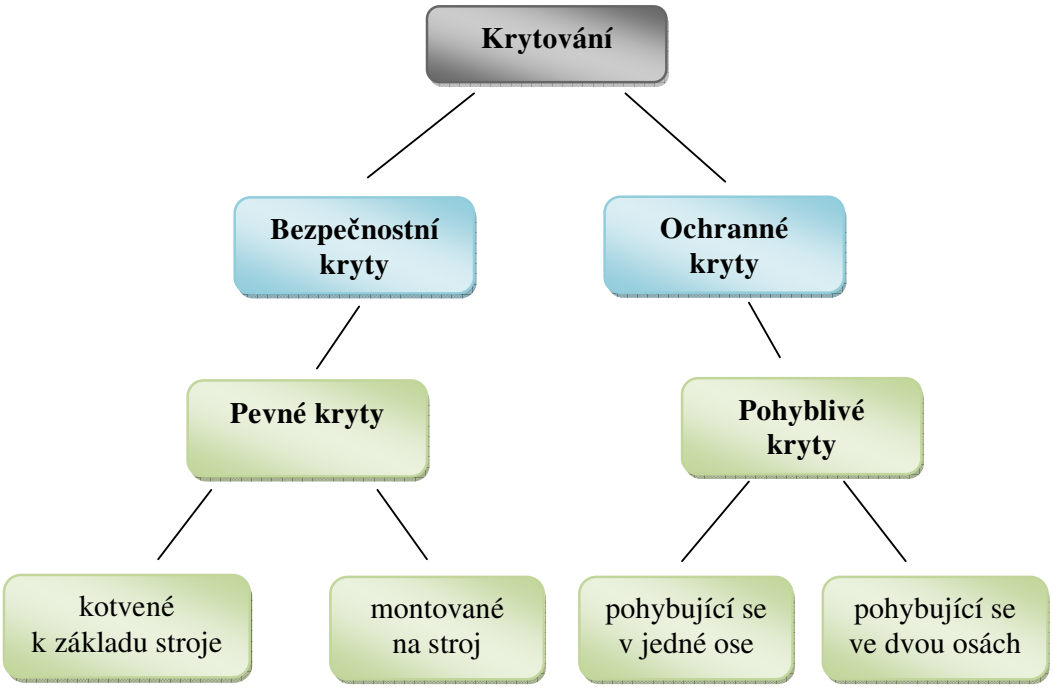
4.3.4 Zhodnocení vlivu stárnutí na degradaci vlastností

Obecně nelze jednoznačně říct jaký vliv má stárnutí na mechanické či fyzikální vlastnosti materiálů. Neexistuje jednoznačný vztah či graf změn jednotlivých vlastností. Lze ovšem říct, že u některých materiálů (PMMA) dochází k nežádoucí změně mechanických vlastností a je třeba pohlížet na tuto skutečnost při návrhu součástí v závislosti na podmínkách použití. Naproti tomu stojí druhý pohled a lze říci, že v některých případech (PC) dochází vlivem přirozeného stárnutí k vytvrzování a tedy k zlepšení některých mechanických vlastností (pevnosti), ovšem často na úkor jiných vlastností (např. tažnosti). Vhodným použitím bychom mohli docílit toho, že se zhorší mechanické vlastnosti, které pro danou aplikaci nepotřebujeme (např. zmíněná tažnost u PA6).

5 Využití plastových materiálů v oblasti výrobních strojů

V současné době jsou u výrobních strojů plasty hojně používány především v oblasti krytování. Na rozdíl od kovových materiálů nabízejí možnost průhledného celoplošného krytování a umožňují tak možnost pohledu přímo na proces výroby. Oproti sklu nabízejí nižší hmotnost a větší houževnatost. Využívají se rovněž i jako neprůhledné kryty částí strojů, např. opláštění strojů v neexponovaných částech zejména z důvodu snížení celkové hmotnosti stroje a tím snížení nároků na zatížení podlah či snížení nákladů při přepravě a manipulaci. Odpadají také náklady spojené s povrchovou úpravou a tyto kryty jsou většinou tepelně a elektricky nevodivé. Další oblasti nasazení plastů jsou zejména pro své kluzné či otěruvzdorné vlastnosti. Jedná se například o různé typy vodících lišt řetězů, kluzná pouzdra, mechanické dorazy, opěrné prvky, lineární vedení, dopravní pásy, apod. V neposlední řadě mohou plasty nahradit kovové materiály v některých částech převodových ústrojí (ozubená kola, řemenice, hřebeny, ložiska, hřídelové spojky apod).

5.1 Krytování strojů



Krytování se primárně dělí na ochranné a bezpečnostní. Podle konstrukce se dále rozděluje na pohyblivé během vykonávání pracovního procesu a pevné.
Pevné (bezpečnostní) kryty slouží pro ochranu osob pracujících u stroje, či v jeho blízkosti a mohou být kotvené k základu stroje či montované na samotný stroj. Bezpečnostní kryty jsou navrženy s ohledem na bezpečnostní normy. Na stroji se mohou vyskytovat následující nebezpečí:
- mechanická (stlačení, střih, říznutí, zachycení, vtažení apod.)
- elektrická (dotyk živých částí apod.)
- způsobená hlukem (ztráta sluchu, rovnováhy, rušení při komunikaci apod.)

- způsobená materiály a látkami (vdechování škodlivých výparů, plynů, mlh, prachu, apod.)
- způsobená zanedbáním ergonomie

Jednotlivá nebezpečí se musí zhodnotit při návrhu optimálního krytu na konkrétním stroji.

Pohyblivé ochranné kryty slouží především k ochraně pohybových os a vedení (např. krytování vřeten, kuličkových šroubů, lineárních vedení apod.). Pohyblivé kryty musí také splňovat různé požadavky s ohledem na typ stroje, na kterém jsou použity.
Dále se kryty mohou dělit podle uspořádání na stroji na **vnější** a **vnitřní** kryty. Vnější kryty mají za úkol vytvořit rozhraní mezi pracovním prostorem a vnějším okolím. Vnitřním krytováním se odděluje pracovní prostor od pohybových mechanismů [50].

Obr. 43: Příklady vnějšího a vnitřního krytování [50]

5.1.1 Krytování pohyblivých částí strojů

Přesnost obráběcích strojů závisí mimo jiné také na kvalitě povrchu a přesnosti vlastních vodicích ploch. Pomocí vhodného krytu je tedy chráněna pracovní a geometrická přesnost stroje. Krytování má rovněž bezpečnostní opodstatnění, neboť dokáže zamezit přístupu obsluhy stroje k místům, kde by mohlo dojít k úrazům způsobeným pohyblivými částmi stroje. V neposlední řadě slouží krytování k vylepšení estetického vzhledu stroje a navozuje tak dojem kompaktnosti.

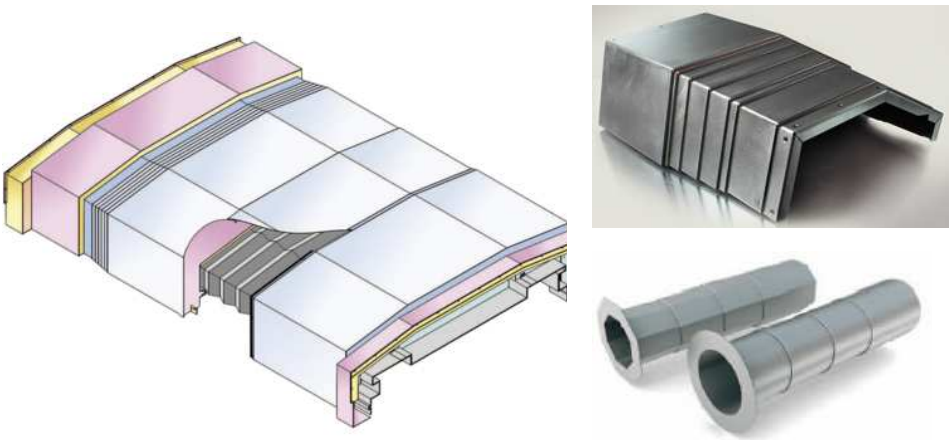
Krytování vodících ploch strojů se používá převážně k zamezení vniku nečistot (chladicích kapalin, třísek atd.) působících většinou současně na vodicí plochy. Výběrem vhodného krytování se zabrání nadměrnému opotřebení valivého či kluzného vedení, a tak se prodlouží životnost jednotlivých konstrukčních uzlů.
Kryty mohou být vyrobeny z:
- ocelových plechů
- lehkých slitin
- plastů
- vytvrzených vláken
- pryže
- umělých tkanin

Většina druhů krytů zabezpečuje ochranu pouze v jednom směru pohybu stroje. Pokud má stroj více pohyblivých os, u kterých je nutné použít krytování vedení, pak je většinou nutné každou osu opatřit vlastním krytem.

Kryty můžeme rozdělit na:

- kryty pohybující se v jedné ose (teleskopické kryty, skládané měchy, rolovací krytování)
- dvouosé kryty (deskové provedení typ X-Y)
- stírací rámečky
- krytování pohybových šroubů spirálovým pružným krytem

5.1.1.1 Teleskopické kryty



Rourovitý

Obr. 44: Typy teleskopických krytů [49]

Funkce krytu

Teleskopické kryty a některé typy měchů se dále mohou dělit na kryty s mechanizmem pro vázaný pohyb a na kryty bez mechanizmu.

Teleskopické kryty patří mezi nejvíce rozšířenou formu krytování pohyblivých uzlů stroje. Mají robustní stavbu a snášejí také přiměřené zatížení. Jsou navrhovány tak, že obsluha stroje může při seřizování našlápnout na krajní díl. Hlavními nevýhodami teleskopických krytů vyráběných z ocelových plechů je jejich velká hmotnost a trhavé pohyby, vznikající při pohybu jednotlivých dílců krytů, které na sebe naráží. Zvýšení únosnosti při současném snížení hmotnosti se dá dosáhnout použitím jiných materiálových struktur.

Trhavé pohyby se u nízkých posunových rychlostí tlumí samovolně vlivem třecích sil. Při vyšších rychlostech musí být kryty opatřeny nějakým typem tlumiče nebo např. rozvíracím nůžkovým mechanizmem, pomocí něhož jsou jednotlivé díly krytu rozvírány rovnoměrně. Tím nedochází k jejich vzájemným nárazům a následným rázům.

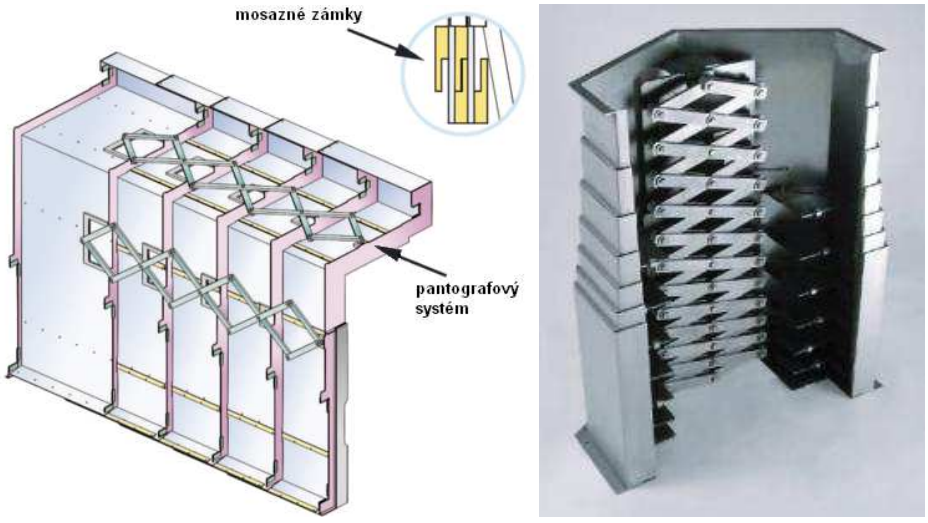
Pro tlumení nárazů jednotlivých dílů se používá kladek, které jsou připevněny na ocelových ramenech s pružinami. Při nárazu dochází k tlumení soustavy pohybujících se dílců vlivem stlačení pružiny na konci ramene. Tento způsob tlumení se používá u větších nárazových sil. Další možností tlumení je pomocí speciálně vyrobených tlumičů z pěnové hmoty známé pod názvem Celesta. Jedná se o velice jednoduchý způsob tlumení a používá se pro menší nárazové síly [49].

Konstrukce krytu

Teleskopický kryt (Obr. 44) je tedy složen z několika dílců, které jsou vyrobeny nejčastěji z ocelových nebo hliníkových plechů, tvrzené tkaniny nebo z plastů (u kterých se dosáhne úspora hmotnosti až o 70 %, avšak na úkor ztráty mechanické pevnosti). Jednotlivé díly se po sobě posouvají při pohybu stolu nebo suportu stroje, ke kterým jsou svými konci připevněny. Okraje každého dílu jsou po celém obvodu opatřeny stíracími lištami, vyrobenými většinou z polyuretanu nebo ze syntetické pryže, která dobře odolává chladicím kapalinám. Tyto stírací lišty disponují vysokou odolností proti abrazivnímu opotřebení a mají dobré kluzné vlastnosti. Musí rovněž zabránit tomu, aby se chladicí kapalina, třísky a jiné nečistoty nedostaly na vodicí plochy stroje nebo kuličkový šroub, kde by mohlo dojít k nadměrnému opotřebení, nebo dokonce k omezení pohybu či k úplnému zadření. Návrh stírací lišty je vzhledem k jeho malé ploše průřezu a velkou tvarovou složitostí značně pracnou konstrukční i výrobní záležitostí.

U jednoosých a dvouosých teleskopických krytů se pro plynulý a rovnoměrný chod používá již zmiňovaný nůžkový mechanismus (Obr. 45). Jednotlivé díly mají díky tomu mezi sebou vzájemnou mechanickou vazbu. Rozevíráním nůžkového mechanizmu dochází k tomu, že všechna jeho ramena se rozevírají současně a rovnoměrně. Při spojení všech dílů teleskopického krytu s klouby nůžkového mechanizmu dochází k rovnoměrnému vysouvání všech dílců teleskopického krytu zároveň a nedochází tak k vzájemným nárazům.

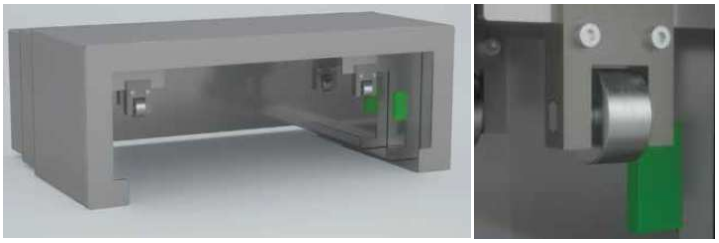
Jednoosý teleskopický kryt má na každém ze svých dílů připevněny opěrné kladky (rolny) (Obr. 46) nebo mosazné kluzáky (Obr. 47), pomocí kterých je kryt podepírán po celé své délce při vlastním vysouvání. Kladky se odvalují po kluzném nebo valivém vedení stroje a používají se pro vyšší posuvové rychlosti. Mosazné kluzáky se smykají po vedení stroje a používají se při nižších posuvových rychlostech. Někdy se používají také kombinace kluzáku a kladek [49].



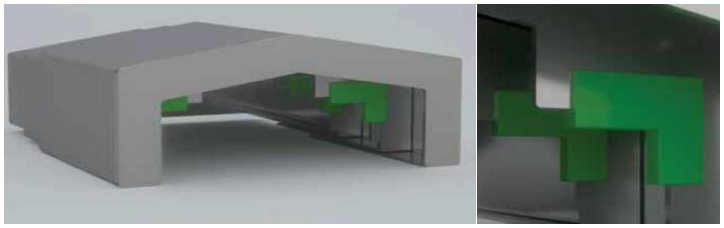
Obr. 45: Teleskopický kryt s nůžkovým systémem [48]

Na obr. 45 jsou znázorněny speciální teleskopické kryty s pantografovým (nůžkovým) systémem a pěti řadami mosazných zámků, které do sebe zapadají. Zámky zabezpečují

stabilitu při vysokých posuvových rychlostech. Pantografový systém zabraňuje také tomu, aby se jednotlivé segmenty vzpříčily.



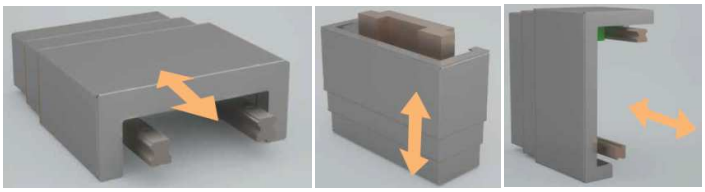
Obr. 46: Vodící prvky – rolny [49]



Obr. 47: Vodící prvky – kluzáky [49]

Pracovní pozice krytu

Pracovní pozice krytu je důležitá z důvodu návrhu tvaru a typu vodících elementů (Obr. 48). V horizontální poloze je kryt vlastní vahou přitlačován k vedení a nehrozí tak samovolné vybočení. V případě vertikální nebo příčné pozici je nutné zabránit pohybu krytu v horizontálním směru, aby se kryt samovolně neuvolnil z definovaného pojezdu.



a.) **b.)** **c.)**

Obr. 48: Pracovní pozice teleskopického krytu: a) horizontální, b) vertikální, c) příčná [49]

Vlastnosti krytu

- robustní konstrukce chránicí stroj proti hrubému mechanickému poškození
- chrání drahá vedení před třískami a chladicími kapalinami i v nejnáročnějším prostředí
- zvyšuje životnost strojů (vedení)
- kryty jsou většinou pohyblivé a usnadňují přístup k opracovávaným výrobkům a nástrojům
- zarovnávají celkový vzhled stroje

Používané materiály

- Vysoce kvalitní speciální ocelový plech s antikorozní úpravou

Obr. 49: Různé polohy teleskopického krytu s nůžkovým mechanismem [48]

Obr. 50: Příklad dvouosého krytování cross-cover firmy kabel schlepp [46]

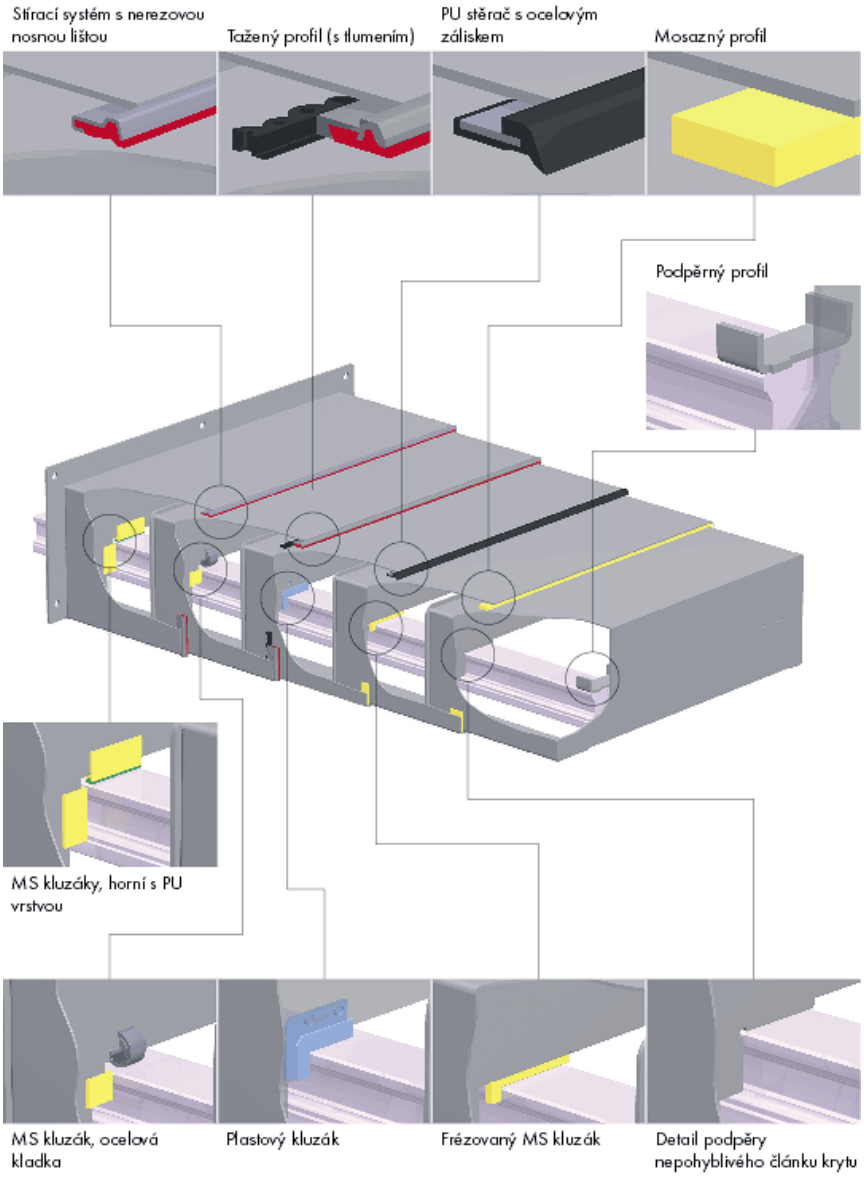
Obr. 51: Příklad teleskopického krytování na stroji

Patentované systémy:

Tlumič rázů pro teleskopické kryty – superdomek, tlumič rázů pro teleskopické kryty – hyperdomek, stírací prvek - zejména teleskopických krytů pohybových os výrobních strojů a tlumič rázů teleskopických krytů. Pomocí těchto patentovaných tlumičů firmy Gildemeister lze snížit rázy mezi pohyblivým stolem a teleskopem. Rozložením špičky síly v čase se snižuje polohová odchylka stolu způsobená nárazy krytu [29].

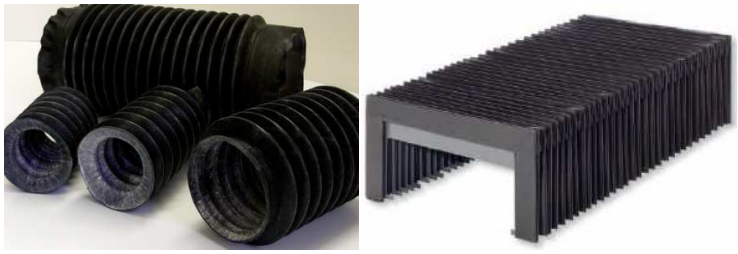
Jedním z výsledků vývojového projektu KKNoG (krytování nové generace) z roku 2011 je nová řada stěračů pro teleskopické kryty, kompatibilní s původními nosnými profily, která zaručuje lepší setření povrchu krytu a nižší pasivní odpory. Dalším cílem je zlepšení odolnosti

stěračů proti negativním účinkům dopadu horkých třísek. Toho se dá dosáhnout aplikací nových materiálů [7].



Obr. 52: Schéma teleskopického krytu [49]

5.1.1.2 Skládané měchy



Obr. 53: Skládaný měch kruhového a U-profilu [49]

Funkce krytu

Výhodou nasazení měchů jako krytu vedení stroje je jejich snadná montáž. U uzavřených profilů se pro zjednodušenou montáž někdy používá suchého zipu, který se zapne po nasazení krytu. Pro ochranu válcových částí strojů se používají uzavřené kruhové nebo úhelníkové měchy. Tento druh měchů je také využíván pro krytování kuličkových šroubů, například u strojů s paralelním uspořádáním kinematické struktury [49].

Měchy mohou sloužit primárně jako:

- prachotěsné
- vodotěsné
- tepelně odolné
- dobře tvarovatelné

Konstrukce krytu

Měchy jsou pro svoji velice nízkou hmotnost vhodné pro zvlášť vysoké posuvové rychlosti a značná zrychlení pohyblivých uzlů stroje. Tvarem připomínají tahací harmoniku. Měchy jsou vybaveny nosnými rámečky z polyvinylchloridu (PVC), které slouží k udržení měchu ve stálém rovnoměrném a pevném tvaru. Rámečky jsou připevněny mezi švy vždy ke každému spoji. Rámečky se pohybují po vedení stroje svojí vnitřní plochou.

Jsou vyráběny převážně tři základní profily měchů: žaluziový tvar, U-profil a uzavřený profil. Existuji i jiné profily měchů, například profil střechového tvaru, který se používá pro snadné stékání chladicí kapaliny z povrchu měchu. Pro zvýšení tepelné odolnosti se někdy využívá tzv. krycích šupin z lehkých kovů nebo z nerezového plechu. Krycí šupiny jsou připevněny na hřbetní stranu měchu, ke každému švu zvlášť. Žhavé třísky, které by mohly způsobit propálení měchu, jsou tak od něj odděleny pomocí plechů.

Zakončení měchu a jeho spojení s pevnou a posuvnou částí stroje je provedeno pomocí přírub, kterými jsou měchy opatřeny. Tyto příruby jsou vyráběny z plechu, nebo z plastu a ke stroji se připevňují pomocí šroubů.

Obr. 54: Schéma skládacího měchu [49]

Vlastnosti krytu

- nízká hmotnost
- snadná montáž
- tepelná odolnost
- díky dobrému tlumení vhodnost použití pro vysoké posuvové rychlosti

Používané materiály

Vyrábí se převážně z vícevrstvých umělých tkanin nebo pryže. Materiál, z kterého se měchy vyrábějí, musí vydržet značné tepelné zatížení, ve kterém se bude měch používat. Maximální krátkodobé tepelné zatížení některých krytů je až 1000°C. Pro tyto aplikace jsou obvykle používaným materiálem kevlarová vlákna. Takto vysoké tepelné zatížení se může vyskytovat u strojů pracujících s laserovým nebo plazma paprskem. Dále se měchy vyrábí z měkčeného PVC, gumových mezikruží či pogumovaného tkaniva.

Název	Tloušťka materiálu [mm]	Spodní teplotní hranice [°C]	Horní teplotní hranice [°C]	Krátkodobá teplotní hranice [°C]	Popis
Polyester-PVC	0,25	-30	70	80	Standardní materiál odolný proti vodě, prachu, brusnému kalu. Omezená odolnost proti olejům a mastným chladicím kapalinám
	0,36				
	0,6				
	0,8				
Polyester-PUR	0,22	-20	100	110	Standardní materiál odolný proti vodě, prachu, brusnému kalu. Zlepšená odolnost proti olejům a mastným chladicím kapalinám
	0,4				
Polyester-PUR-PTFE	0,3	-20	100	110	Materiál vhodný pro použití v prostředích agresivních kapalin. Hladká PTFE vrstva zajišťuje anti-adhezivní vlastnost
	0,5				
Polyester-Neopren	0,5	-30	110	130	Materiál odolný proti vodě, prachu, brusnému kalu, olejům a mastným chladicím kapalinám. Omezená odolnost proti třískám
	0,8				
	1,2				
	1,4				
Pyresit	0,4	-40	140	170	Směs Kevlaru a Panoxu. Vhodný materiál pro svářecí stroje
Nomex	0,36	-30	150	190	Odolnost proti prachu. Samouhasínací materiál vhodný pro stroje pracující s laserovým paprskem
Skelné vlákno-PVC+Silikon	0,5	-30	180	200	Materiál vhodný proti jiskrám vznikajících při svářecím procesu
Kevlar	0,36	-30	250	500	Samouhasínací materiál vhodný pro stroje pracující s laserovým paprskem. Vysoká odolnost proti mechanickému namáhání
Silontex	1,8	-30	700	750	Materiál odolný proti extrémně vysokým teplotám a abrazivnímu prostředí
	2,3				
	3,2				

Tab. 10: Materiály pro výrobu krycích měchů firmy Hennlich [48]

Materiál - číslo	Popis materiálu			Tloušťka materiálu mm	Teplotní stálost			Vlastnosti materiálu
	Povrchová úprava horní strany	Nosný materiál	Povrchová úprava dolní strany		Krátkodobě °C	Trvale min. °C	Trvale max. °C	
TEMAT 091	PVC	Sklolaminát	PVC	0,44	+300	-30	+ 80	Doporučeno při dopadání malých množství jisker svařování a látek obsahujících kyseliny;samozhášcí.
TEMAT 106	Teflon	Polyester	Polyuretan	0,30	+200	-30	+120	Velmi dobrá odolnost vůči olejům a chemickým produktům. Svrchní vrstva je nepřilnavá. Nízká hodnota tření. Vynikající odolnost vůči chemickým látkám. Vysoká odolnost vůči tření, pevnost v tahu proti roztržení. Velmi vhodný materiál pro brusky.
TEMAT 015	Polyuretan	Poliester	Polyuretan	0,25	+200	-30	+ 90	Vynikající odolnost vůči olejům tukům na bázi minerálního oleje; vysoká odolnost vůči tření, dobrá stabilita v ohybu.
TEMAT 151	Polyuretan	Poliester	Polyuretan	0,35	+200	-30	+ 90	
TEMAT 164	Polyuretan	Kevlar*	Polyuretan	0,35	+350	-30	+180	Vynikající odolnost vůči olejům tukům na bázi minerálního oleje; vysoká odolnost vůči tření, dobrá pevnost v ohybu. Kevlar je velmi odolný vůči střihu a silnému mechanickému zatížení, a to i při mohutném dopadání třísek s ostrými hranami Vhodný pro použití při vysokých teplotách.
TEMAT 165	Polyuretan	Nomex*	Polyuretan	0,36	+300	-30	+130	Vynikající odolnost vůči olejům tukům na bázi minerálního oleje; vysoká odolnost vůči tření, dobrá stabilita v ohybu. Tento materiál lze použít při silném mechanickém zatížení a malých množství jisker svařování či rozžhavených materiálech; častější použití při laserových řezacích strojích. Samozhášeci.
TEMAT 169	Polyuretan	Panox*/Kevlar	Polyuretan	0,33	+190	-30	+140	Vynikající odolnost vůči olejům tukům na bázi minerálního oleje; vysoká odolnost vůči tření. Pro informaci o dalších vlastnostech prosím použijte materiálovou tabulku na straně 43.
TEMAT 017	PVC	Poliester	PVC	0,36	+100	-30	+ 70	Tento materiál je obzvláště vhodný při znečištění okolního prostředí prachem, při občasném dopadání chladicích prostředků a oleje; dále je také odolný vůči kyselinám.
TEMAT 020	PVC	Poliester	PVC	0,25	+100	-30	+ 70	

Nosný materiál číslo	Popis materiálu	Tloušťka mat.(mm)	Upozornění
PVC 05	PVC	0,50 **	Šířka měchu (B) do 300 mm
PVC 10	PVC	1,00	Šířka měchu (B) od 301 do 700 mm
PVC 15	PVC	1,50	Šířka měchu (B) od 701 do 1500 mm

Materiál koncového rámu

Materiál		Tloušťka (mm)
AL	Hliník	2,0 - 3,0
AC	Ocel	2,0 - 3,0 - 4,0
PVC	PVC	2,0 - 3,0

Materiál koncového rámu

Materiál		Oblast použití
AL (hlinikový vypalovaci lak)		Vhodný při dopadání jisker svařování, rozžhavených malých a středně velkých třísek. Obzvláště vhodný při soustavném dopadání jisker. Nízká vlastni hmotnost.
INOX		Vhodný při velkém množství třísek. Obzvláště doporučený při kontaktu s látkami obsahujicimi kyseliny.

Tab. 11: Materiály pro krycí měchy firmy P.E.I. [49]

5.1.1.3 **Rolovací krytování**

Obr. 55: Rolovací kryt bez ochranného pouzdra a s ochranným pouzdrem [45]

Funkce krytu

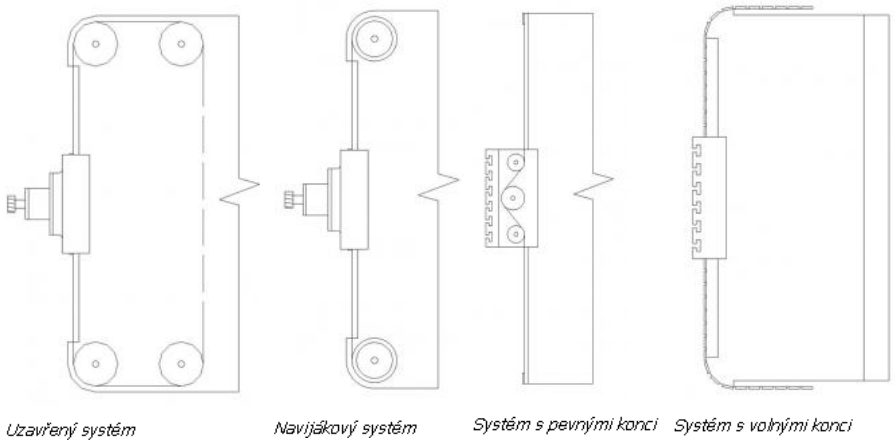
Roletové kryty se používají jako náhrada skládaných měchů tam, kde není dostatek prostoru, a jsou nižší požadavky na těsnost.

Roletové kryty mohou být:

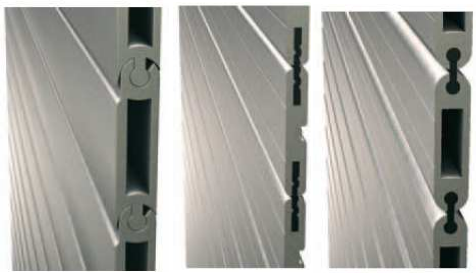
- bez ochranného pouzdra (skříně): pro upevnění se používají standardní držáky, které zabezpečí stabilní a jednoduché připevnění)
- s ochranným pouzdrem (skříní): používá se z důvodu bezpečnosti a větší tuhosti uchycení při vyšších rychlostech navíjení.

Konstrukce krytu

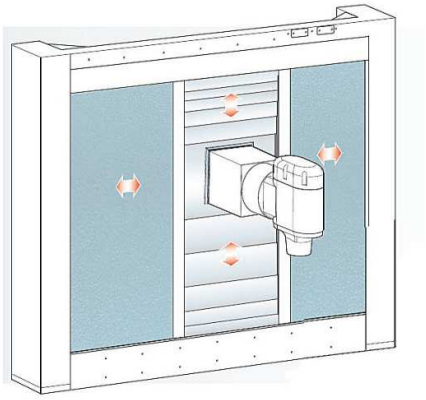
Rolovací kryt se skládá z pásu a bubnu, na který je pás navíjen. Volný konec pásu je připevněn k pohyblivé části stroje a pás je odvíjen podle toho, s jakým zdvihem pojíždí pohyblivá část stroje (nebo naopak). Zpětné navinutí pásu na buben je zajištěno pomocí pružiny, která se napíná při odvíjení pásu vně bubnu [45].



Obr. 56: Uspořádání rolovacího krytu [45]



Obr. 57: Provedení spojování jednotlivých článků krytu [45]



Obr. 58: Roll-up-cover firmy P.E.I. dvouosé krytování [49]

Vlastnosti krytu

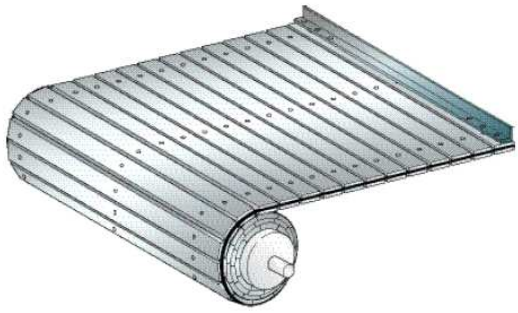
- odolnost vůči nízkým a vysokým teplotám
- možnost krycích clon proti třískám apod.
- minimální zástavbové požadavky
- jednoduchá montáž
- vhodnost použití pro vysoké posuvové rychlosti

Používané materiály

K ochraně vůči agresivnímu prostředí (kyseliny a zásady) se používají především speciální nátěry (např. PTFE a silikon).

Pás může být vyroben z pryže, z vícevrstvé syntetické tkaniny nebo z pružného nerezového plechu. Další typ rolovacího krytování je pomocí pásu z tkaniny, na které jsou připevněny ocelové nebo mosazné lišty. Tento typ je mnohem robustnější a pevnější, než jsou kryty z ocelového svinovacího pásu nebo z teleskopicky uspořádaných ocelových plechů. Nevýhodou je, že tento typ nelze použít pro vyšší posuvové rychlosti. Jeden konec pásu je připevněn pomocí šroubů k pohyblivé části stroje a druhý konec je volně spuštěn k zemi nebo se navíjí na buben.

V současné době se vyrábí mnoho různých variant tohoto krytování a uplatnily se zejména hliníkové tvarované lišty, které jsou mezi sebou spojeny pomocí kloubů nebo pryžových článků [1].

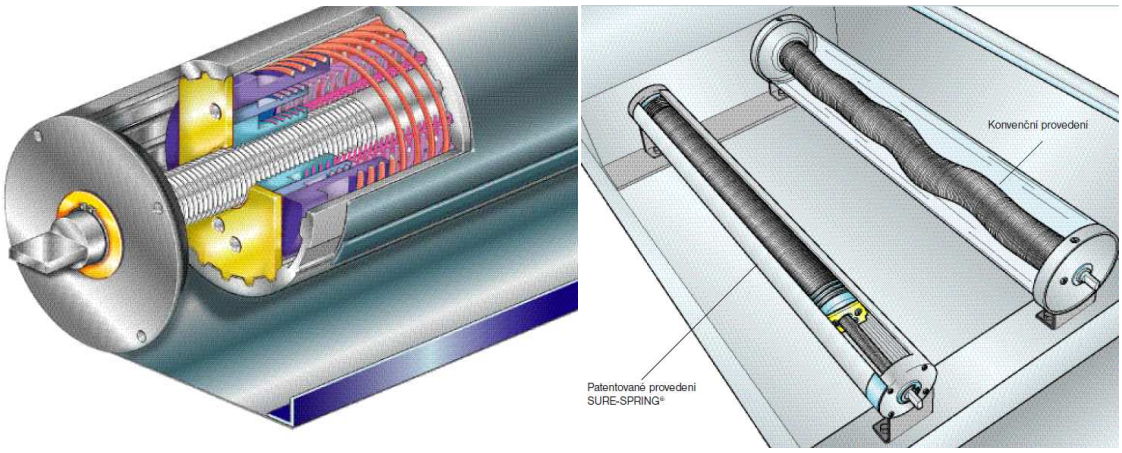


Obr. 59: Ohebný hliníkový kryt [49]

Obr. 60: Roletový kryt z tkaniny [48]

Roletový kryt SURE-SPRING

Jedná se o patentovaný systém společnosti P.E.I., kdy je pás upevněn na roletovou trubici. Tento systém nabízí oproti jiným roletovým krytům provozní rychlosti až do 150m.min^{-1}, zrychlení do 2G a záruku 2 milióny zdvihů [49].



Obr. 61: Systém SURE-SPRING firmy P.E.I. [49]

5.1.1.4 Stírací rámečky (lišty)

Obr. 62: Typy stíracích rámečků firmy Kabel schlepp [46]

Funkce krytu

Stírací lišty se používají pro stírání vodících ploch strojů, zamezují tak vniku nečistot mezi vodicí plochy stroje. Pro správnou funkci stírání je podstatná hodnota předpětí, která se určí v závislosti na materiálu a velikosti stírací lišty.

Konstrukce krytu

Stírací lišta se skládá z kovového nosného rámečku, na kterém je navulkanizován pryžový stěrač. Rámečky mohou být otevřené, nebo uzavřené a svým tvarem přesně kopírují tvar vedení stroje. Na čelní ploše rámečku jsou otvory pro připevnění k pohyblivé části stroje. Většina pryžových stěračů má omezenou odolnost proti agresivním látkám a minerálním olejům [46].

Vlastnosti krytu

- odolnost vůči otěru
- snadná vyměnitelnost
- jednoduchá montáž
- odolnost proti minerálním olejům a chladicím kapalinám
- odolnost proti mikroorganismům
- odolnost proti hydrolýze
- vynikající mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost)

Používané materiály

Dříve se používaly stírací lišty s plstěnými nebo pryžovými stěrači. V současnosti se využívají stírací lišty, které jsou konstruovány podle tvaru kluzných nebo valivých vedení. Stírací lišta se převážně vyrábí z polyuretanu a pláště z ušlechtilé oceli.

5.1.1.5 Krytování tyčových částí stroje

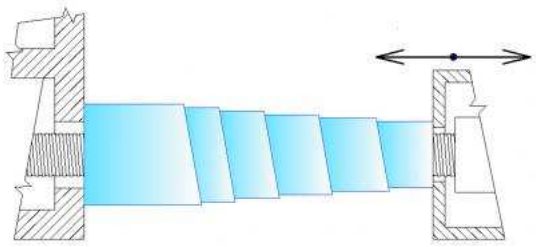
Obr. 63: Spirálový kryt [2]

Funkce krytu

K ochraně pohybových šroubů a jiných tyčovitých částí stroje jako jsou hřídele, vřetena, vodící tyče apod. se využívá spirálového krytu-pružiny. Tento kryt poskytuje trvalou ochranu vůči třískám, mechanickému poškození a působení chladicí kapaliny nebo jiných chemikálií.
Vhodná aplikace těchto krytů je pro olejové (mastné) prostředí. V suchých a prašných provozech jsou alternativou uzavřené skládací měchy [45].

Konstrukce krytu

Standardní provedení spirálového krytu je pro posuvové rychlosti do 40 $m.min^{-1}$, při použití nadstandardních úprav je možné kryty použít až do dvojnásobných rychlostí. Toto krytování je také možné použít pro stroje s paralelním uspořádáním. Pro snadnou montáž jsou na obou koncích jednoduché centrovací příruby, které umožňují volný otáčivý pohyb pružiny.

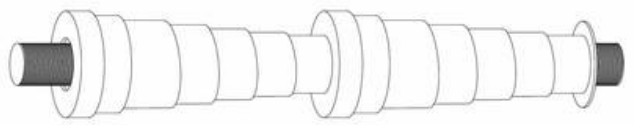


Obr. 64: Spirálový kryt [2]

Pracovní pozice:

Horizontální: Horizontálně montované pružiny jsou používány při zvlášť rovnoměrném chodu s tím, že překrytí jednotlivých závitů bude větší. Při této pozici se doporučuje pružinu orientovat tak, aby třísky odletovaly od největšího průměru pružiny k nejmenšímu průměru.

Vertikální: Při této pozici pružin lze dosáhnout podstatně větší roztažné délky než při horizontální pozici. Vertikální pružiny mají vysokou roztažnou sílu, která zajišťuje perfektní chod pružiny. U vertikální pozice se doporučuje umístit větší průměr pružiny do horní příruby [45].



Obr. 65: Vertikální kryty v sérii [5]

Vlastnosti krytu

Kryt má vysokou tepelnou odolnost. Ideální provozní podmínky jsou dosaženy občasným mazáním kluzných ploch olejem. Toto krytování se vyrábí z pásů pružinové oceli o velké tvrdosti a mezi kluzu v tloušťkách od 0,2 do 1mm a rozměrech od 15 do 230mm vnitřního průměru s různou délkou. Okraje pásů jsou zaobleny pro snadné posouvání.

Tvrdost pásů, ze kterých jsou kryty vyráběny, je mezi 55 až 58 stupni Rockwellovy stupnice a mez pevnosti je až 1800 MPa. Pro kryty trvale vystavené průtoku chladicí kapaliny se mohou použít nerezové pásy, které však nemají tak velkou pružnost, a nelze je použít pro všechny požadované rozměry [48].

Používané materiály

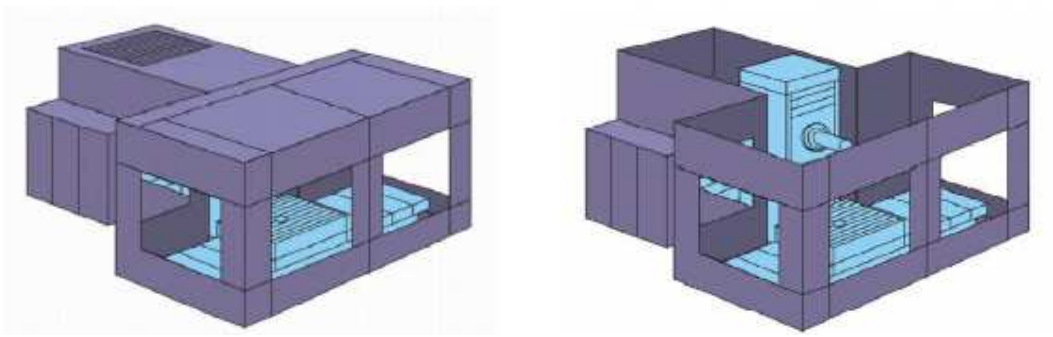
Na standardní teleskopické pružiny se používá pásová ocel, pokud je kryt pravidelně vystaven účinkům chladicí kapaliny, je vhodné použít pás z nerezové oceli. V prašném prostředí se jako alternativa používají skládané měchy.

5.1.2 Krytování statických částí strojů

5.1.2.1 Opláštění (kapotáže) strojů

Opláštění stroje má za úkol chránit člověka před úrazy, vytvořit celkový design vhodným ergonomickým řešením a v neposlední řadě pozvedá úroveň technické kvality a zpracování stroje. Opláštění zabraňuje obsluze jakkoliv zasáhnout do nebezpečného prostoru stroje, jako je například pohybující se (rotující) části, části pod napětím apod. Plné krytování maximálně

chrání obsluhu stroje před odletujícími třískami, šíření olejové mlhy a v neposlední řadě snižuje hladinu hluku. Výrobcům strojů jsou poskytnuty parametry krytování, které mají vliv na návrh pohonů. Parametry jako vibrace, síly a další veličiny se dají ověřit například pomocí Matlab Simulinku, kde se testuje chování krytu při různých rychlostech. Při malých rychlostech se testují kluzné vlastnosti, při vysokých zase správná funkce tlumení. U obrábění větších součástí, kde není možné zajistit plné krytování je možné krytování strojů bez zastřešení, tzv. snížené krytování (obr. 66).



Obr. 66: Plné a snížené krytování [45]

Kryty jsou v současnosti nejčastěji vyráběny z plastů, zejména ABS, ABS/PMMA, ABS/PC, PVC, PSH, HDPE, PP [45].

Obr. 67: Typy plastových krytů [44]

V posledních letech se stále více uplatňuje komplexní designérská řešení i v oblasti obráběcích strojů. Vhodným designem kapotáží strojů mohou výrobci dosáhnout charakteristického výrazu napomáhajícího v konkurenčním prostředí. Někteří výrobci strojů se zabývají vlastní konstrukcí i výrobou krytů a kapotáží, a mohou tak snadno ovlivňovat úroveň návrhu i provedení. Jiní objednávají kompletní řešení krytování strojů u externích firem [45].

5.1.2.2 **Dveřní a střešní kryty**

Tyto kryty jsou pohyblivé, ačkoliv se jedná o nepohyblivé krytování. Mají za úkol uzavírat pracovní prostor a zároveň umožnit přístup k upínání obrobků do sklíčidel, upínaní desky nebo ustavení obrobků na pracovní stůl. Kryty musí být konstruovány tak, aby zamezily odlétávání třísek, odstřiku chladicí kapaliny nebo v případě havárie musí zabránit odletu poškozených částí nebo obrobku ven z pracovního prostoru. U velkých strojů je potřeba pohybovat i se střešními elementy zejména kvůli přístupu jeřábů.

Dveřní kryty mohou být ovládány ručně i elektricky. U elektrického zavírání je kryt vybaven lištami citlivými na tlak, aby v případě nechtěného zavření nezpůsobil kryt zranění obsluze stroje. Podle normy je definována maximální zavírací síla (150N). Otevření a zavření elektricky ovládaného krytu je prováděno pomocí ovládacího zařízení. Někdy je stroj vybaven také optickými závorami, které nedovolí uzavření pracovního prostoru stroje v případě překážky.
Dveřní kryty jsou konstruovány z ocelových plechů s průzory z bezpečnostního skla nebo speciálního plastu (např. polykarbonátové desky) apod. Průzor krytu bývá nejslabším místem a je nutné provést bezpečnostní balistické zkoušky, které simulují případ havárie [44].

Obr. 68: Krytování pracovního prostoru stroje s rozměrnými posuvnými dveřmi [44]

Obr. 69: Portálová frézka FPT dinomax [44]

5.1.2.3 Oplocení strojů

Toto krytování neuzavírá nebezpečný prostor, ale zamezuje přístupu k nebezpečným místům. Oplocení není schopné ochránit obsluhu před nebezpečím a je nutné ho používat v kombinaci s dalšími ochrannými prvky, jako například bezpečnostní kabiny. Nejčastěji používanými materiály jsou pletivo, plech, lehké slitiny (případně kombinace) a plast. Řada firem se zabývá modulárností systémů oplocení, jejich snadnou montáží a demontáží [71].

Obr. 70: Oplocení X-guard firmy Haberkorn [71]

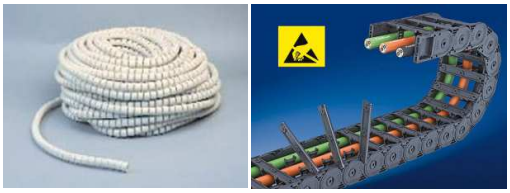
5.1.2.4 Místní ochranné zařízení

Je obdobou ke krytování oplocením. Jedná se o ochranu obsluhy u velkých obráběcích center, kde nelze zajistit krytování (oplocení) pracovního prostoru nebo by bylo velice nákladné (neekonomické). Nejčastěji bývá tvořeno bezpečnostní kabinou, která je na stroji umístěna tak, aby obsluha nevkročila do nebezpečného prostoru. Pracovní prostor je navíc chráněn dalšími prostředky, jako například elektrickými snímači, optickými závorami apod. Vstup obsluhy do pracovního prostoru je umožněn pouze v seřizovacím režimu, v ostatních případech je stroj automaticky zastaven. To je zpravidla umožněno dveřmi vybavenými blokovacím zařízením [45].

Obr. 71: Bezpečnostní kabina firmy FPT Industrie na obráběcím stroji Spirit [45]

5.1.3 Krytování kabelů

Kryty slouží k ochraně energetických kabelů, hadic, přívodů chladicí kapaliny a dalších médií pro pohyblivá i nepohyblivá zařízení. Kryty musejí být odolné vůči chladicím kapalinám a mazivům běžně užívaných na obráběcích strojích.

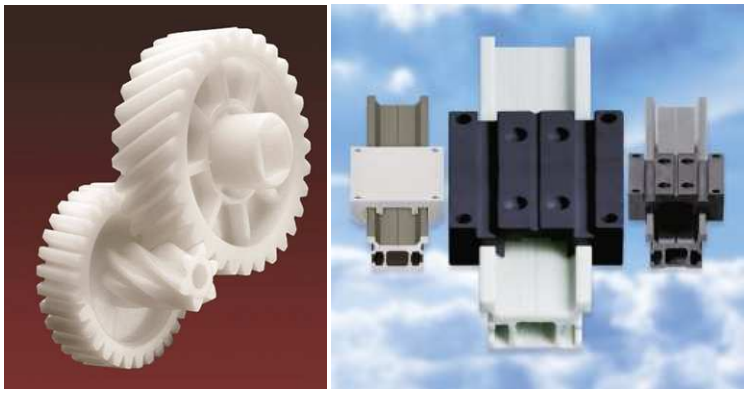


Obr. 72: Krytování kabelů [48]

5.1.4 Normalizované strojní součásti

Aplikace plastů na různé strojní součásti (ozubené převody, řemenice, řetězy a řetězová kola, ložiska, spojky, kluzná pouzdra, lineární vedení apod.) jsou již několik desetiletí testovány v praxi a nepochybně si získaly důvěru, což dokládá velké množství firem, které se specializují na vývoj a výrobu plastových strojních součástí. Své produkty si chrání pod ochrannými obchodními značkami (viz. obr.73 a 74). Rozšířila se také paleta materiálů, ze kterých se tyto součásti vyrábějí (většinou se jedná o různé modifikace PA, POM, PVC, PUR, PTFE).
Firmy dokáží vyrábět geometricky složitější součástky, s větším stupněm přesnosti, větších rozměrů, přenášející větší krouticí momenty a nebo naopak miniaturizované provedení. Nároky na větší spolehlivost, menší vibrace, hluk a jeho ostrost (označuje se zkratkou NVH – noise, vibration, harshness), samomaznost a menší výrobní náklady dávají plastům perspektivu s nemalým podílem na zvyšování konkurenceschopnosti výrobků. Plastové součástky se stávají významným inovačním prvkem přinášejícím prospěch jak zákazníkovi, tak výrobci a je na konstruktérech, jak této nabídky využijí [53].

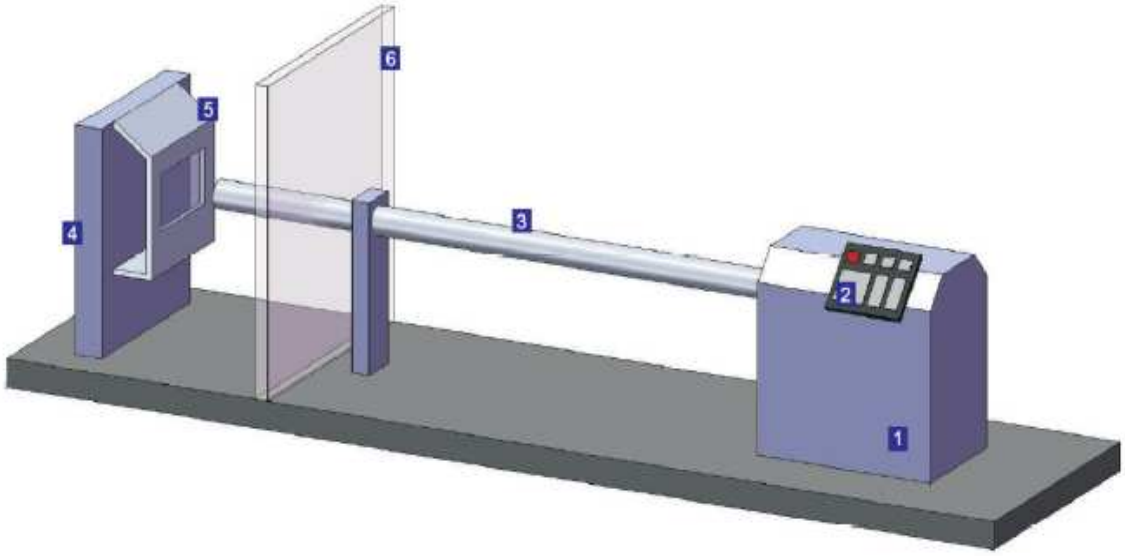
Obr. 73: Objímkové ložisko Iglidur a kulová ložiska Igubal firmy Igus [48]



Obr. 74: Ozubený plastový převod a lineární vedení drylin W [48]

6 Zkoušky ochranných krytů

Zkoušení ochranných krytů se provádí tzv. nárazovou zkouškou. Jde o simulaci případu havárie jako je vymrštění obrobku, poškozeného nástroje či jiného předmětu do ochranného krytu stroje. Zkouška je založena na principu vystřelení ocelového projektilu s danými parametry kolmo na zkoušený kryt. Kryt je na zkušebním stroji upevněn stejně, jako bude upevněn na stroji. Projektil je vystřelen do středu nejméně odolného místa, kterým zpravidla bývá průhledová část. Následuje vyhodnocení poškození krytu a vyhotovení protokolu o provedení zkoušky.
Zkušební zařízení pro zkoušení ochranných krytů je tvořeno zásobníkem stlačeného vzduchu, ovládacího panelu, hlavní a rámem pro uchycení krytu. Do hlavně se umístí válcový projektil a zkoušený kryt se umístí do rámu. Ocelový projektil vystřelí obsluha zkušebního zařízení stiskem tlačítka na ovládacím panelu. Pro vyhodnocení je třeba změřit rychlost vystřeleného projektilu, k tomu se používají bezdotykové snímače rychlosti. Ocelový projektil se používá podle typu stroje. Liší se v rozměrech, hmotnosti a mechanických vlastnostech, které předepisuje norma ČSN EN 12417+A2, ČSN EN 13128+A2 a ČSN EN 12415.



Legenda:
1 – zásobník se stlačeným vzduchem
2 – ovládací panel
3 – hlaveň
4 – rám pro uchycení krytu
5 – zkoušený kryt
6 – ochranný kryt zajišťující bezpečnost obsluhy

Obr. 75: Zkušební zařízení [25]

6.1 Postup zkoušky

Zkouška nárazem se vztahuje jak pro zkoušení krytů frézovacích strojů, tak i pro zkoušku soustružnických strojů vybavenými standardními sklíčidly. Pro výpočet je třeba určit

maximální řeznou rychlost u frézovacích strojů, respektive maximální obvodovou rychlost u soustružnických strojů (rovnice 6.1.1), teoretickou rázovou energii (rovnice 6.1.2) a měřenou rázovou energii (rovnice 6.1.3). Aby byla zkouška platná, musí být vypočtená měřená rázová energie stejná, případně vyšší, než teoretická rázová energie. Pro soustružnické stroje předepisuje norma ČSN EN 12415 třídy odolnosti s již vypočtenými hodnotami energií pro dané průměry upínacího zařízení, projektily a obvodovou rychlost.

Maximální řezná (obvodová) rychlost:

$$v_c = B \cdot \pi \cdot n \, [m \cdot s^{-1}] \tag{6.1.1}$$

B...maximální průměr nástroje (obrobku) [m]
n...maximální otáčky vřetena [s^{-1}]

Teoretická rázová energie:

$$J_c = \frac{m \cdot v_c^2}{2} \, [J] \tag{6.1.2}$$

m...hmotnost projektilu [kg]
v_c...max. řezná (obvodová) rychlost [m/s]

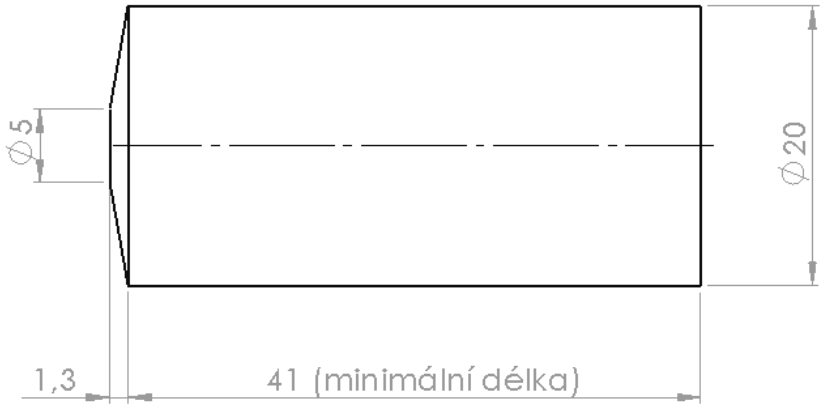
Měřená rázová energie:

$$J_m = \frac{m \cdot v_m^2}{2} \, [J] \tag{6.1.3}$$

m...hmotnost projektilu [kg]
v_m...měřená rychlost nárazu [m/s]

6.2 Projektil

Tvar, hmotnost a rozměry projektilu jsou uvedeny na obrázku (76).
Projektily jsou ocelové s pevností v tahu 560-690N/mm^2, mezí kluzu 330 N/mm^2, tažností 20% a hmotností 0,1kg. Při zkoušce pádem může být na zadní část projektilu přidáno závaží a úměrně může být snížena rychlost tak, aby nárazová energie zůstala stejná. Rychlost projektilu musí být měřena v bodě co možno nejblíže k místu nárazu.



Obr. 76: Projektil

6.3 Zkoušené materiály

Tyto materiály (tab 12) prodělaly zkoušku pro třídy odolností nárazu podle tabulky 13 (náraz projektilu na střed desky).

Materiál	Tloušťka d [mm]	Pevnost v tahu Rm [N.mm-2]	Tažnost A [%]	Třídy odolnosti nárazu								
				A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Ocelový plech	3	400	29	+	+	-	+	+	-	+	-	-
	5	305	43	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Polykarbonát	8	68	80	+	+	-	+	+	-	+	-	-
	12	68	80	+	+	+	+	+	-	+	+	-

Tab. 12: Příklady materiálů [25]

Legenda:

+ požadavky splněny

- požadavky nesplněny

Třída odolnosti	Průměr upínacího zařízení obrobku [mm] od	do	Obvodová rychlost [m/s]	Rozměry projektilu D x a [mm]	Hmotnost projektilu [kg]	Nárazová rychlost [m/s]	Nárazová energie [J]
A1		130	25	30 x 19	0,625	32	310
A2			40			50	781
A3			63			80	2000
B1	130	250	40	40 x 25	1,25	50	1562
B2			50			63	2480
B3			63			80	4000
C1	250		40	50 x 30	2,5	50	3124
C2			50			63	4960
C3			63			80	8000

Tab. 13: Třídy odolnosti [25]

6.4 Vyhodnocení zkoušky

Po vykonání zkoušky je třeba testovaný kryt prozkoumat a určit poškození. Normy ČSN EN 12415 a ČSN EN 12471+A2 uvádí typy poškození, které mohou nastat a zda kryt vyhověl, či nikoliv. Normy dále uvádějí výsledky nejpoužívanějších materiálů krytů v závislosti na tloušťce krytu a řezné (obvodové) rychlosti. Po vyhodnocení zkoušky musí být zhotoven protokol s vypočtenými hodnotami rázových energií, dále protokol musí obsahovat informace, které předepisují tyto normy [25].

6.5 Zkoušení ochranných krytů obráběcích center, frézek a vyvrtávaček [25]

Zkušební metoda je založena na strojích vybavených frézovacími nástroji, poháněnými až do maximální rychlosti rovnicí (6.1.1). Metoda může být použita pro obráběcí centra, frézky a vyvrtávačky jak s vodorovnou, tak se svislou osou vřetena.

6.5.1 **Vyhodnocení a posouzení výsledků [25]**

Poškození na zkušebním vzorku musí být posuzováno následujícím způsobem:

Poškození materiálu:

- vyboulení (trvalá deformace bez prasknutí)
- povrchové prasknutí (viditelné jen na povrchu)
- prasknutí v celé tloušťce (je vidět z jedné strany na druhou)
- průnik (projektil proniknul materiálem)

Další poškození:

- uvolnění okna z jeho připevnění
- odpadnutí vnějších částí ochranného krytu
- dveře ochranného krytu se uvolní ze svého připevnění

Zkoušce bylo vyhověno v případě, že nenastalo prasknutí v celé tloušťce nebo nedošlo k proniknutí zkoušeného předmětu a nedošlo-li k dalšímu poškození dveří ochranného krytu.

6.5.2 **Zkušební protokol [25]**

Ve zkušebním protokolu musí být uvedeny alespoň následující informace:

- datum a místo zkoušky, název zkušebny
- hmotnost, rozměry, rychlost a nárazová energie projektilu
- výrobce obráběcího centra, frézky nebo vyvrtávačky, typ obráběcího centra, frézky nebo vyvrtávačky, maximální průměr nástroje v zásobníku, kužel vřetena, výkon, maximální frekvence otáčení vřetena
- konstrukce, materiál a rozměry zkoušeného objektu
- upnutí nebo připevnění zkoušeného objektu
- směr dopadu a bod nárazu projektilu
- výsledek zkoušky

6.5.3 **Výsledky zkoušek pro zkoušené vzorky materiálů (m=0,1kg)**

Typ materiálu	Tloušťka d (mm)	Pevnost v tahu Rm (N/mm2)	Tažnost (%)	Rychlost vc (m/s)	Vydržená energie E (J)
St 12.03	1,5	369	28	80	320
	3	405	28	115	661
	1,5+3,0*	369/405	28	150	1125
	3,0+1,5*	405/369	28	140	980
AlMg3	5	242	18	120	720
Polykarbonát +	4	68	80	85	361
	6			100	500
	8			120	720
	12			150	1125
	2x6,0			170	1445
	2x12,0			230	2645
Polymetylmetakrylát	12	74	4	25	31

* na straně pracovního prostoru.

\+ výsledky zkoušek jsou pro nový materiál bez přídavku pro stárnutí.

Tab. 14: Výsledky zkoušek pro zkoušené vzorky materiálů (m=0,1kg) [25]

6.6 **Zkoušení ochranných krytů soustruhů [25]**

Zkušební metoda se vztahuje na stroje vybavené sklíčidly se standardními tvrdými nástavci a reprodukuje riziko vymrštění nástavců. Zkouška ukazuje odolnost ochranných krytů nebo materiálu ochranného krytu proti proniknutí a uvolnění.

Zkušební metoda vychází ze stroje vybaveného standardními upínacími čelistmi při největších rychlostech uvedených v normě ČSN EN ISO 1874-2. **z**kušební metody musí být těmto změněným podmínkám přizpůsobeny. Jsou-li použity čelisti z jednoho kusu, je rozhodující celková hmotnost čelisti.

7 Metodika výběru vhodného materiálu při návrhu krytování

Konstruktér při návrhu krytování problematického konstrukčního uzlu řeší otázky:
a.) Použitím jakého materiálu docílím požadovaných vlastností?
b.) Jakých vlastností docílím volbou požadovaného materiálu?

Při návrhu tedy konstruktér může řešit případ, kdy daný materiál a jeho vlastnosti dobře zná. V tomto případě vyhodnotí, jakých pozitivních vlastností jeho volbou dosáhne. Ví například, že vybraný materiál má dobré kluzné vlastnosti, je otěruvzdorný, elektricky nevodivý, odolá teplotě do 90°C, je korozivzdorný a dostatečně tuhý. Zároveň si je vědom i jeho negativ, jako např. vyšší cena, malá tvrdost, nesvařitelnost apod. Pro dané využití tyto negativní vlastnosti buď potlačí vhodným návrhem nebo jejich váhu v celkovém měřítku zanedbá. Konstrukci v tomto případě tedy podřídí materiálu.

V druhém případě konstruktér zná požadavky na materiál a pomocí vhodného nástroje vyfiltruje takové materiály, které daným požadavkům vyhovují. Zadané požadavky mohou být například takové, aby vybraný materiál pro danou aplikaci odolal teplotě minimálně 85°C při co nejmenší tepelné roztažnosti, byl chemicky stálý, byl zdravotně nezávadný, vhodný do potravinářského průmyslu, byl cenově dostupný a měl dobré kluzné vlastnosti. V tomto případě je tedy prioritní konstrukce a až následně se hledá vhodný materiál.

V obou výše uvedených případech může konstruktér dospět k použití stejného materiálu, avšak pomocí různých postupů. V jednom případě ovlivňuje pouze další (v danou chvíli ne tak potřebné) vlastnosti, zatímco v druhém případě ovlivňuje, jak moc bude vybraný materiál tyto vlastnosti splňovat a kterým vlastnostem přiřadí prioritu. Například může vybrat materiál s odolností až 200°C, ale s vyšší cenou než materiál, který odolá pouze požadovaných 90°C a bude mít o něco lepší kluzné vlastnosti.

7.1 Potenciální vhodné materiály krytů

7.1.1 Kovové materiály

Kovové materiály jsou využívány pro svou snadnou zpracovatelnost a díky svým ojedinělým fyzikálním vlastnostem (vysoká elektrická a tepelná vodivost, vysoká mechanická pevnost, tvrdost, houževnatost).

Vhodné vlastnosti z hlediska využití v konstrukci krytů oproti polymerním materiálům

- vysoká mechanická pevnost za zvýšených teplot
- levná výroba v kusové a malosériové výrobě
- snadné spojování a napojování s ostatními částmi stroje

Ovlivnitelné vlastnosti u kovových materiálů vhodné pro konstrukci krytů

- teplotní odolnost
- chemická odolnost
- korozivzdornost
- hmotnost

7.1.2 Polymery

Vhodné vlastnosti z hlediska využití v konstrukci krytů oproti kovovým materiálům

- nízká měrná hmotnost
- dobré kluzné vlastnosti (nízký součinitel tření)

- transparentnost
- odolnost proti opotřebení
- dobrá odolnost vůči anorganickým sloučeninám
- odolnost vůči korozi
- nízká tepelná vodivost - použití jako tepelný izolant
- dobré tlumící vlastnosti
- nejsou pórovité

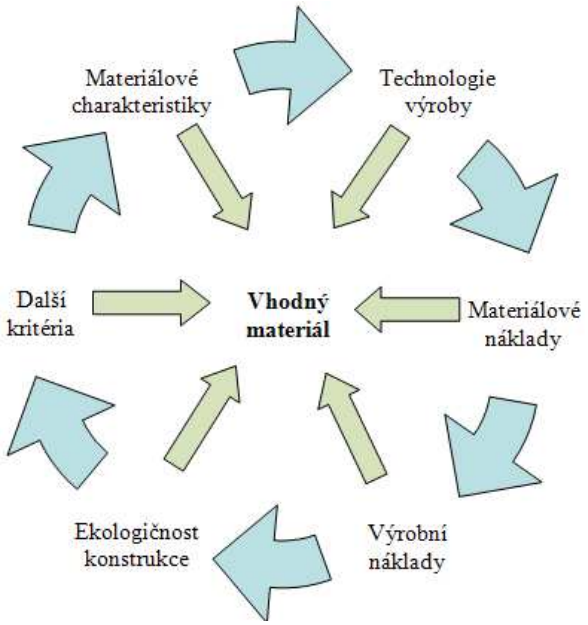
Ovlivnitelné vlastnosti u polymerních materiálů vhodné pro konstrukci krytů

- otěruvzdornost
- teplotní odolnost
- chemická odolnost
- třecí vlastnosti

7.2 Stanovení požadavků na materiál [15]

Jak tedy konstruktér obecně vybírá materiál?
Jak již bylo řečeno v úvodu práce, paleta materiálů čítá desítky tisíc různých materiálů s rozličnými vlastnostmi, které není možné tak dobře znát a každý konstruktér se kromě svých znalostí a zkušeností spoléhá na pár osvědčených materiálů, případně k výběru vhodného materiálu využívá dostupných nástrojů jako je internet, odborné poradenství, materiálové databáze, specializované firmy či specializovaný software (např. CES Edupack od firmy Granta).
Velmi často je hlavním požadavkem při volbě materiálu pevnost a tuhost. Toto kritérium splňuje celá řada materiálů. Při výběru vhodného materiálu tedy musí rozhodovat další kritéria.

Materiálové charakteristiky – patří k nim např. houževnatost, odolnost proti opotřebení, působení teploty, únavové vlastnosti, odolnost proti korozi, atd. Tyto charakteristiky jsou podmíněny využitím daného dílu (např. zatížení statické, dynamické či cyklické, za nízké či zvýšené teploty, korozní či agresivní prostředí atd.).



Obr. 77: Kritéria volby materiálu [33]

Technologie výroby – při výběru materiálu by měly být uplatněny poznatky o vlivu technologie na složení, strukturu a mechanické vlastnosti. Pokud to umožní další kritéria, měla by dostávat přednost bezodpadové technologie (prášková metalurgie, přesné lití, atd.), která maximálně využije materiál a potlačí na minimum technologie spojené s nejvyššími náklady (např. obrábění).

Materiálové a výrobní náklady – ekonomičnost se zdaleka netýká jen ceny zvoleného materiálu a technologie jeho zpracování. Neexistuje obecný návod, na jehož základě je možné se rozhodnout, zda se vyplatí nahradit stávající materiál například materiálem sice dražším, ale s vyšší životností. V konstrukci stroje, kde výměna součásti je spojena s odstávkou výroby, prostoji pro seřízení stroje apod., ušetří materiál s vyšší životností značné náklady. Je zde také nutné zahrnout náklady na dopravu, povrchovou úpravu a již zmíněnou technologii výroby.

Ekologičnost konstrukce – dopad zvoleného materiálu na životní prostředí, ať už přímý či nepřímý, má mnoho aspektů a je obtížně kvantifikovatelný.

Další kritéria – do ostatních kritérií může spadat například sortiment polotovarů, omezení dáné výrobním zařízením podniku i věrohodnost dat (např. do jaké míry zkouška definuje vlastnosti daného materiálu, jak dobře vzorek simuluje reálnou součást, prostředí a zatížení).

7.3 Klasifikace vlastností [15]

Při výběru vhodného materiálu je třeba provést specifikaci požadovaných vlastností, které se dělí na tři skupiny (deskriptivní, reaktivní a reflektivní).

- **Deskriptivní** vlastnosti popisují technický systém z vnějšku (tvar, barva, apod.).
- **Reaktivní** vlastnosti jsou takové, kterými objekt reaguje na vnější podněty. Tuto skupinu vlastností lze dále rozdělit do podtříd:

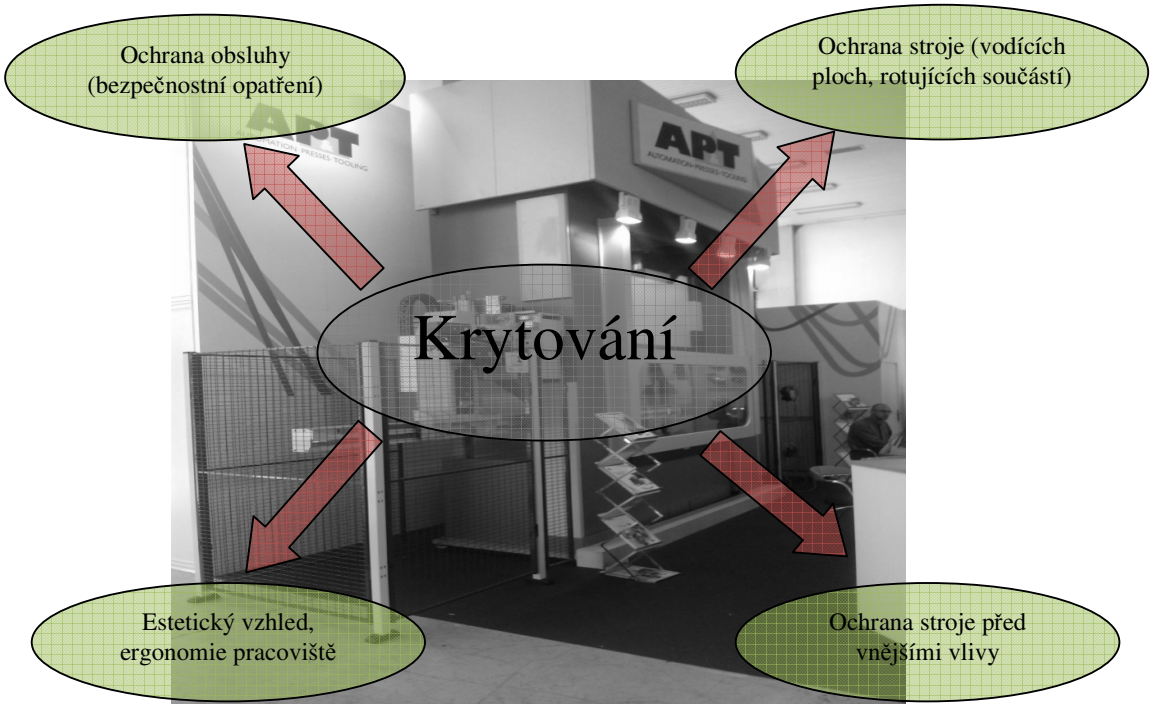
  fyzikální – lze je popsat fyzikálními veličinami a jsou měřitelné a kvantifikovatelné fyzikálními jednotkami soustavy SI

  interaktivní – vyjadřují odolnost vůči působení okolního prostředí na objekt (odolnost vůči chemicky agresivnímu prostředí, odolnost vůči korozi, apod.)

  technicko-výrobní – jsou vlastnosti týkající se využití technického systému v praxi, především vyrobitelnost a vhodnost možnosti spojení
- **Reflektivní** vlastnosti, kterými objekt působí zpět na okolí. Jsou to jeho provozní a výrobní vlastnosti (ekonomické, distribuční, legislativní, ergonomické, ekologické a likvidační vlastnosti).

7.4 Stanovení požadavků na krytování

Primárním důvodem, proč je potřeba krytování je zejména ochrana obsluhy, na které existuje celá řada bezpečnostních předpisů a opatření, které stroj, respektive kryt musí splňovat a ochrana samotného stroje, ať už před vnějšími vlivy či jako ochrana drahých vodících ploch apod. V neposlední řadě má kryt za úkol dotvářet celkový estetický dojem a ergonomii celého pracoviště. Další požadavky, které na jednotlivé typy krytů jsou, se odvíjejí od přesněji specifikovaných podmínek, např. zatížení krytu, prostředí, přímý kontakt s chladicími kapalinami, žhavými třískami, tlumení vibrací, hluku apod.



Obr. 78: Požadavky v oblasti krytování

K širšímu upřesnění požadavků na kryt slouží tzv. specifikace požadavků. V této specifikaci (tab. 15) jsou uvedeny všechny vlastnosti, které by se měly zohlednit pro zachování správné funkce krytu. Vlastnosti deskriptivní jsou uvedeny z důvodu respektování určitých požadavků na tvar a rozměry. Tabulka slouží jako prvotní náhled na návrh krytu bez ohledu na jeho konkrétní uplatnění či konkrétní materiál. Tyto požadavky by měl bezpodmínečně splňovat každý kryt. V tabulce nejsou zohledněny některé požadavky (například legislativní), které se vztahují ke konkrétní konstrukci daného krytu na stroji.

Požadované vlastnosti na krytování		
1. vlastnosti deskriptivní	**2. vlastnosti reaktivní**	**3. vlastnosti reflektivní**
tvar	***a) fyzikální vlastnosti***	***provozní vlastnosti***
rozměr	tuhost	spolehlivost a bezpečnost
materiál	pevnost	životnost
	tvrdost	snadná údržba
	houževnatost	nároky na prostor
	součinitel teplotní délkové roztažnosti	nároky na servis
	součinitel tepelné vodivosti	***výrobní vlastnosti***
	součinitelé přestupu a prostupu tepla	snadná vyrobitelnost
	třecí vlastnosti	snadná smontovatelnost
	tlumící vlastnosti	stavebnicovost a modularita
	b) interaktivní vlastnosti	dostupnost materiálu
	odolnost proti opotřebení - otěruvzdornost	dostupnost nakupovaných komponent
	odolnost proti korozi - korozivzdornost	testování

	odolnost vůči vlhkému prostředí - nasákavost	možnost simulace v CAD systémech
	odolnost vůči chemicky agresivnímu prostředí	nároky na výrobní stroje
	chemická stálost	vhodnost pro sériovou výrobu
	reaktivnost s ostatními prvky	***ekonomické vlastnosti***
	odolnost vůči cyklickému namáhání - únava materiálu	náklady na návrh a vývoj
	odolnost vůči UV záření	výrobní náklady
	odolnost vůči olejům	montážní náklady
	odolnost vůči vysokým teplotám a žáru	provozní a servisní náklady
	tvarová stálost	náklady na demontáž a likvidaci
	odolnost vůči nízkým teplotám a mrazu - mrazuvzdornost	pořizovací cena
	c) technicko-výrobní vlastnosti	jakost
	obrobitelnost	konkurenceschopnost
	tvařitelnost	***ergonomické a ekologické vlastnosti***
	svařitelnost	bezpečnost vůči člověku
	slepitelnost	vliv na životní prostředí
	vhodnost pro spojení šrouby	ergonomie
	vhodnost pro spojení čepy, kolíky, pery, klíny	***vliv na okolí***
		hluk
		distribuční vlastnosti
		vhodnost pro balení
		snadná transportovatelnost
		snadná rozebiratelnost
		snadné sestavení a ustavení
		likvidační vlastnosti
		opravitelnost
		demontovatelnost
		možnost separace
		možnost recyklace
		likvidace

Tab. 15: Specifikace vlastností

7.4.1 Stanovení konstrukčních vlastností nutných pro správnou funkci krytů pohyblivých částí strojů

typ krytu	vlastnosti krytu	vhodné použití krytu	základní funkce krytu
teleskopický	vysoká mechanická pevnost vyšší hmotnost trhavé pohyby	velké zatížení nižší posuvové rychlosti	zabránit a chránit před vnikem nečistot, chladicích kapalin, třísek, apod. minimální zástavba minimální hmotnost chránit obsluhu stroje před případnou havárií
skládací (měchy)	nízká hmotnost snadná montáž tlumení vysoká výdrž tepelného zatížení	vysoké posuvové rychlosti velká zrychlení	zabránit a chránit před vnikem nečistot, chladicích kapalin, třísek, apod. vysoká rychlost posuvu minimální zástavba minimální hmotnost chránit obsluhu stroje před

			případnou havárií
rolovací	velká pevnost	nižší posuvové rychlosti	zabránit a chránit před vnikem nečistot, chladicích kapalin, třísek, apod. vysoká rychlost posuvu minimální zástavba minimální hmotnost chránit obsluhu stroje před případnou havárií
stírací rámečky	odolnost vůči chladicím kapalinám, abrazivnímu prostředí dobré kluzné vlastnosti tvarová složitost krytu pracná konstrukce a výroba omezená odolnost proti agresivním látkám a minerálním olejům	stírání vodících ploch zamezení vniku nečistot mezi vodící plochy	zabránit a chránit před vnikem nečistot, chladicích kapalin, třísek, apod. minimální zástavba minimální hmotnost odolnost vůči agresivnímu prostředí konstrukční a výrobní jednoduchost dobré kluzné vlastnosti
spirálový	trvalá ochrana vůči třískám, poškození a působení chladicí kapaliny a chemikálií vysoká tepelná odolnost nutnost mazání kluzných ploch vysoká tvrdost vysoká mez kluz vysoká pevnost	posuvové rychlosti do 40m/min možnost použití paralelního uspořádání vhodnost použití pro olejové (mastné) prostředí	zabránit a chránit před vnikem nečistot, chladicích kapalin, třísek, apod. minimální zástavba minimální hmotnost odolnost vůči agresivnímu prostředí konstrukční a výrobní jednoduchost bez nutnosti mazání kluzných ploch

Tab. 16: Stanovení konstrukčních vlastností nutných pro správnou funkci krytů pohyblivých částí strojů

V tabulce (tab. 16) jsou vypsány typy krytů, které se používají na krytování pohyblivých částí strojů. Jsou zde uvedeny jejich hlavní vlastnosti v porovnání s ostatními typy krytů pohyblivých částí strojů. V dalším sloupci je uvedeno pro jaké aplikace se hodí daný kryt. Poslední sloupec uvádí všeobecně základní funkce krytů, které jsou hlavními požadavky na krytování pohyblivých částí strojů.

Jednotlivé kryty mohou být vyrobeny z různých materiálů, v závislosti na splnění či vylepšení některých požadavků, např. plechový teleskopický kryt je použit tam, kde je primární požadavek vysoké mechanické pevnosti (např. u velkých těžkých strojů, kde kryt musí vydržet vlastní zatížení obsluhy stroje), v jiných aplikacích, kde je např. primárním požadavkem nízká hmotnost se použije teleskopický kryt z materiálu o nižší měrné hmotnosti, avšak při zachování určité mechanické pevnosti. V závislosti na takovýchto specifických požadavcích se vybere vhodný materiál pro konkrétní použití. U některých typů krytů je navíc na výběr několik druhů provedení, různých konstrukčních patentových řešení a dalších vylepšení, pomocí kterých dochází k zlepšování či úplnému potlačování některých nežádoucích vlastností.

Požadované vlastnosti	Typy krytů vodících ploch obráběcích strojů				
	teleskopický	skládací (měchy)	rolovací	stírací rámečky	spirálový
zabránit a chránit před vnikem nečistot, chladicích kapalin, třísek, apod.	+	+	+	+	+
vysoká rychlost posuvu	-	+	-	+	+
minimální zástavbové rozměry	-	+	+	+	+
malá hmotnost	(-)	+	+	+	-
chránit obsluhu stroje před případnou havárií	+	-	-	-	+
odolnost vůči agresivnímu prostředí	(-)	+	+	+	+
konstrukční a výrobní jednoduchost	-	+	+	-	-
dobré kluzné vlastnosti	+	+	+	+	-
není potřeba mazání kluzných ploch	+	+	+	+	+

Tab. 17: Požadované vlastnosti na jednotlivé typy krytů

Tabulka (tab.17) navazuje na předchozí tabulku. Je zde opět výpis pohyblivých krytů a nejčastěji požadovaných vlastností s ohodnocením vhodnosti použití krytu pro splnění dané vlastnosti. Hodnocení je pomocí znamének plus a mínus. Znaménko plus znamená, že daný kryt je vhodný ke splnění požadované vlastnosti, znaménko mínus, že kryt není vhodný. Na splnění některých vlastností má vliv např. i jiný použitý materiál, tyto vlastnosti jsou označeny znaménkem mínus v závorce jako vlastnost, pro kterou daný kryt není vhodný, avšak lze toho dosáhnout např. použitím jiného materiálu.

materiál	kryty				
	teleskopický	skládací měchy	rolovací	stírací lišty	spirálový
plast (termo nebo reakto)	+	+	-	+	-
kompozit	-	+	-	-	-
elastomer	-	+	+	+	-
ocelový plech	+	-	+	+	+
lehké slitiny	+	-	+	+	-
umělé polymerní tkaniny	-	+	+	-	-

Tab. 18: Vhodnost použití materiálu na pohyblivé kryty

Další tabulka (tab. 18) srovnává vhodnost použití různých materiálů pro jednotlivé typy pohyblivých krytů. Hodnocení je opět pomocí znamének plus a mínus. Znaménko plus znamená, že se kryt dá vyrobit z daného materiálu pro dosažení nebo vylepšení některých

vlastností nebo požadavků. Znaménko mínus znamená, že použitím tohoto materiálu by kryt nesplňoval některé základní požadované vlastnosti či by vůbec nefungoval.

Požadované vlastnosti	vhodné materiály					
	Termoplast	Reaktoplast	Elastomer	Kompozitní	Ocel	Hliník
odolnost vůči anorganickým sloučeninám	+	+	+	+	-	-
odolnost vůči organickým sloučeninám	-	-	-	+	+	+
odolnost vůči vysokým teplotám (T>100°C)	-	-	-	-	+	+
odolnost vůči nízkým teplotám (T<0°C)	-	-	-	-	+	+
hmotnost	+	+	+	+	-	-
cena	+	+	+	-	+	+

Tab. 19: Požadované vlastnosti na jednotlivé typy materiálů

V tabulce (tab.19) je opět plus/mínus hodnocení, tentokrát různých druhů materiálů vzhledem k tomu, jak splňují požadované vlastnosti. Některých druhů materiálů však existuje široká škála a proto se nedá globálně říci, že např. všechny termoplastické materiály nesplňují odolnost vůči vysokým teplotám. Z široké palety materiálů jsou brány ty běžné, tedy cenově dostupné, klasické konstrukční materiály. Hledisko ceny vyjadřuje porovnání za kilogram daného materiálu. Klasické kovové konstrukční materiály jsou cenově velmi příznivé, plastické materiály vycházejí také cenově poměrně dostupně. Kompozitní materiály naproti tomu jsou cenově nákladnější. Požadavkem nízké hmotnosti vycházejí nejhůře kovové materiály (s hustotou 7850kg/m^3). Odolnost vůči nízkým teplotám jsou teploty, které se pohybují pod bodem mrazu. Některé materiály (se znaménkem mínus) ztrácí své mechanické vlastnosti mnohem rychleji při nízkých teplotách (kolem -20°C) nebo naopak při dlouhodobém působení zvýšených teplot (kolem 100°C). Odolností vůči agresivnímu prostředí je myšleno prostředí stroje, který je vystaven působení organických i anorganických sloučenin, zejména působení minerálních olejů, tuků, benzínu, ale i působení kyselin, zásad, par a vody. I zde platí, že ne každý (např. termoplastický) materiál odolává všem těmto látkám, ale v zásadě má větší odolnost než kovové materiály.

7.4.2 Stanovení konstrukčních vlastností nutných pro správnou funkci statických částí strojů

V následující tabulce (tab.20) jsou vypsány typy krytů, které se používají na krytování statických částí strojů. Tabulka je sestavována podobně jako v případě krytování pohyblivých částí strojů. V tabulce jsou uvedeny hlavní vlastnosti krytů statických částí strojů. V dalším sloupci je uvedeno pro jaké aplikace se hodí daný kryt. Poslední sloupec uvádí všeobecně základní funkce krytů, které jsou hlavními požadavky na krytování statických částí strojů.

Krytování kabelů je speciální kategorií krytování. Jsou na ně některé požadavky jako na pohyblivé kryty (např. ochrana kabelů před chladicími kapalinami, mazivům, ale také před pohyblivými částmi stroje). Některé typy krytů kabelů jsou pouze statické (např. žlaby), některé se musí pohybovat s jinou pohyblivou částí stroje (energetické kabely, přívody vzduchu, vody apod.). U krytování kabelů není primárním požadavkem ochrana obsluhy, ale ochrana kabelů, hadic a přívodů. Přestože se některé kryty kabelů a hadic pohybují vzhledem k jiným částem stroje, jsou vždy vůči některé části nepohyblivé. Tyto kryty jsou zařazeny mezi kryty statických částí stroje.

Jednotlivé kryty mohou být vyrobeny z různých materiálů, v závislosti na splnění či vylepšení některých požadavků, např. plechová či vyztužená kapotáž je použita tam, kde jsou vysoké nároky na ochranu obsluhy stroje (např. u velkých těžkých strojů, kde je nebezpečí havárie a např. vymrštění obrobku, či nástroje do prostoru obsluhy stroje), v jiných aplikacích, kde je např. primárním požadavkem nízká hmotnost a nehrozí nebezpečí poranění obsluhy, se použije např. kryt z materiálu o nižší měrné hmotnosti či slabší plech než je tomu u exponovaných míst stroje. U statického krytování se dbá také na celkový design a tedy kompaktnost stroje. U některých krytů je k dispozici několik druhů provedení, různých patentových řešení a dalších vylepšení, pomocí kterých dochází k zlepšování či úplnému potlačování některých nežádoucích vlastností (např. snadná a rychlá montáž/demontáž či variabilita použití v případě oplocení, atd.).

typ krytu	vlastnosti krytu	vhodné použití krytu	základní funkce krytu
Kapotáže	chránit obsluhu stroje před rotujícími částmi, částmi pod napětím, odletujícími třískami snížení hladiny hluku tlumení, snižování vibrací stroje, jednoduchá konstrukce, vysoká životnost, spolehlivost	k dotvoření celkového designu stroje (kompaktnost), krytování více uzlů najednou, není třeba zásah obsluhy do pracovního prostoru, celková ochrana obsluhy stroje	celková ochrana obsluhy stroje, zvyšují konkurenceschopnost, zabraňují zásahu do pracovního prostoru, snižují hladinu hluku, snižují vibrace,
Dveřní a střešní kryty	uzavření pracovního prostoru, umožnění přístupu k upínání, ustavení a seřízení, zamezení odlétávání třísek a odstřik chladicí kapaliny, v případě havárie zabránění odletu poškozených částí, umožnění přístupu pro jeřáby a vysokozdvižné vozíky jednoduchá konstrukce, snadná manipulace, vysoká životnost, spolehlivost	opakovaný rychlý a snadný přístup do pracovního prostoru celková ochrana obsluhy stroje,	umožňují rychlé a snadné opakované otevření/uzavření pracovního prostoru, zabraňují odletu poškozených částí, umožňují přístup jeřábu, vysokozdvižných vozíků, ochrana obsluhy stroje
Oplocení	zamezení přístupu k nebezpečným místům snadná montáž a demontáž, ochrana obsluhy stroje, modularita,	rychlé vytvoření nepřístupného prostoru, vyhrazení nebezpečného prostoru, častá přestavitelnost,	vysoká variabilita, zamezuje přístup k nebezpečným místům, vymezuje nebezpečný prostor stroje,

	jednoduchá konstrukce, snadná manipulace, vysoká životnost, spolehlivost, nízká hmotnost, variabilita		chrání obsluhu pouze v kombinaci s jiným typem krytování
Místní ochranné zařízení	vytvoření uzavřeného prostoru pro obsluhu stroje u velkých strojů, nízká hladina hluku, celková ochrana obsluhy stroje, spolehlivost, vysoká bezpečnost, jednoduchá konstrukce	celková ochrana obsluhy u velkých obráběcích center,	chrání obsluhu stroje, snižuje hladinu hluku, zamezuje přístupu do pracovního prostoru u velkých strojů
Krytování kabelů	spolehlivost, vysoká životnost, odolnost vůči agresivnímu prostředí, odolnost vůči chemikáliím, snadná údržba, jednoduchá konstrukce, variabilita	celková ochrana kabelů, hadic, přívodů médií	chrání statické i pohyblivé kabely, hadice, přívody chladicích kapalin, vzduchu, vody, apod., odolnost vůči chladicím kapalinám, mazivům, apod.,

Tab. 20: Stanovení konstrukčních vlastností nutných pro správnou funkci krytů statických částí strojů

Další tabulka (tab.21) navazuje na předchozí tabulku. Je v ní výpis statických krytů a nejčastěji požadovaných vlastností s ohodnocením vhodnosti použití krytu pro splnění dané vlastnosti. Hodnocení je stejně jako v případě pohyblivých krytů pomocí znamének plus a mínus. Jak již bylo zmíněno, kryty kabelů patří do speciální kategorie a jsou na ně jiné požadavky než ostatní typy statických krytů, proto nejsou v této tabulce uvažovány.

Požadované vlastnosti	Typy krytů			
	kapotáže	dveřní a střešní kryty	oplocení	místní ochranné zařízení
celková ochrana obsluhy stroje	+	+	-	+
nízká hladina hluku, vibrací	+	+	-	+
rychlý přístup do pracovního prostoru	-	+	+	+
nízká hmotnost	-	+	+	-
ochrana obsluhy v případě havárie stroje (utržení a vymrštění obrobku či nástroje do prostoru obsluhy stroje)	+	+	-	+
Konstrukční a výrobní jednoduchost	+	-	+	-

Tab. 21: Požadované vlastnosti na jednotlivé typy krytů

materiál	kryty				
	kapotáže	dveřní a střešní kryty	oplocení	místní ochranné zařízení	kryty kabelů
plast (termo, reakto)	+	+	+	+	+
ocelový plech	+	+	+	+	-
lehké slitiny	+	+	-	+	+
kompozit	+	-	-	+	-

Tab. 22: Vhodnost použití materiálu na nepohyblivé kryty

Další tabulka (tab 22) srovnává stejně jako v případě pohyblivého krytování vhodnost použití různých materiálových struktur pro jednotlivé typy krytů. Hodnocení je opět pomocí znamének plus a mínus. Znaménko plus znamená, že se kryt dá vyrobit z daného materiálu pro dosažení nebo vylepšení některých vlastností nebo požadavků. Znaménko mínus znamená, že použitím tohoto materiálu by kryt nesplňoval některé základní požadované vlastnosti či by vůbec nefungoval.

Všechny uvedené tabulky v této kapitole shrnují vlastnosti ze specifikace požadavků a vlastnosti již používaných krytů a materiálů, ze kterých mohou být vyrobeny. Na výběr vhodného krytu se tak dá nahlížet z pohledu vhodného materiálu, který splňuje dané požadavky pro danou aplikaci. Uživatel si tak může vybrat nejen vhodný kryt, který splňuje požadované vlastnosti, ale také materiál, který dané vlastnosti splní nejvhodněji, případně splňuje některé vlastnosti, které nejsou primárními požadavky. Protože škála materiálů je tak široká, že nelze znát vlastnosti všech materiálů, je třeba využít k výběru patřičného materiálu vhodný nástroj, kterým je již zmíněný CES EduPack či LPM Riweta (který obsahuje pouze plastické materiály). Příklad výběru vhodného materiálu pro konkrétní aplikaci na jednoúčelovém stroji je popsán v kapitole 8.

7.5 Výběr vhodného materiálu pomocí materiálových databází

7.5.1 Program LPM RIWETA Material Selector

Tato výkonná databanka technických plastů pro strojírenství a stavbu přístrojů čítá přes 150 termoplastických materiálů s více než 11000 porovnatelnými údaji. Databanka je připojena k internetu a má tak přístup k aktuálním informacím. Tento nástroj slouží k rychlému a cílenému hledání správného materiálu, je volně dostupný, avšak výběr se omezuje pouze na termoplasty.

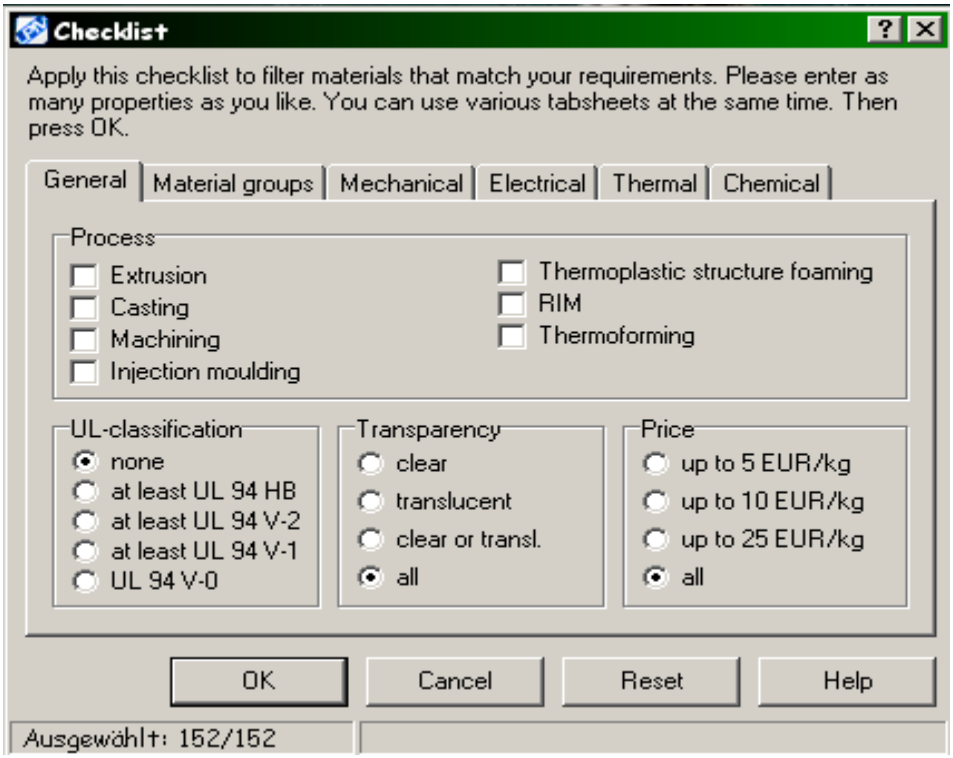
Prostředí programu

Program je buď v anglickém, nebo německém jazyce. Jevelmi intuitivní a nečiní problém se v něm rychle zorientovat.

Výběr podle kritérií

Po otevření programu se objeví tabulka se všemi materiály a jejich vlastnostmi. Pro konkrétní vytřídění vhodného materiálu slouží ikonka FILTER. Zde je několik záložek (general, material groups, mechanical, electrical, thermal a chemical). V záložce „general“ (všeobecné

vlastnosti) se dá vybrat způsob výroby termoplastického materiálu, průhlednost, stupeň nehořlavosti a cenu v eurech za kilogram. V záložce „material groups“ (materiálové skupiny) se dá protřídit materiál podle stupně krystalizace (semikrystalický, amorfní). Záložka „mechanical“ třídí materiál z hlediska mechanických vlastností, kde se dá navolit v určitém rozmezí kritéria jako je pevnost v tahu, deformace při přetržení, modul pružnosti, creep či tvrdost. Elektrické vlastnosti v záložce „electrical“ definují například dielektrické konstanty, resistivitu či elektrickou vodivost. Tepelné vlastnosti jsou v další záložce „thermal“, kde se dá protřídit materiál například podle teploty tání, krátkodobé či dlouhodobé teplotní odolnosti ať už maximálních, či minimálních teplot. Poslední záložka definuje, proti jakým chemickým sloučeninám má mít vybíraný materiál odolnost (minerální oleje, slabé a silné organické sloučeniny, alkálie, aceton, alkohol, UV-paprsky či povětrnostní podmínky).



Obr. 79: Tabulka zadání kritérií pro vytřídění vhodného materiálu

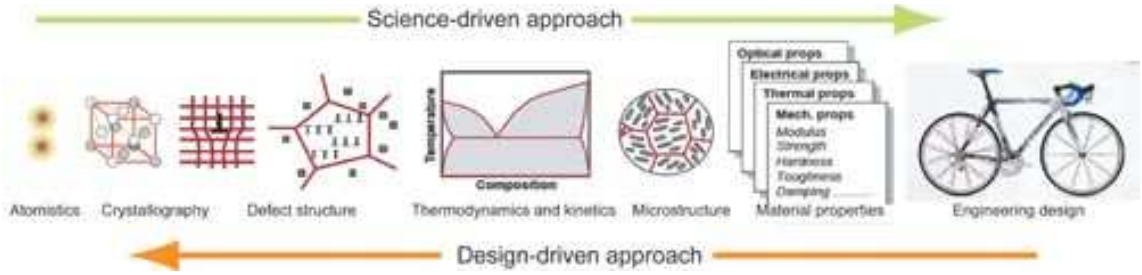
General | Mechanical 1 | Mechanical 2 | Electrical | Thermal | Chemical | Summary

Short name	Min	Ali	Aro	Petr	Acid-	Acid+	AcOr-	AcOr+	AcOx	Alkali-	Alkali+	Tri	Per	Ace	Alc	HotWt	We
PA 66/6T GF60	+	+	+	+	o	-	o	-	-	+	o	+	+	+	+	+	
LCP GF30 HT	+	+	+	+	+	o	+	o	o	o	-	+	+	+	+	+	
PTFE	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
PEEK	+	+	+	+	+	-	+	o	-	+	+	o	o	+	+	+	
PEEK GF30	+	+	+	+	+	-	+	o	-	+	+	o	o	+	+	+	
PEEK CF30	+	+	+	+	+	-	+	o	-	+	+	o	o	+	+	+	
PPA GF33	+	+	+	+	+	o	+	-	-	+	+	+		+	+	o	
PPA GF33 V0	+	+	+	+	+	o	+	-	-	+	+	+		+	+	o	
PFA	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
PPS GF40	+	+	o	+	+	o	+	+	-	+	o	+	+	+	+	+	
LCP GF30	+	+	+	+	+	o	+	o	o	o	-	+	+	+	+	+	
LCP GF30 ELS	+	+	+	+	+	o	+	o	o	o	-	+	+	+	+	+	
PA 66 GF25	+	+	+	+	o	-	o	-	-	o	-	+	+	+	+	o	
PA 66 GF35	+	+	+	+	o	-	o	-	-	o	-	+	+	+	+	o	
PA 66 GF50	+	+	+	+	o	-	o	-	-	o	-	+	+	+	+	o	
PA 66 CF20	+	+	+	+	o	-	o	-	-	+	o	+	+	+	+	o	
PA 66 GF40 LFT	+	+	+	+	o	-	o	-	-	+	o	+	+	+	+	o	
PA 66 GF25 V0	+	+	+	+	o	-	o	-	-	o	-	+	+	+	+	o	
PA 66 GF35 V0	+	+	+	+	o	-	o	-	-	o	-	+	+	+	+	o	
PA 6/6T GF50	+	+	+	+	o	-	o	-	-	+	o	+	+	+	+	o	
PES	+	+	o	o	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	+	
PES GF20	+	+	o	o	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	+	
PES GF30	+	+	o	o	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	+	
UP 4385	+	+	o	+	o	-	-	-	-	o	-	o	o	-	o	o	
PBT GF30	+	+	o	+	+	o	+	-	-	o	-	-	o	-	+	-	
PBT GF30 V0	+	+	o	+	+	o	+	-	-	o	-	-	o	-	+	-	
PBT GF50	+	+	o	+	+	o	+	-	-	o	-	-	o	-	+	-	
PA 6 GF25	+	+	+	+	o	-	o	-	-	o	-	+	+	+	+	o	

Obr. 80: Databanka materiálů v prostředí programu

7.5.2 Program Granta CES Edupack

Program CES Edupack obsahuje kolem 3900 materiálů vyráběné různými procesy. Jedná se o celosvětově uznávanou banku materiálů používaných ve strojírenství. Byl vyvinutý profesorem Mikem Ashbym a kolegy z Univerzity v Cambridgi. Program byl následně dotvořen komunitou uživatelů s více než 800 univerzit po celém světě. CES Edupack je soustředěn na komplexní informace o materiálech, a utříděn do speciálně softwarového nástroje. Poskytuje moc jak daný materiál lehce použít a vizuálně pomáhá objevovat svět materiálů a procesů výroby. Tyto počítačově založené zdroje jsou neustále doplňovány a aktualizovány. Výsledkem je jedinečný prostředek, který podporuje využití materiálů ve všech oblastech.



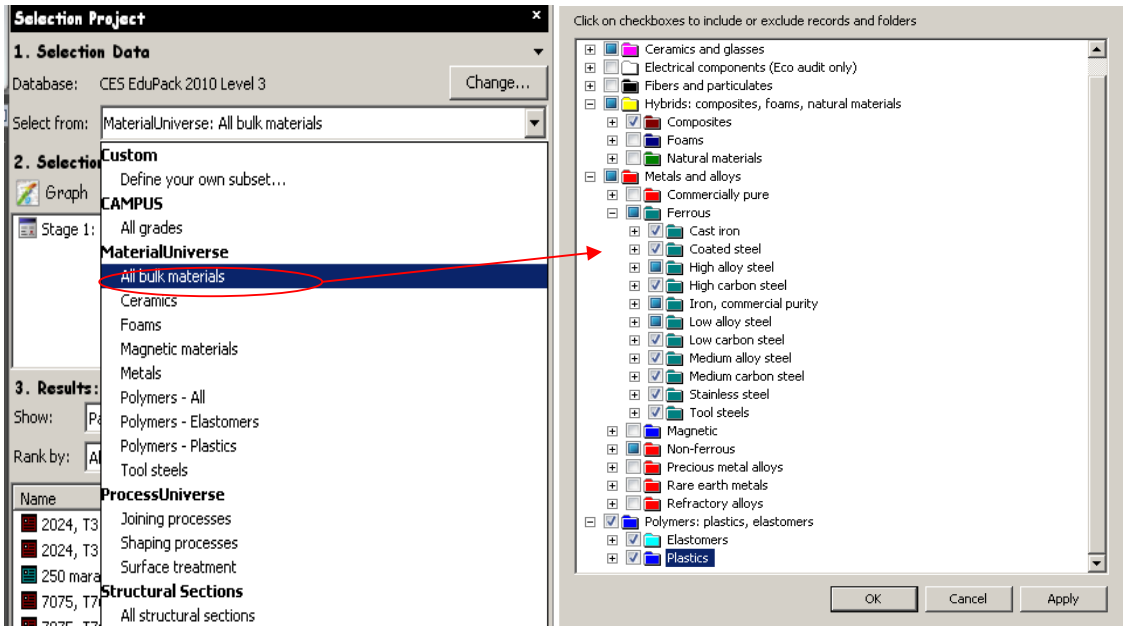
Obr. 81: Přístupy založené na vědě a návrhu [28]

Prostředí programu

Program taktéž není v českém jazyce. Obsahuje podrobné video tutoriály s komentáři, podle kterých není problém se v něm rychleji zorientovat.

Výběr podle kritérií

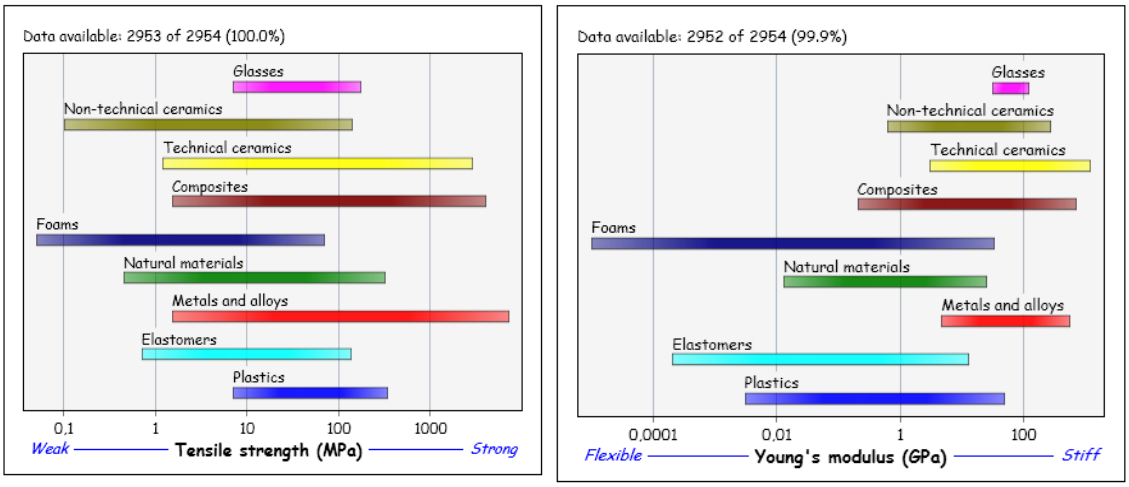
Po otevření programu si uživatel vybere, jaké materiály chce do svého výběru zařadit. Ve variantě CUSTOM lze vytřídit materiály ručně (obr.79). V dalším kroku už uživatel nadefinuje jednotlivé požadavky na materiál, které jsou rozděleny přehledně do skupin vlastností (mechanické, tepelné, elektrické, optické, všeobecné, ale i odolnostní, výrobní vlastnosti, energetické a otázky recyklace). Omezující hodnoty se zadávají buď číselně (jako pomůcka slouží graf znázorňující v jakých mezích se dané materiály pohybují), nebo odškrtávání vlastností, které od materiálu požadujeme (např. odolnosti vůči kapalinám a povětrnostním podmínkám, kde se dá vybrat různé stupně odolností (neakceptovatelná, limitní použití, akceptovatelná a výborná odolnost). Po zadání všech kritérií dojde k protřídění materiálů. Z těchto materiálů se dále mohou vytvořit grafy a jsou k dispozici celé materiálové listy se všemi vlastnostmi.



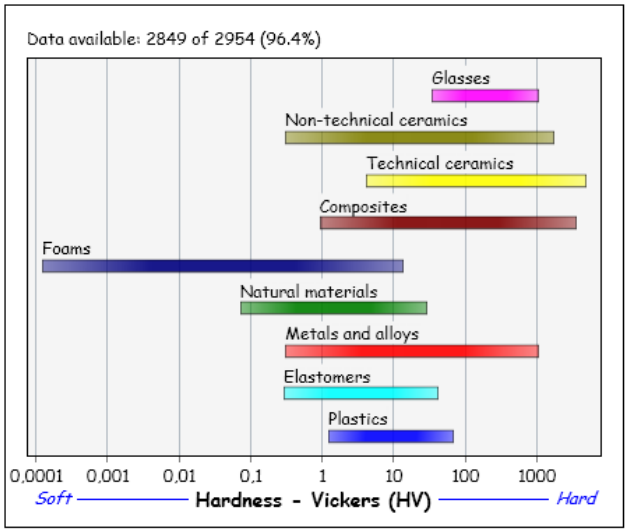
Obr. 82: Prostředí programu Granta CES Edupack 2013

7.5.3 Volba kritérií při výběru materiálu pomocí materiálové databáze

Jednou ze základních kritérií výběru materiálu je pevnost a tuhost. Prvním vodítkem při výběru je tedy vytřídění materiálu podle tohoto kritéria. Pomocí materiálové databáze CES Edupack jsem vytvořil graf pevnosti v tahu různých materiálů (graf 5). Nejvyšší pevnost dosahují kovové materiály a kompozity, avšak v širokém pásmu (cca od 10-100MPa) vyhovuje hned osm z devíti srovnávaných materiálů. Tento graf pomůže při výběru materiálu pro aplikace, kde je vyžadováno extrémních hodnot tahové pevnosti (např. 1000MPa), kde už se materiály vytřídí pouze na tři konkrétní. Pro aplikace v běžném spektru tahové pevnosti však tento graf vhodný není. Dalšími kritérii výběru materiálu je tvrdost, maximální a minimální teplota použití, hmotnost a cena.



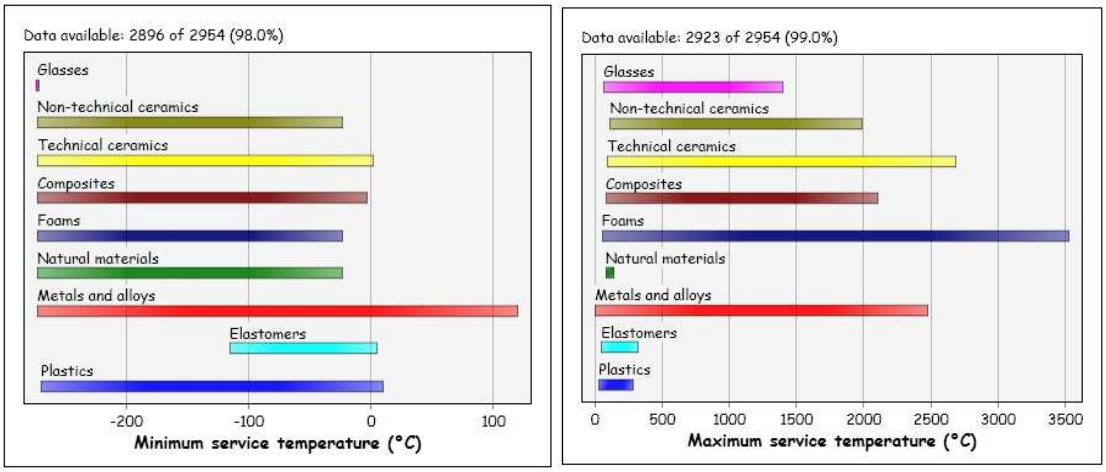
Graf 5: Porovnání pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu různých materiálů



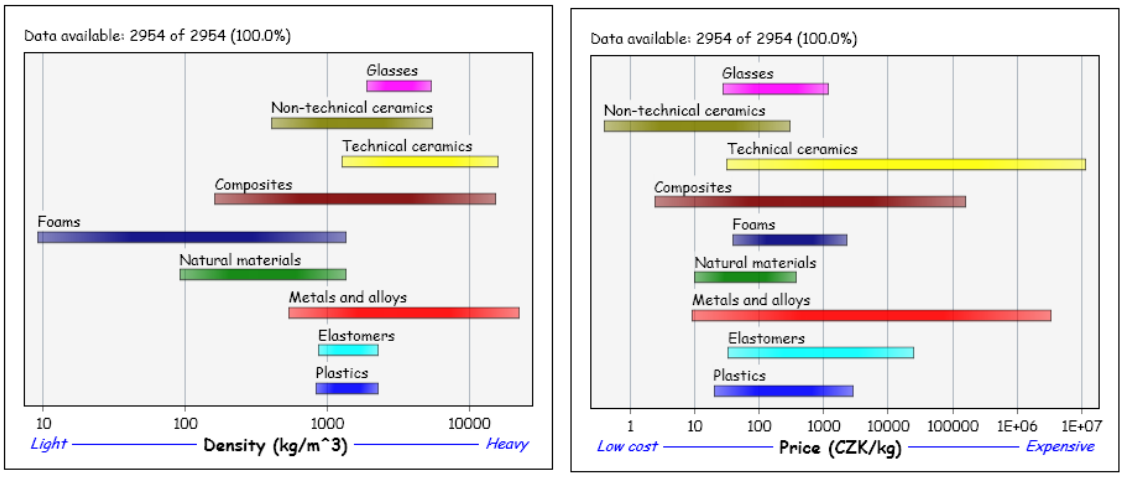
Graf 6 Porovnání tvrdosti různých materiálů

Graf 6 srovnává materiály podle Vickersovi stupnice tvrdosti. Nejvyšší tvrdosti dosahují keramické materiály (technické i netechnické) spolu s kompozity. Pěny pokrývají širší spektrum tvrdosti a zároveň jsou nejměkčí.

V grafu 7 jsou uvedeny teploty použití u různých materiálů. Zejména kovy (metal and alloys), keramické materiály (technical ceramics) a pěny (foams) pokrývají široké spektrum teplot použití, přičemž maximální teploty jsou řádově desetkrát větší než. u plastů.

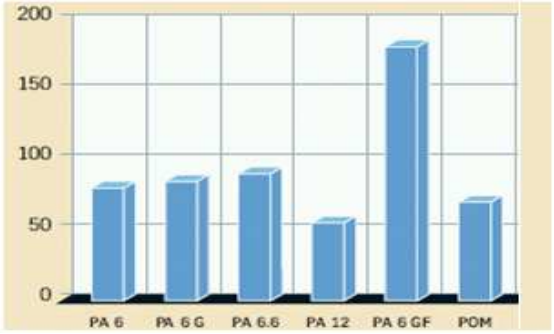


Graf 7: Porovnání maximálních a minimálních teplot použití materiálů v databázi Granta CES EDUPACK



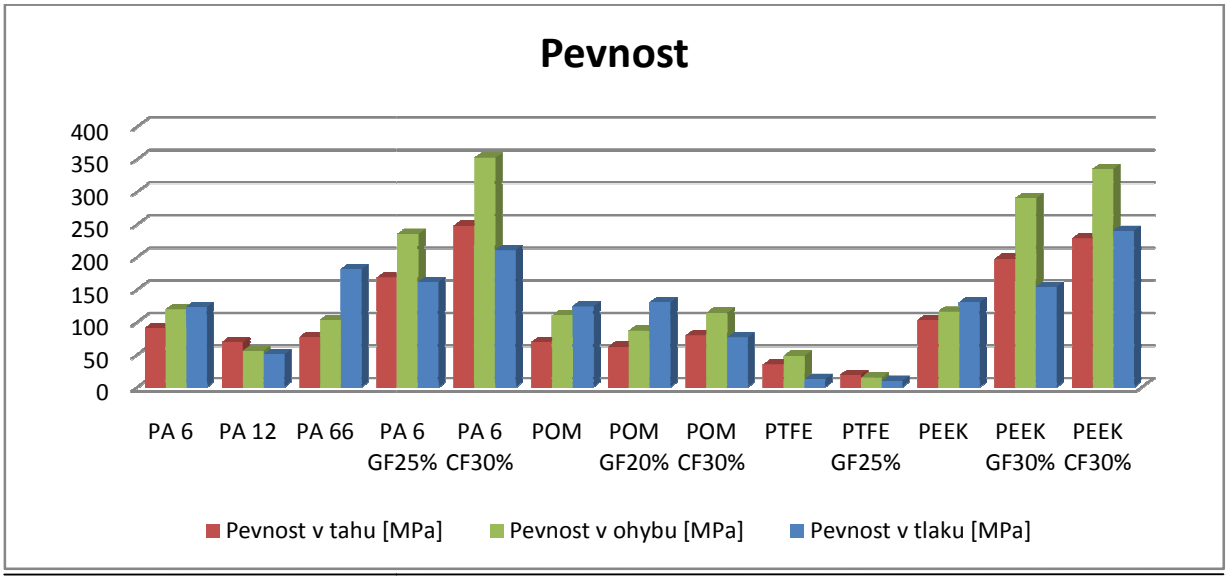
Graf 8: Porovnání hustoty a ceny jednotlivých materiálů

Podle grafu 8 se dá vytřídit materiál podle hmotnosti a ceny za kilogram. Opět platí, že se takto dají vytřídit spíše extrémní případy (např. při vysokém požadavku na hmotnost se nabízí použití sendvičových materiálů), v určitém rozmezí se však materiály překrývají ve větší míře. Rozmezí některých materiálů je dáno konkrétním typem (např. u kovů mají jinou hustotu slitiny mědi oproti uhlíkové oceli) a mnohdy záleží na konkrétním typu a složení daného materiálu.
Z důvodu velkého množství dat jsem se pro další příklady srovnávání omezil pouze na plasty.



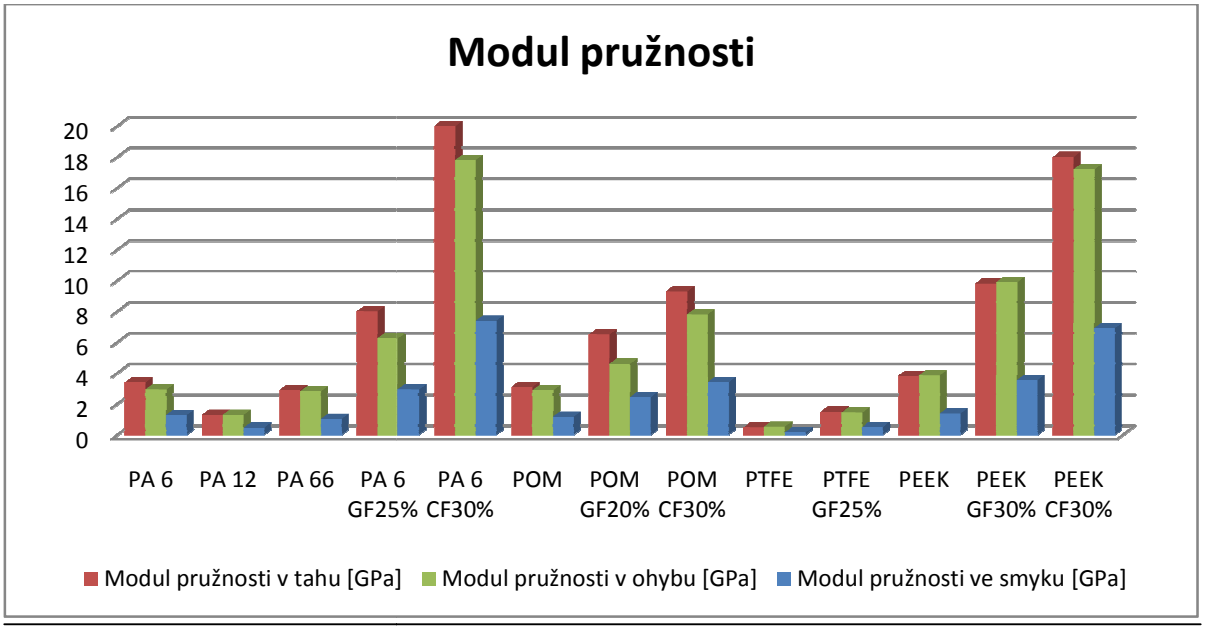
Graf 9: Porovnání pevnosti v tahu [MPa] podle ISO 527-2 [27]

Graf 9 znázorňuje porovnání pevnosti v tahu pro různé modifikace polyamidu (PA 6, PA 6.6, PA 12) a polyoxymetylénu (POM) podle normy ISO 527-2. Nejvyšší pevnosti dosahuje PA 6 GF (polyamid plněný skelnými vlákny). V závislosti na procentuálním zastoupení skelných vláken se hodnoty pevnosti dále mění (graf 10 až 12).
Na grafu 10 je porovnání pevností pro různé typy plastů. Zde dochází opět k nárůstu pevnosti vlivem plnění, ale pouze u polyamidu a polyéteréterketonu se jedná o smysluplné plnění. Polyoxymetylén s 20% skelných vláken dosahuje nepatrně vyšších hodnot pevnosti v tlaku, ale klesá pevnost v ohybu a tahu. U stejného plastu s 30% uhlíkových vláken je efekt opačný. U PTFE plněného skelnými vlákny klesá pevnost v tahu, tlaku i ohybu. Plnění skelnými či uhlíkovými vlákny za účelem zvýšení pevnosti nemá tedy u POM a PTFE smysl.

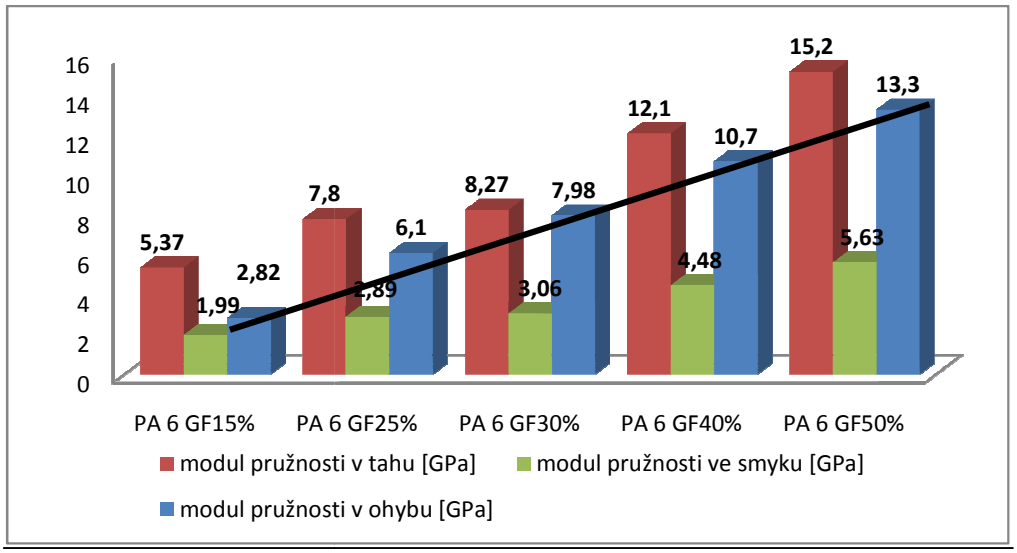


Graf 10: Porovnání pevností u různých typů plastů

Srovnání modulů pružnosti v tahu, smyku a ohybu pro různé typy plastů vykresluje graf 11. Na tomto grafu lze vidět, jakých zlepšení dosahují plněné plasty (zejména plněné uhlíkovými vlákny). Nárůst hodnot je v některých případech až sedminásobný. Pro srovnání, ocel má hodnotu modulu pružnosti v tahu zhruba 10krát vyšší než nejlépe vyhovující plast v grafu.

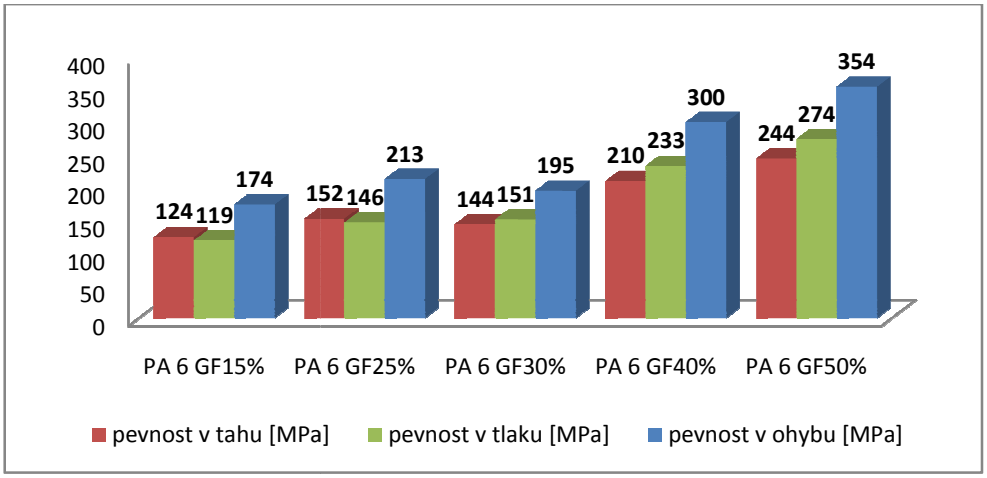


Graf 11: Porovnání modulů pružnosti u různých typů plastů



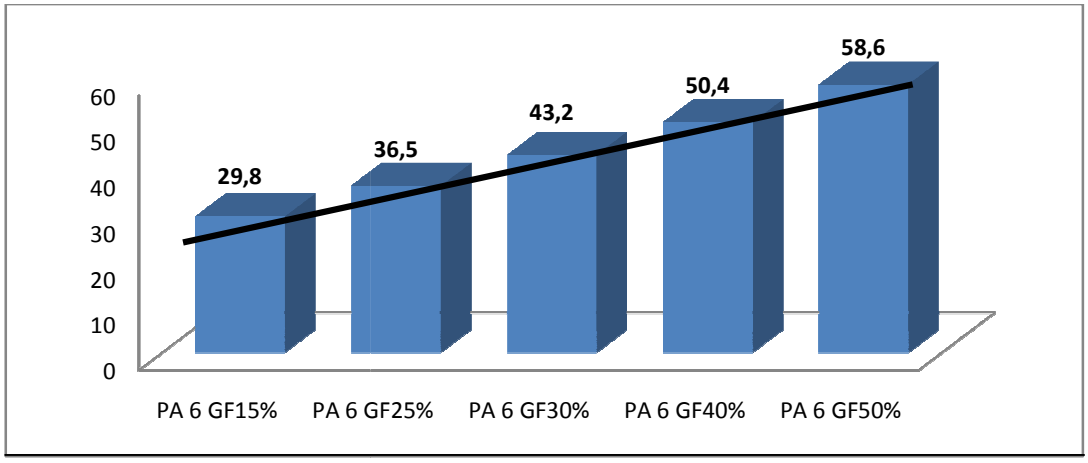
Graf 12: Porovnání modulů pružností plněných polyamidů s různým procentuálním zastoupením skelných vláken

Pevnost se mění nelineárně. Z grafu 13 je také patrné, že záleží na dalších aspektech, jako například uspořádání a velikost vláken, nikoliv jen na podílovém zastoupení vláken. To dokazuje například ta skutečnost, že polyamid z 30% skelných vláken má nižší hodnoty pevnosti v ohybu a tahu než polyamid plněný pouze z 25%.



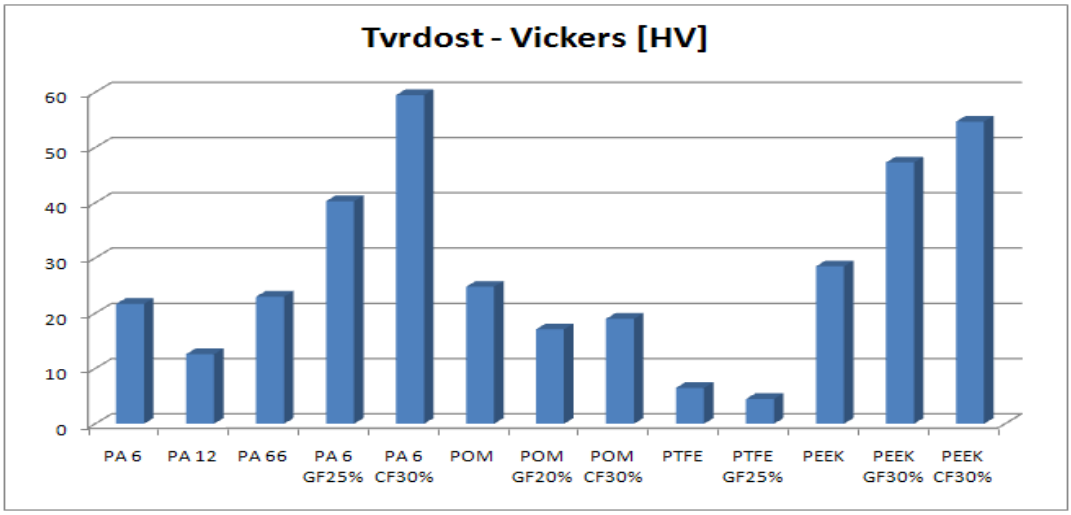
Graf 13: Porovnání pevnostních hodnot plněných polyamidů s různým procentuálním zastoupením skelných vláken

Na Grafu 14 je porovnání tvrdosti různě plněných polyamidů. Tímto grafem se dá proložit přímka, avšak procentuální zastoupení vláken nestoupá rovnoměrně a nelze tedy říci, že tvrdost má lineární charakteristiku a že se s podílem skelných vláken úměrně zvyšuje. Je však patrné, že zvyšování podílu skelných vláken má za následek nárůst tvrdosti.



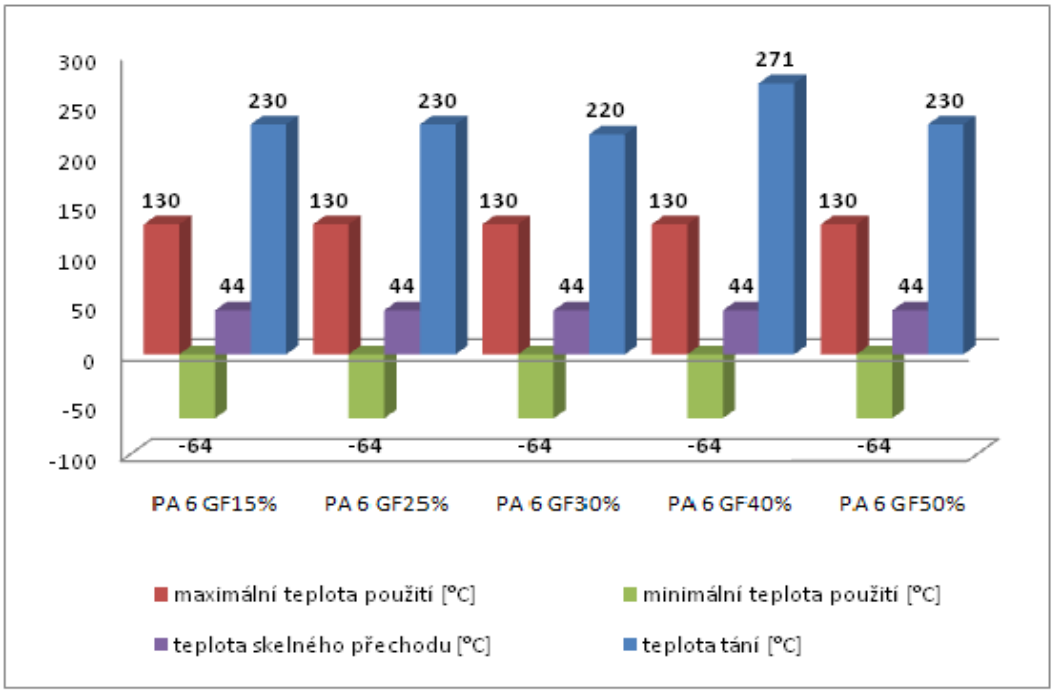
Graf 14: Porovnání tvrdostí plněných polyamidů s různým procentuálním zastoupením skelných vláken

Porovnání tvrdosti metodou podle Vickerse ukazuje Graf 15. Na něm je opět patrný nárůst vlivem procentuálního přidání vláken (vyjma POMu), zejména pak uhlíkových. U „čistých“ plastů vykazuje dobrých hodnot především PEEK a POM. U POM se přidáním vláken tvrdost naopak sníží.



Graf 15: Porovnání tvrdosti podle Vickerse u různých typů plastů

Graf 16 znázorňuje závislost teplot na různě plněném polyamidu skelnými vlákny. Z tohoto grafu je patrné, že zastoupení vláken nemá na teplotu skelného přechodu a na teplotu tání, vyjma PA 6 GF40%, téměř žádný vliv. Také minimální a maximální teplota použití zůstává neměnná. Ojedinělý rozdíl v teplotě tání lze vysvětlit podrobným materiálovým listem výrobce, který tento typ plní jinými přísadami než předchozí typy.

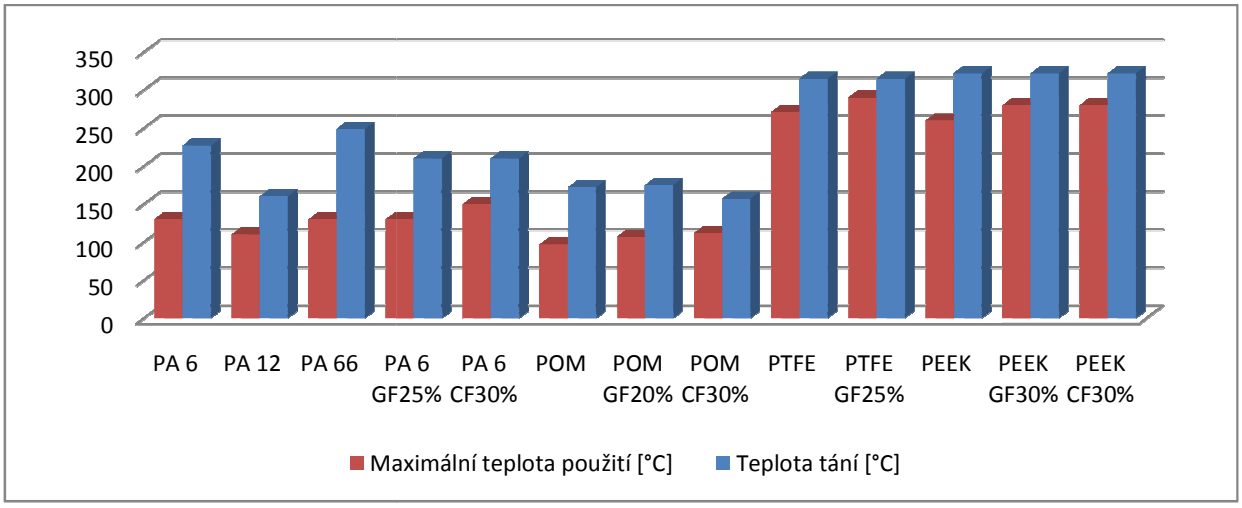


Graf 16: Porovnání teplotních charakteristik plněných polyamidů s různým procentuálním zastoupením skelných vláken

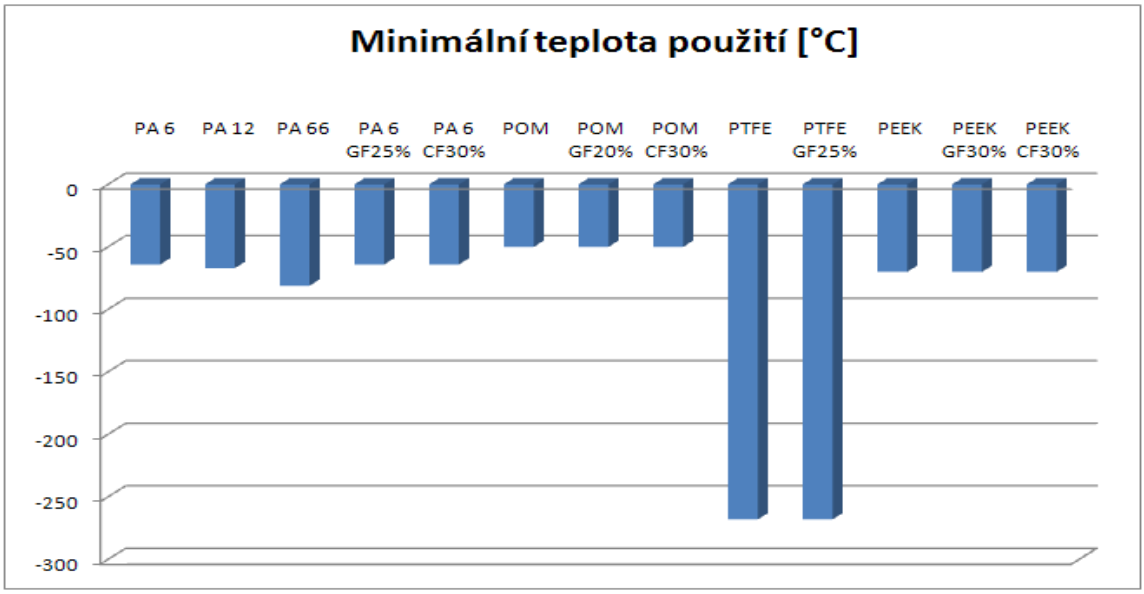
Vliv plnění je na maximální teplotu použití a na teplotu tání téměř nulový. Graf 17 toto dokazuje i na dalších typech plastů.

Výborných hodnot pro krátkodobé maximální použití dosahují zejména PTFE a PEEK. Tyto plasty se tedy využívají na tepelně ovlivněné součásti, které jsou přímo v kontaktu s tepelnými zdroji (např. olej, pára, apod.).

V případě krátkodobých minimálních teplot použití (Graf 18) vyniká pouze PTFE (až -268°C), ostatní plasty se pohybují zhruba od -50 do -80°C.



Graf 17: Porovnání maximálních teplot a teploty tání u různých typů plastů



Graf 18: Porovnání minimálních teplot u různých typů plastů

7.6 Shrnutí vlastností materiálů vhodných pro konstrukci krytů

Kovové materiály jsou vhodné zejména kvůli své snadné výrobě, zpracovatelnosti, dostupnosti, vysoké mechanické pevnosti, tvrdosti, tuhosti a žáruvzdornosti. Jejich nevýhoda je nízká korozivzdornost, nižší odolnost vůči chemickému a agresivnímu prostředí (působení povětrnostních vlivů, minerálních olejů, alkálií, kyselin, apod.). Některé vlastnosti lze zlepšit vhodnými povlaky (např. zinkování) či ochrannými nátěry.

Polymerní materiály jsou vhodné v aplikacích, kde je zapotřebí zejména nízká hmotnost, odolnost vůči agresivnímu prostředí, korozivzdornost a dobré kluzné vlastnosti. Další vlastnosti záleží na konkrétním typu materiálu, jeho chemickém složení, přísadách, apod. Lze tak cíleně dosáhnout některých vhodných vlastností pro dané použití.

Kompozitní materiály jsou vhodné pro svou nízkou hmotnost a dobré tlumení vibrací a hluku. Mají vysokou mechanickou pevnost a lze cíleně docílit některých požadovaných vlastností (např. použitím vhodných typů a orientací vláken). Nevyužívají se ve větší míře kvůli své vyšší ceně a složitější výrobě.

Keramické materiály odolávají vysokým teplotám, jsou korozivzdorné a otěruvzdorné, avšak díky své křehkosti nejsou vhodné pro konstrukci krytů.

7.7 Hodnotová analýza při nahrazení materiálu u stávajících částí strojů [3]

V současné době jsou vlastnosti jako je vysoká životnost a spolehlivost, snadná montáž, údržba a vyrobitelnost, nízké provozní a servisní náklady prakticky standardním požadavkem. V některých aplikacích je rozhodování nasazení materiálu jednoznačné, v jiných aplikacích rozhodují konkrétní vlastnosti dané typem prostředí či druhem zatížení.

Vztah mezi plněním požadovaných funkcí výrobku a výrobními náklady se při náhradě původních výrobků plastovými může měnit několika způsoby:

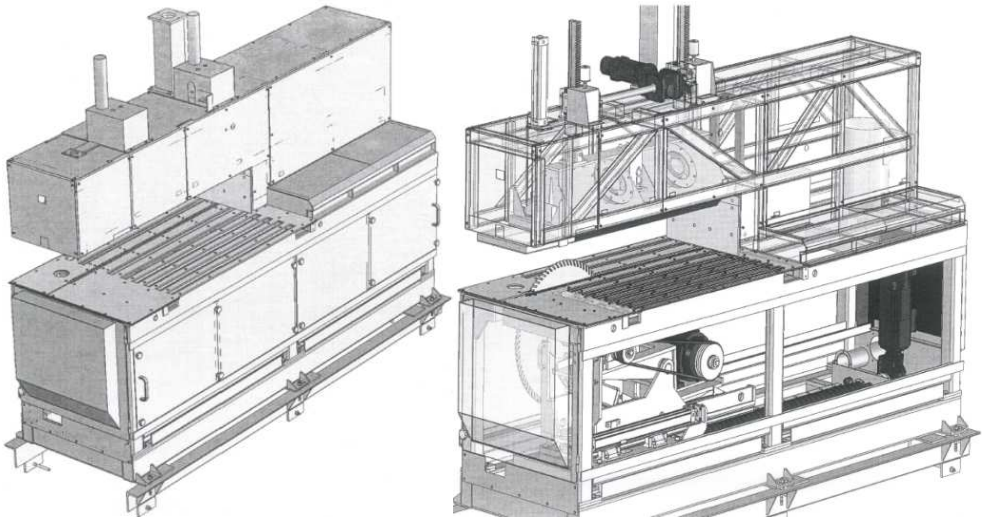
1. Zachování kvality produktu a snížení výrobních nákladů - nejčastěji při náhradě kovového produktu za plastový bez podstatné změny tvaru.
2. Snížení výrobních nákladů snížením některých funkcí nebo vlastností (kvality) - např. náhradou materiálu dojde ke snížení zbytečně vysoké kvality nebo životnosti produktu
3. Zvýšení kvality se současným zvýšením výrobních nákladů - např. náhradou za kovový materiál se zvýší výrobní náklady, ale docílí se zvýšení životnosti, sníží se potřeba údržby, oprav, atd.
4. Zvýšení kvality při současném snížení výrobních nákladů - tzv. inovace produktu, kdy dojde k větší celkové efektivnosti (lepší a levnější technologie, lepší vlastnosti, zachování funkce produktu).

8 Využití metodiky výběru materiálu při návrhu krytování u jednoúčelových strojů

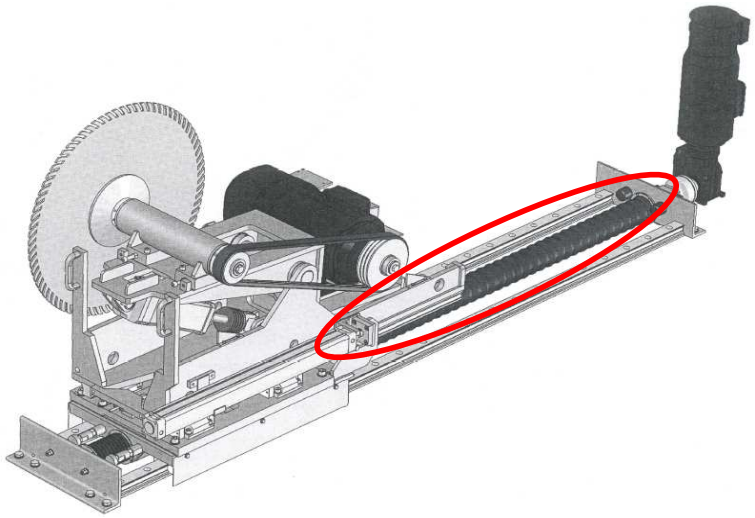
Následující kapitola popisuje konkrétní řešení části v oblasti krytování, včetně požadavků na samotný kryt a jeho materiál aplikováním metodiky výběru vhodného krytu a materiálu pro konkrétní jednoúčelový stroj či zařízení. Popsaná metodika bude využita pro výběr vhodných materiálů a rovněž pro výběr vhodných krytů pro danou aplikaci.

8.1 Příklad 1: Krytování jednoúčelového stroje na dělení materiálu

Jako první příklad poslouží jednoúčelový stroj sloužící pro třískové dělení dřevěných desek (obr. 83). Stroj je vybaven nastavitelným pilovým kotoučem ve dvou osách podle délky a tloušťky děleného materiálu. Celý mechanismus je veden lineárním vedením a poháněn elektromotorem a pohybovým šroubem. V horní části je stroj vybaven odsáváním. Řešeným uzlem je krytování pohybového ústrojí pojezdu pilového kotouče. Stroj pracuje v prostředí odletujících třísek (krátkodobá teplotní odolnost krytu je max. 80°C) z procesu obrábění. Stroj je vystaven působením slabých alkálií, případně úniku mazacích olejů na bázi minerálních olejů. Kryt by měl ochránit pohybové ústrojí před vnikem těchto látek. Ústrojí se pohybuje ve vedení o délce 1,5m rychloposuvem o max. rychlosti 0,5m/s. Navržené krytování by nemělo výrazně zvyšovat hmotnost a mělo by mít snadnou montáž, bez výrazného zásahu do stávající konstrukce stroje.



Obr. 83: Krytovaný a odkrytovaný jednoúčelový stroj



Obr. 84: Problematický konstrukční uzel vedení stroje

1. **stanovení základních požadavků na kryt:**
   - ochrana pohyblivých částí stroje před vniknutím třísek, minerálních olejů, maziv apod.
   - snadná montáž a konstrukční jednoduchost
   - chemická odolnost (minerální oleje a tuky na bázi minerálních olejů, slabé kyseliny a alkálie)
   - těsnost vůči prachu a nečistotám
   - vodotěsnost
   - rychlost posuvu max. 0,5 m/s (rychlost posuvu-středně rychlá)

Základní požadavky se dají rozdělit na požadavky na materiál a požadavky na samotný kryt (funkce, provedení).

2. **Výběr vhodných typů krytu:**
   V již dříve uvedené tabulce (tab. 17) se protřídí vhodné kryty podle stanovených požadavků na kryt. Stírací rámečky nechrání samotné vedení proti působení chladicích kapalin, olejů, apod. Spirálový kryt nevyhovuje z hlediska vyšší hmotnosti a konstrukční náročnosti. Teleskopický a skládací kryt je v principu stejný, s rozdílem v mechanické pevnosti, kde v tomto případě žádný požadavek není, můžeme teleskopický kryt také vyloučit. Daným požadavkům tedy odpovídají kryty **skládací a rolovací.**

Požadované vlastnosti	Typy krytů vodících ploch obráběcích strojů				
	teleskopický	skládací (měchy)	rolovací	stírací rámečky	spirálový
zabránit a chránit před vnikem nečistot, chladicích kapalin, třísek, apod.	+	+	+	+	+
vysoká rychlost posuvu	-	+	-	+	+
minimální zástavbové rozměry	-	+	+	+	+
malá hmotnost	(-)	+	+	+	-
chránit obsluhu stroje před případnou havárií	+	-	-	-	+
odolnost vůči agresivnímu prostředí a chemickým látkám	(-)	+	+	+	+
konstrukční a výrobní jednoduchost	-	+	+	-	-
dobré kluzné vlastnosti	+	+	+	+	-
není potřeba mazání kluzných ploch	+	+	+	+	+

Tab. 23: Požadované vlastnosti krytů

3. **Rešerše vhodných materiálů krytu:**
   Tabulka 24 (vychází z tab. 18, zúžena pouze pro vybrané kryty), uvádí, z kterých materiálů se vybrané kryty v současné době vyrábějí.

materiál	kryty	
	skládací měchy	rolovací
plast (termo, reakto)	+	-
kompozit	+	-
elastomer	+	+
ocelový plech	-	+
lehké slitiny	-	+
umělé syntetické tkaniny	+	+

Tab. 24: výběr vhodného materiálu pro vybrané kryty

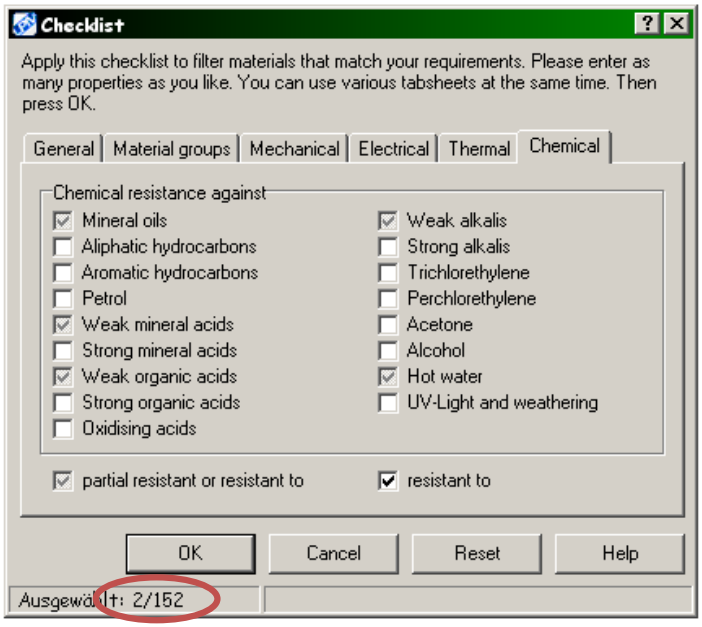
4. **Stanovení základních požadavků na materiál krytu:**

- nízká hmotnost (< 2500kg/m^3)
- krátkodobá teplotní odolnost (-10°C; +80°C)
- chemická odolnost (minerální oleje a tuky na bázi minerálních olejů, slabé kyseliny a alkálie)
- snadná likvidace/recyklace

5. Výběr vhodného materiálu krytu:

a.) podle programu Riweta Material Selector 4.1.

Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, program Riweta Material Selector je omezen pouze na výběr z termoplastických materiálů. V tomto případě nevyužijeme tabulku 19.



Obr. 85: Zadání požadavků do programu Riweta

Zadáním parametrů do programu dojde k protřídění materiálů, v tomto případě vyhovují 2 materiály zadaným požadavkům (PS a SAN). Jejich kompletní materiálové listy jsou uvedeny v příloze.

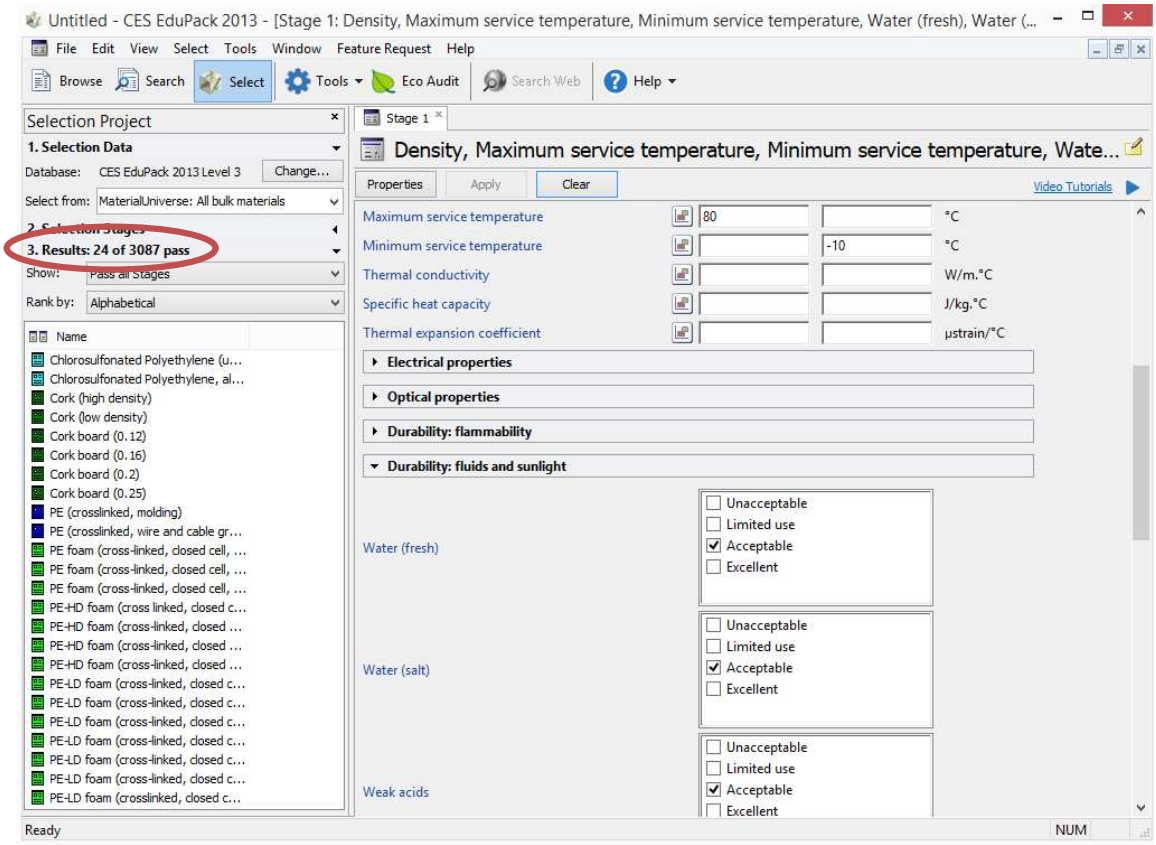
b.) podle programu Granta CES Edupack 2013

Při výběru vhodného materiálu z materiálové databáze Granta CES Edupack použijeme tabulku 19 pouze informativně. Jak již bylo zmíněno, nedá se globálně říci, že všechny termoplastické materiály nesplňují či splňují požadované vlastnosti. Při tvorbě tabulky se vycházelo z běžných cenově přijatelných konstrukčních materiálů. Je však třeba zahrnout všechny materiály, které dané vlastnosti splňují.

Požadované vlastnosti	vhodné materiály					
	Termoplast	Reaktoplast	Elastomer	Kompozitní	Ocel	Hliník
odolnost vůči anorganickým sloučeninám	+	+	-	+	-	-
odolnost vůči organickým sloučeninám	-	-	-	+	+	+
odolnost vůči vysokým teplotám (T>100°C)	-	-	-	-	+	+
odolnost vůči nízkým teplotám (T<0°C)	-	-	-	-	+	+
hmotnost	+	+	+	+	-	-
cena	+	+	+	-	+	+

Tab. 25: Požadované vlastnosti na jednotlivé typy materiálů

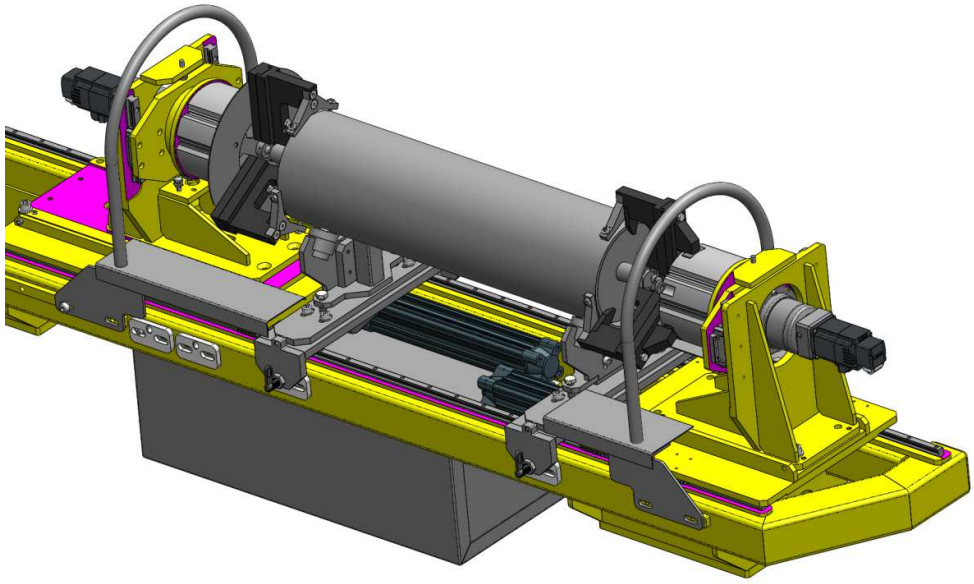
Zadáním omezujících parametrů do programu Granty dojde k protřídění materiálů, v tomto případě zadaným požadavkům vyhovuje 24 materiálů (z celkových 3087). Požadavek zadavatele byla minimální hmotnost a nízká cena. Z tohoto důvodu opět vypadla převážná část kovových materiálů a výběr se tak zúžil víceméně na polymerní materiály. Z materiálových listů vytříděných materiálů se vybere podle dalších kritérií (např. dostupnost, recyklovatelnost, energetická náročnost, snadná výroba apod.) vhodný materiál krytu.



Obr. 86: Zadání požadavků do programu Granta

8.2 Příklad 2: Jednoúčelový svařovací přípravek

Jedná se o polohovací přípravek pro automatické svařování válců pomocí svařovacího robota. Na jedné straně obsluha založí jednotlivé svařované díly (válec, hřídel, víčka) do přípravku a stisknutím dvojručního ovladače dojde k najetí pneumatických uchopovacích hlav a upnutí svařovaných dílů do požadované pozice. Poté obsluha ručně odblokuje otočný stůl a otočí jej o 180°směrem k svařovacímu robotu. Po dojetí do koncové polohy na spínač začne robot svařovat nejprve jednu stranu, přičemž se celý válec otáčí pomocí servo pohonu. Stejným způsobem se poté svařuje druhá strana válce. Řešenými uzly v tomto případě jsou kryty uchopovacích pneumatických hlav včetně pneumatických přívodních hadic a kabelových svazků před propálením z procesu svařování a celkové krytování přípravku, které odděluje prostor svařovacího robota od obsluhy s důrazem na bezpečnost, estetický dojem, nízkou hmotnost, ochrannou vůči vysokým teplotám (propálením), vniknutím nečistot a jisker z procesu svařování do prostoru obsluhy a zároveň je požadavek na pohlcení UV záření se zachováním alespoň částečné průhlednosti do prostoru procesu.



Obr. 87: Pohled na upnutí svařovaných součástí

1. **stanovení základních požadavků na kryt pneumatického uchopovače:**
   - ochrana zařízení stroje před odletujícími jiskrami a propálením z procesu svařování
   - snadná montáž (v případně výměny demontáž) a konstrukční jednoduchost
   - nízké výrobní a provozní náklady (bezúdržbový provoz)
   - tvarová a rozměrová stálost krytu v pracujícím prostředí (teplotní výkyvy)
   - rychlost otáčení pneumatických uchopovačů max. 360°/min (pomalé otáčení)

Základní požadavky jsou opět rozděleny na požadavky na materiál a požadavky na kryt.

2. **Výběr vhodných typů krytu:**
   V tabulce (tab. 21) se protřídí vhodné kryty podle stanovených požadavků. Ke stávajícím (globálním) požadavkům se doplní konkrétní požadované vlastnosti pro danou aplikaci krytu. V případě krytu pneumatického uchopovače je z hlediska konstrukční jednoduchosti výhodnější volit ze statických krytů (kapotáž, opláštění apod.), v případě ochrany kabeláže jde spíše o volbu materiálu, než o samotnou volbu krytu.

Požadované vlastnosti	Typy krytů			
	kapotáže	dveřní a střešní kryty	oplocení	místní ochranné zařízení
celková ochrana obsluhy stroje	+	+	-	+
nízká hladina hluku, vibrací	+	+	-	+
rychlý přístup do pracovního prostoru	-	+	+	+
nízká hmotnost	-	+	+	-
ochrana obsluhy v případě havárie stroje (utržení a vymrštění obrobku či	+	+	-	+

nástroje do prostoru obsluhy stroje)				
Ochrana zařízení před odletujícími jiskrami	+	+	-	+
Ochrana před propálením	+	+	-	+
Konstrukční a výrobní jednoduchost	+	-	+	-
Snadná montáž/demontáž	+	-	+	-
nízké provozní a výrobní náklady	+	-	+	-
Tvarová a rozměrová stálost krytu za vyšších teplot	-	+	+	+

Tab. 26: Požadované vlastnosti statických krytů

Z tab. 26 dle požadavků nejlépe vycházejí pouze kapotáže (respektive ochranný kryt navržený pro danou aplikaci na míru).

3. Rešerše vhodných materiálů krytů:

Tabulka 27 (vychází z tab. 22 a je zúžena pouze pro vybrané kryty z tabulky 26). Tato tabulka uvádí, z kterých materiálů se kapotáže v současné době vyrábějí.

materiál	Kryty	
	Kapotáže	kryty kabelů
plast (termo, reakto)	+	+
kompozit	+	-
elastomer	-	+
ocelový plech	+	-
lehké slitiny	+	+
umělé syntetické tkaniny	-	+

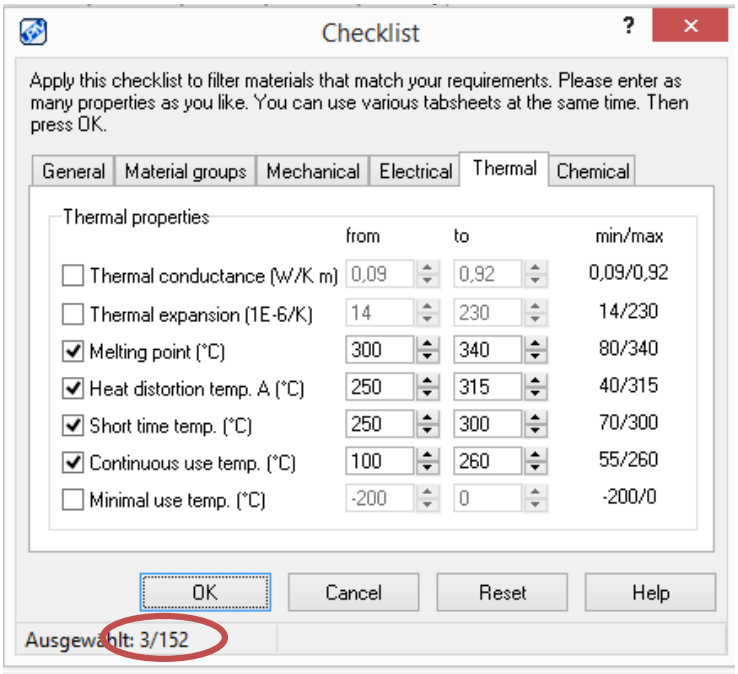
Tab. 27: výběr vhodného materiálu pro vybrané kryty

4. Stanovení základních požadavků na materiál krytů:

- krátkodobá teplotní odolnost (cca +250°C)
- vysoká odolnost proti propálení
- nehořlavost (samozhášivost)
- nízké výrobní náklady
- tvarová a rozměrová stálost v pracujícím prostředí (teplotní výkyvy)
- snadná montáž
- snadná likvidace/recyklace
- vysoká ohebnost/flexibilita (pouze pro kryt kabeláže)

5. Výběr vhodného materiálu krytu kapotáže:

a.) podle programu Riweta Material Selector 4.1.

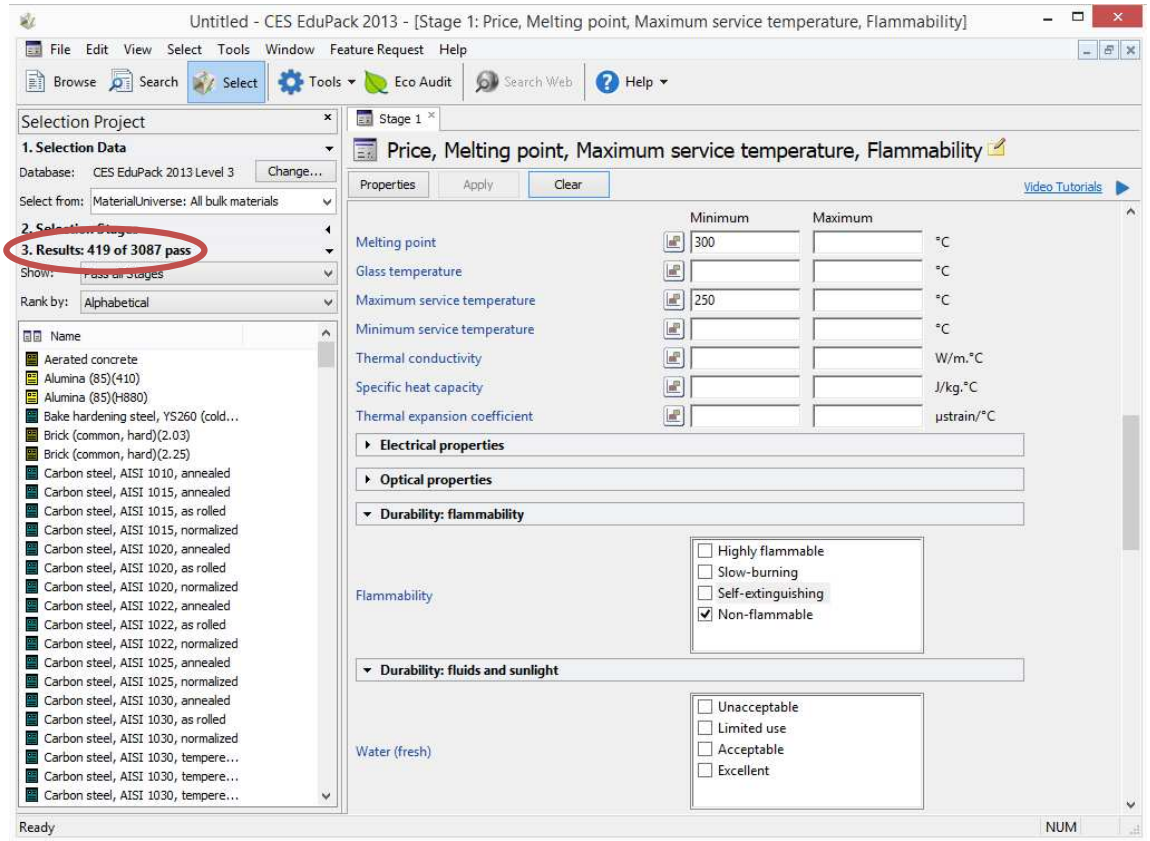


Obr. 88: Zadání požadavků do programu LPM Riweta

Zadáním parametrů dojde k protřídění materiálů, v tomto případě vyhovují 3 materiály, respektive položky. Ve dvou případech se jedná o jeden materiál, v jednom případě s přísadou zpomalovače hoření (PPA GF30 a PPA GF30 V0), třetím vyhovujícím materiálem je PA66/6T GF60. Materiálové listy těchto materiálů jsou uvedeny v příloze.

b.) podle programu Granta CES Edupack

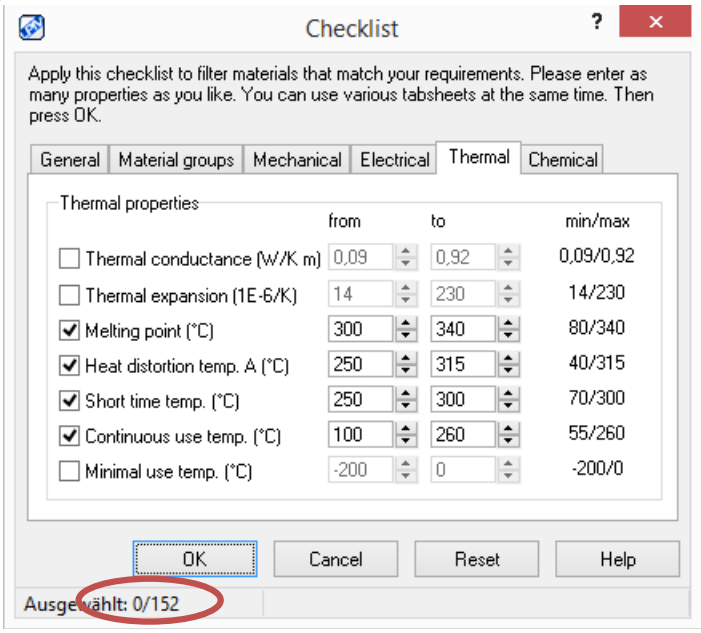
Při zadání požadavků do programu Granty se vytřídilo 419 vyhovujících materiálů. V tomto případě by bylo žádoucí vyspecifikovat další omezení (např. cena, dostupnost, či přísnější kritéria teplotní odolnosti).



Obr. 89: Zadání požadavků do programu Granta

6. Výběr vhodného materiálu krytu kabeláže:

a.) podle programu Riweta Material Selector 4.1.

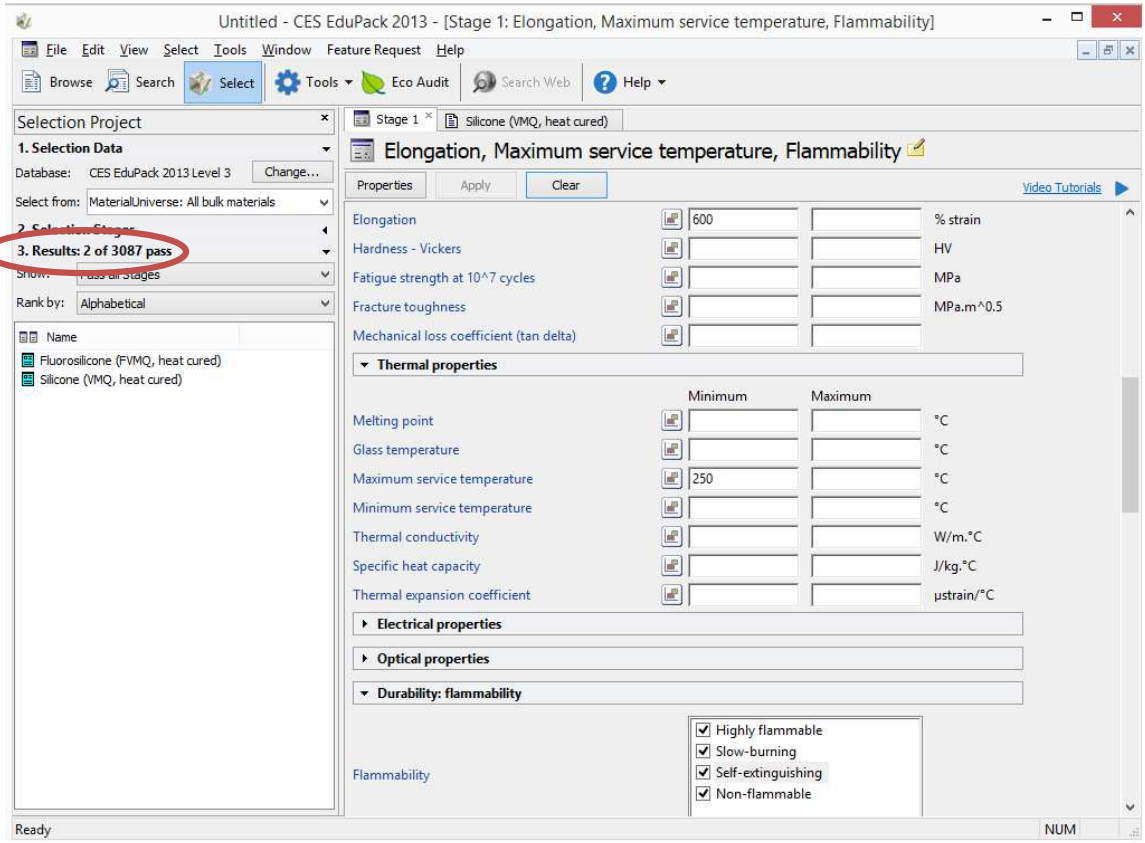


Obr. 90: Zadání požadavků do programu Riweta

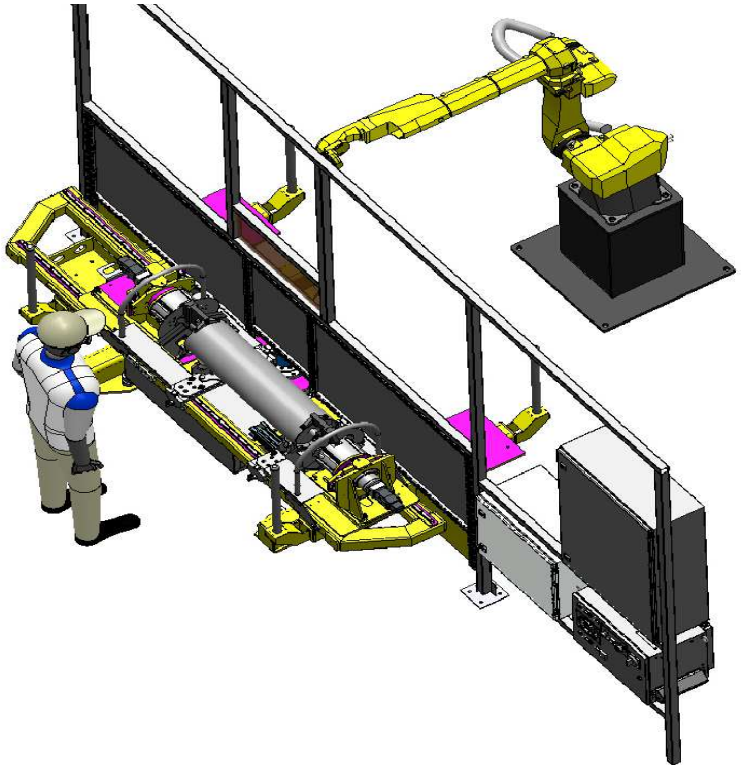
V tomto případě nevyhovují žádné (polymerní) materiály. Požadavek flexibility (ohebnosti) v kombinaci s odolností vůči vysokým teplotám a propálením byl nevyhovující pro tuto kategorii materiálů.

b.) podle programu Granta CES Edupack

Zadání požadavků flexibility (ohebnosti) do programu Granty bylo provedeno pomocí parametru poměrného prodloužení (deformace). V tomto případě vyhověly pouze dva materiály (Vinyl methyl silicone -VMQ a Trifluorpropyl vinyl methyl silicone - FVMQ). Materiálové listy jsou uvedeny v příloze této práce.



Obr. 91: Zadání požadavků do programu Granta



Obr. 92: Celkový pohled na svařovací polohovací zařízení

7. **stanovení základních požadavků na kryt oddělující operátora od pracoviště svařovacího robota:**
   - ochrana před odletujícími jiskrami a propálením z procesu svařování do prostoru obsluhy
   - snadná montáž a konstrukční jednoduchost
   - nízké výrobní a provozní náklady (bezúdržbový provoz)
   - tvarová a rozměrová stálost krytu v pracujícím prostředí (teplotní výkyvy)
   - estetický dojem
   - nízká hmotnost
   - pohlcení UV záření se zachováním alespoň částečné průhlednosti do prostoru procesu.

Základní požadavky jsou opět rozděleny na požadavky na materiál a požadavky na kryt.

8. **Výběr vhodných typů krytu:**
   V tabulce (tab. 28) se protřídí vhodné kryty podle stanovených požadavků. Ke stávajícím (globálním) požadavkům se doplní konkrétní požadované vlastnosti v této aplikaci.

Požadované vlastnosti	Typy krytů			
	kapotáže	dveřní a střešní kryty	oplocení	místní ochranné zařízení
celková ochrana obsluhy stroje	+	+	-	+
nízká hladina hluku, vibrací	+	+	-	+
rychlý přístup do pracovního prostoru	-	+	+	+
nízká hmotnost	-	+	+	-
ochrana obsluhy v případě havárie stroje (utržení a vymrštění obrobku či nástroje do prostoru obsluhy stroje)	+	+	-	+
Ochrana obsluhy před odletujícími jiskrami	+	+	-	+
Ochrana před propálením	+	+	-	+
Snadná montáž/demontáž	+	-	+	-
nízké provozní a výrobní náklady	+	-	+	-
Tvarová a rozměrová stálost krytu za vyšších teplot	+	+	+	+
Estetický dojem	+	+	-	+

Tab. 28: Požadované vlastnosti statických krytů

Z tab. 28 dle požadavků vycházejí vyjma oplocení všechny typy statických krytů.

9. Rešerše vhodných materiálů krytu:

Tabulka 29 (vychází z tab. 22 a je zúžena pouze pro vybrané kryty z tabulky 28). Tato tabulka uvádí, z kterých materiálů se dané kryty v současné době vyrábějí.

materiál	kryty		
	kapotáže	dveřní a střešní kryty	místní ochranné zařízení
plast (termo, reakto)	+	+	+
ocelový plech	+	+	+
lehké slitiny	+	+	+
kompozit	+	-	+

Tab. 29: výběr vhodného materiálu pro vybrané kryty

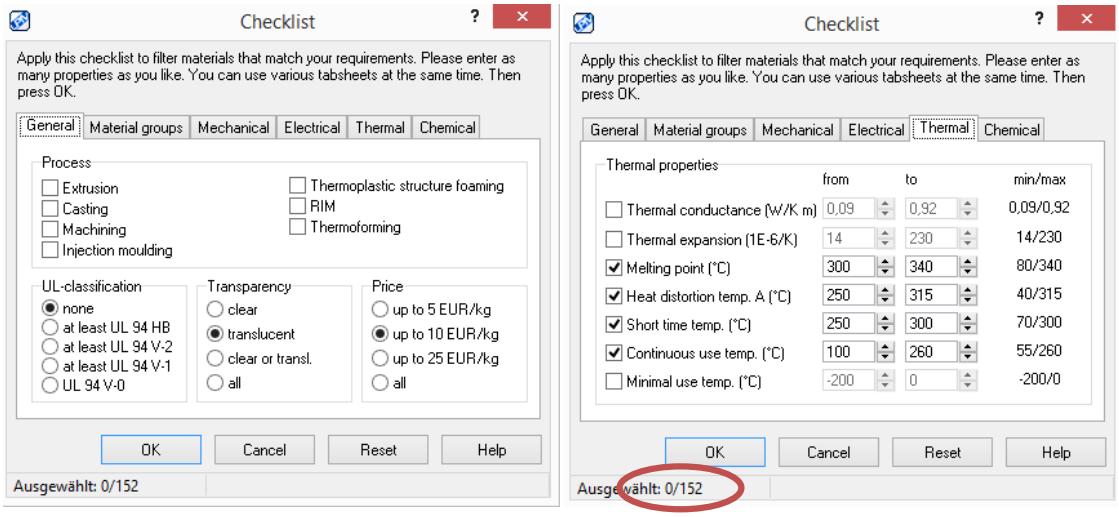
10. Stanovení základních požadavků na materiál krytu:

- krátkodobá teplotní odolnost (+250°C)
- vysoká odolnost proti propálení
- nehořlavost
- nízké výrobní náklady
- tvarová a rozměrová stálost v pracujícím prostředí (teplotní výkyvy)

- snadná montáž
- snadná likvidace/recyklace
- pohlcení UV záření
- transparentnost
- nízká hmotnost (< 2500kg/m^3)
- snadná likvidace/recyklace

11. Výběr vhodného materiálu krytu:

a.) podle programu Riweta Material Selector 4.1.

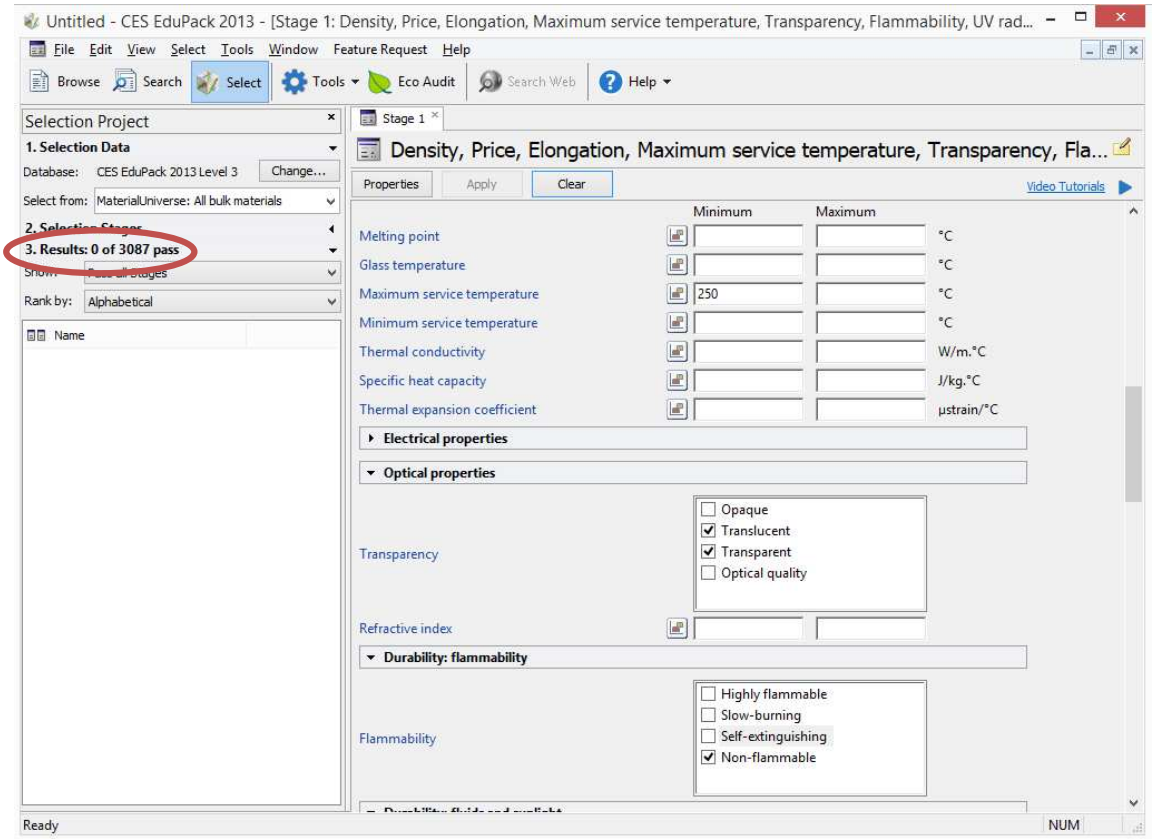


Obr. 93: Zadání parametrů do programu Riweta

V tomto případě nevyhovují žádné (polymerní) materiály. Požadavek transparentnosti v kombinaci s odolností vůči vysokým teplotám a propálením byl nevyhovující pro tuto kategorii materiálů.

b.) podle programu Granta CES Edupack

Při zahrnutí všech materiálových skupin v programu Granta nevyhověl daným požadavkům také žádný materiál.



Obr. 94: Zadání parametrů do programu Granta

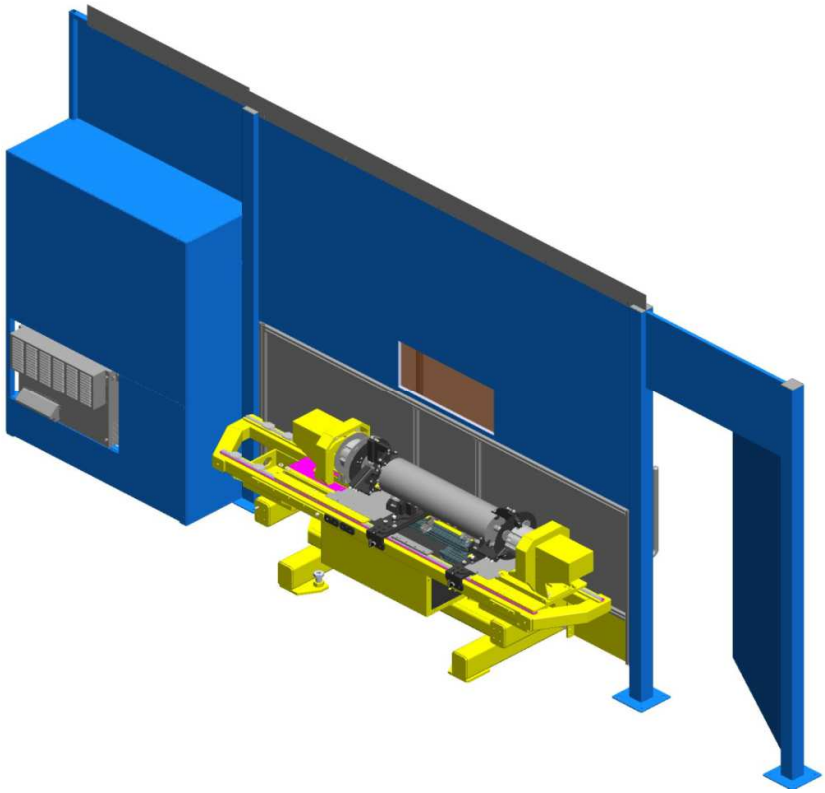
8.3 Zhodnocení a závěr

Metodika volby vhodných typů krytů a jejich materiálů byla aplikována na reálných příkladech z konstrukční praxe. Pomocí metodiky se u většiny případů podařilo dojít k vytipování vhodného krytu a jeho materiálu. Objevil se ale i případ, kdy tato metodika nenašla řešení (požadavky na materiál byly v tomto případě oddělení pracoviště obsluhy a robota, odolnost vůči vysokým teplotám, nízké výrobní náklady, transparentnost, pohlcení UV záření z procesu svařování a jednoduchá montáž).

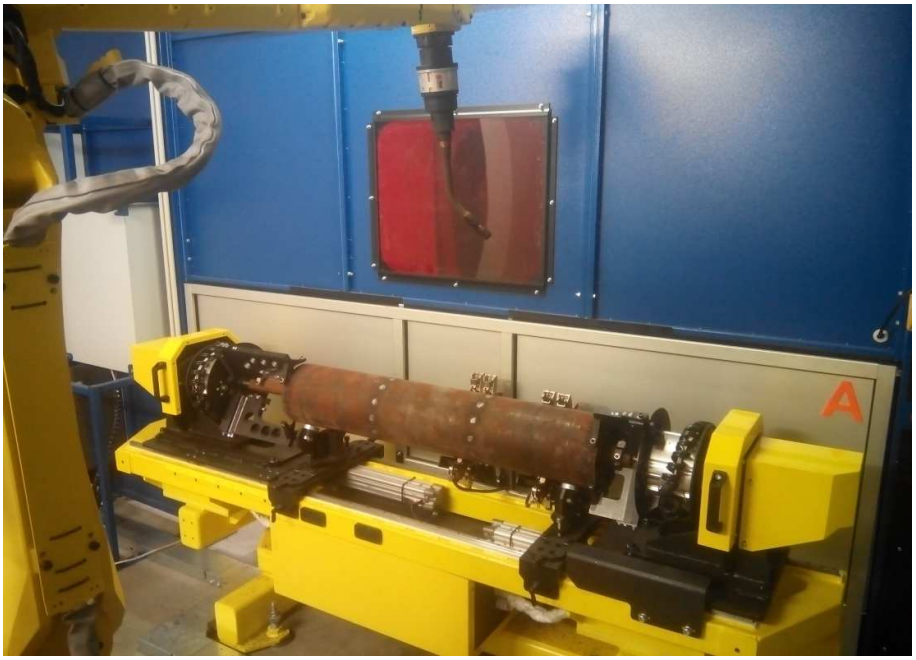
Na základě aplikace výše uvedené metodiky se potvrdilo, že neexistuje univerzální postup nebo tabulka, která by dala konstruktérovi přesný návod, jak danou problematiku vyřešit. Na konstruktérovi tak zůstává otázka, jak se s takovýmto problémem vypořádat a jak vhodnou konstrukcí poupravit (zmírnit) požadavky. U výše zmiňovaného neúspěšného případu se s touto otázkou konstruktér vypořádal kombinací dvou materiálů, díky čemuž se podařilo uspokojit všechny uvedené požadavky. Konkrétně byl kryt navržen z levného ocelového plechu, který splňoval jak požadavky bezpečného oddělení pracoviště robota a obsluhy, tak i ochranu vůči vysokým teplotám a nízké výrobní náklady spolu s jednoduchou montáží. Kryt byl následně doplněn transparentním průhledem z cenově vyššího polykarbonátu s ochrannou fólií, který splňuje požadavek ochrany proti UV zářením v místě, kde teplota není už tak vysoká a nehrozí kontakt s odletujícími žhavými jiskrami.

Při návrhu vhodných materiálů by měl konstruktér také pamatovat na problematiky zmíněné v této práci, jakou jsou degradace vlastností vlivem stárnutí, viskoelastické chování některých materiálů, kríp, relaxace, koroze za napětí a další.

Ukazuje se, že tvůrčí činnost konstruktéra má v procesu návrhu stále svůj velký podíl. Synergie zkušeností, znalostí, informačních zdrojů a určité metodiky může vést ke kladnému cíli, ať už se jedná o volbu konstrukčního provedení či o volbu materiálu.

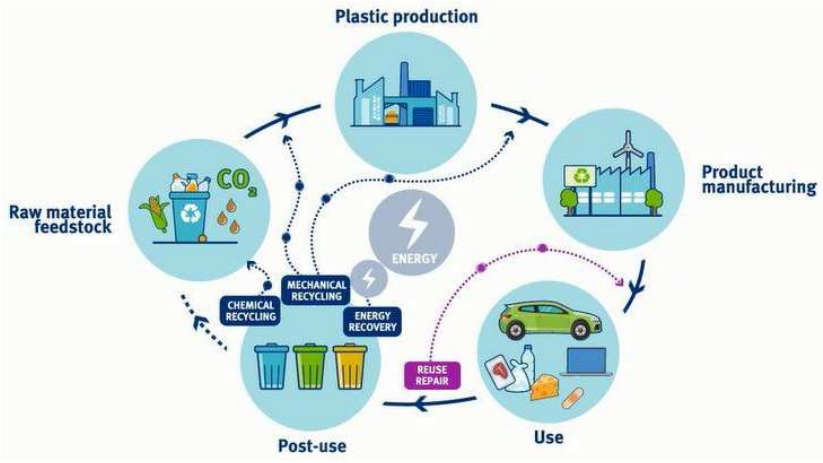


Obr. 95: Celkový pohled svařovacího pracoviště v 3D CAD



Obr. 96: Pracoviště z pohledu svařovacího robota v reálném provozu

9 Likvidace polymerních materiálů



Obr. 97: Koloběh plastových výrobků [62]

9.1 Recyklace

Při srovnání s materiály jako kovy nebo sklo vyžadují polymerní materiály větší zpracování na recyklaci. Polymery mají nízkou směšovací entropii díky velké molekulární hmotnosti dlouhých polymerových řetězců. Při smíchání polymerů rozdílných typů dojde k fázové separaci (stejně jako v případě smíchání oleje a vody) a recyklát zůstane ve vrstvách. Fázové hranice způsobí strukturní slabinu ve výsledném produktu, což dává za následek omezené použití recyklovaného produktu z polymeru. Použití přísad (barviv, aditiv, tmelů) představuje další překážku k recyklaci.

Recyklací použitých plastů se umožní znovu zajištění vstupních surovin v případě jejich nedostatku, snižují se náklady při stoupajících cenách těchto surovin a také ekologická zátěž daná produkovanými odpady, které se v procesu recyklace stávají znovu vstupní surovinou. Možností využití recyklovatelného odpadu je stále větší množství. V Nizozemsku například testují cyklostezky a silnice vyrobené z recyklovaného plastu, vědci z ČVUT vyvinuli cihlu z recyklovatelného plastu a další využití přináší skupina studentů z University of British Columbia, která vytvořila stolní recyklovací zařízení, pomocí něhož recykluje odpad z 3D tisku a vytváří cívky s materiálem. Zajímavý je také projekt dalšího nizozemského designera, který pobízí na svém webu k sestavení vlastního recyklátoru (tzv. Precious plastic). Zájemci si tak mohou sestavit svůj vlastní recyklátor doma a místo vyhazování plastového odpadu mohou vyrábět recyklované výrobky [63].

9.2 Spalování a skládkování

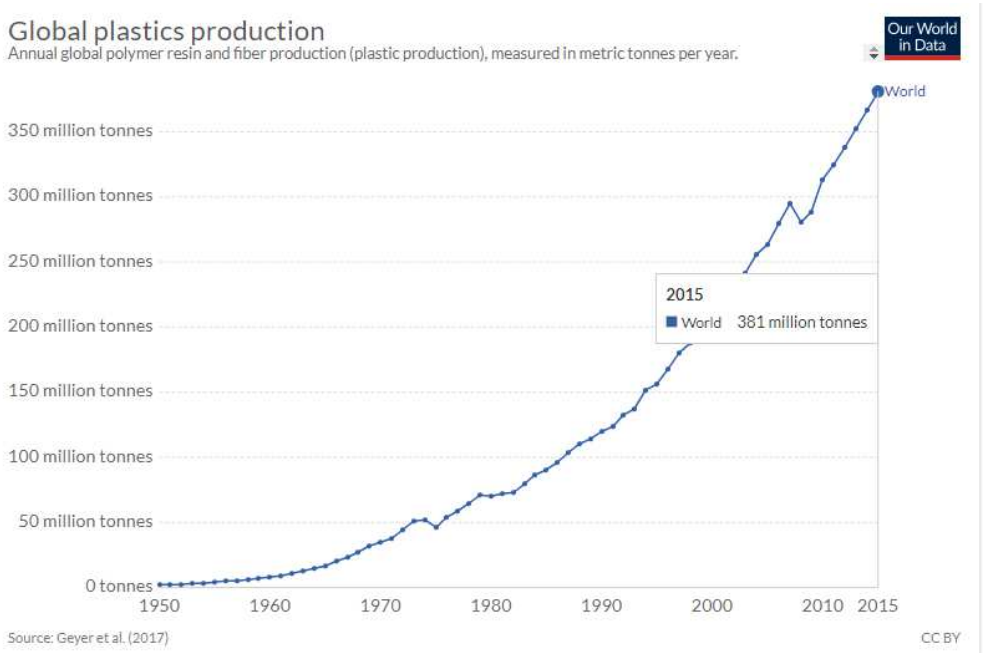
Většina reaktoplastů a elastomerů jsou obtížně recyklovatelné. U termoplastů je překážkou recyklace přidávání různých aditiv (např. u PVC). Z tohoto důvodu se tyto materiály hromadně spalují za vysokých teplot. Moderní spalovny jsou vybaveny bezpečnými filtry, které dokáží zachytit velmi nebezpečné zplodiny, které při spalování vznikají (např. dioxiny). Materiály, které se nehodí k recyklaci nebo se nějak energeticky nezpracují, skončí na skládce. Zde se z nich začnou uvolňovat v první řadě ftaláty a těžké kovy. Tyto látky se pak mohou dostat do spodních vod [63].

9.3 Bioplasty

Bioplast je plast, který není syntetický. Je vytvořen přírodními polymery (celulóza, škrob, cukr). Takto vzniklý materiál lze biologicky vyrobit a likvidovat. Ovšem je zde celá řada otázek kolem ekologie a ekonomičnosti výroby těchto bioplastů. Vstupní suroviny pro výrobu bioplastů je nutné vypěstovat, s tím souvisí spotřeba vody, energie, chemických hnojiv apod. Při samotném pěstování a ošetřování pesticidy se do ovzduší uvolňuje množství oxidu dusíku, který nadělá v atmosféře větší škody než např. oxid uhličitý. O ekologii při výrobě bioplastů tedy nemůže být řeč.
Ve skutečnosti se však rozlišují bioplasty podle způsobu výroby a likvidace na biodegradabilní (na bázi polysacharidů, polyamidů a polyhydroxyalkanonátů) a oxodegradabilní (vznikají z polyethylenu, do kterého se přidávají aditiva pro urychlení rozkladu). Zatímco biodegradabilní plasty se rozkládají vlivem působení mikroorganismů a bakterií, oxodegradabilní se rozkládají vlivem působení kyslíku a slunečního záření. Skutečnost je taková, že 100% rozložitelný plast se vlivem působení vzduchu rozpadne na malé částečky, to však brání znovupoužití a musí se vytvořit nový produkt. Podobně vypadá představa vyhození použitého plastového produktu do přírody nebo do kompostu s myšlenkou, že se za několik měsíců rozloží.
Bioplasty mají za úkol snížit závislost na ropě a snížit množství plastového odpadu a zplodiny, ovšem jejich vývoj je stále ještě na začátku. [61]

9.4 Závěr

V procesu navrhování výrobku z polymerních materiálů by měl konstruktér klást důraz na ohleduplnost k životnímu prostředí a myslet na ekologickou likvidaci (recyklaci) navržených součástí. Celosvětová produkce plastů byla v roce 2015 cca 381milionů tun a neustále stoupá (viz. graf 19). Pro srovnání v roce 2008 byla světová produkce přibližně o 100 milionů tun nižší. Problémem se stává s tím související množství plastových odpadů, kterých vzniká ročně ve světě přes 34 milionů tun, z toho se pouze necelých 30% recykluje (zbytek se spaluje nebo skládkuje) [63].



Graf 19: Světová produkce plastů [58]

MAIN WORLD AREAS	PLASTICS CONSUMPTION, 000S TONS	POPULATION (MILLIONS)	KG/CAPITA
Europe W, C, E	40 000	450	90
Eurasia, Russia, others	4 000	285	14
North America	45 000	310	145
Latin America	11 000	500	22
Middle East, incl. TR	4 000	200	20
Africa, North & South	2 500	190	13
Other Africa	500	610	<1
China	19 000	1285	14
India	**4 000**	**1025**	**4**
Japan	11 000	125	90
Other Asia Pacific, rest	13 000	1120	11
Total world	**154 000**	**6 100**	**25**

Obr. 98: Celosvětová produkce plastů v jednotlivých kontinentech [59]

10 Závěr a zhodnocení cílů

Závěrem bych rád srovnal dosažené výsledky této práce s cíli, jež jsem si na jejím začátku vytyčil. Dovoluji si tvrdit, že všechny stanovené cíle byly naplněny. Na základě kvalitních odborných zdrojů se mi podařilo zpracovat rešerši na téma, na něž se tato práce orientovala. Na základě teoretických východisek jsem navrhl metodiku pro výběr vhodných krytů částí strojů, jejíž aplikaci jsem poté úspěšně realizoval na jednoúčelových strojích. Na základě realizace navržené metodiky jsem stanovil oblasti uplatnění polymerních materiálů a jejich implementaci v krytování jednoúčelových strojů a zařízení.

Následně jsem uskutečnil výzkum vlivu stárnutí plastů na degradaci mechanických vlastností provedením experimentální tahové zkoušky u stejných materiálů ve vystárnutém a nevystárnutém stavu. V rámci práce se také podařilo ukázat, že je možné odladění výpočtového matematického modelu v prostředí 3D softwaru a rovněž je možné přiblížit se reálnému mechanickému chování. V práci jsem mimo jiné zohlednil možnosti recyklace plastových částí stroje a dopad na životní prostředí při začlenění polymerních materiálů do jednoúčelových strojů a zařízení.

Tato práce měla dále za cíl nalézt vhodné místo pro širší začlenění polymerních materiálů v oblasti krytování výrobních strojů a dát konstruktérovi vhodný nástroj k tomu, aby se mohl v materiálové problematice zorientovat a vyřešit konkrétní problém pomocí určité metodiky s využitím vhodných nástrojů pro výběr krytu a jeho materiálu. V závěrečné části práce jsem prováděný výzkum celkově zhodnotil a popsal jeho přínos pro konstruktéry.

Rozsah této práce neumožnil podrobněji zpracovat větší spektrum nekovových materiálů. Zajímavé by jistě bylo navázat na práci a aplikovat obecně využitelnost nekovových materiálů v dalších oblastech výrobních strojů a zařízení. Výzkumnou část by bylo možné rozšířit o další experimenty (např. kríp, zkoušky ochranných krytů apod.). V neposlední řadě bych navrhoval provedení MKP výpočtů a zohlednění možnosti začlenit nekovové materiály do databází 3D CAD softwaru.

11 Použitá literatura

Knižní publikace

[1] LAŠOVÁ, V., KOSNAR, M. *The use of unconventional materiál in the construction of machina tools,* 2005. ISBN 953-7142-10-8

[2] LAŠOVÁ, V., ŠEDIVÝ, P. *Aplikace ortotropních materiálů ve stavbě příslušenství obráběcích strojů,* 2003. ISBN 80-01-02815-1

[3] BRADÁČ, J., KUBEC, V. *Nové směry využití vláknových kompozitů ve stavbě výrobních strojů a zařízení.* Plzeň: ZČU, 2003.

[4] KOSNAR, M. *Závěrečná zpráva projektu 1.2.2.* Praha: Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii, 2005.

[5] ŠINDELÁŘOVÁ, J. *Využití ortotropních materiálů ve stavbě strojů*. Plzeň: ZČU, 2003.

[6] MRÁZ, P., TALÁCKO, J. *Konstrukce strojů s kompozitními materiály.* Praha: ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03540-9.

[7] VRBA, P. *Využití sendvičové struktury pro stojanové těleso obráběcího stroje,* Praha 2009.

[8] SMOLÍK, J. *Nosné díly obráběcích strojů z nekonvenčních materiálů: Disertační práce*, ČVUT, Praha, 2007.

[9] GORSCHENEK, M. *Nekonvenční materiály a jejich uplatnění v oblasti tvářecí techniky*, Plzeň, 2007.

[10] ŠVEC, M. *Uplatnění nekonvenčních materiálů v konstrukci obráběcích strojů,* Plzeň, 2007.

[11] KUBÍČEK, J., *Základy stavby výrobních strojů: obráběcí stroje*. Plzeň: ZČU, 2001. ISBN 80-7082-710-6

[12] KOLOUCH, J., *Strojní součásti z plastů,* Praha: SNTL, 1981.

[13] VLČEK, R.: *Hodnotová analýza.* Praha, SNTL 1973.

[14] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J., *Příručka strojního inženýra.*. Brno: ComputerPress, 1999. ISBN 80-7226-055-3

[15] EDER, W..., HOSNEDL, S., *Introduction to Design Engineering: Systematic Creativity and Management*. 1. vyd. Boca Raton : CRC Press, 2010. ISBN: 978-0-415-55557-9

[16] KRÁTKÝ, J., KRÓNEROVÁ, E., HOSNEDL, S., *Obecné strojní části 2. 1. vyd.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. ISBN: 978-80-261-0066-9

Technické normy ČSN:

[18] ČSN EN ISO 11403-1 (ČSN 64 0010): Plasty - Stanovení a prezentace srovnatelných vícebodových hodnot - Část 1: Mechanické vlastnosti

[19] ČSN EN ISO 11403-2 (ČSN 64 0010): Plasty - Stanovení a prezentace srovnatelných vícebodových hodnot - Část 2: Tepelné a zpracovatelské vlastnosti

[20] ČSN EN ISO 11403-3 (ČSN 64 0010): Plasty - Stanovení a prezentace srovnatelných vícebodových hodnot - Část 3: Vliv prostředí na vlastnosti

[21] ČSN 64 0770: Plasty - Přirozené a umělé stárnutí

[22] ČSN EN ISO 2818 (ČSN 64 0208): Plasty - příprava zkušebních těles obráběním

[23] ČSN EN ISO 294-1 (ČSN 64 0210): Plasty - Vstřikování zkušebních těles z termoplastů - Část 1: Obecné principy a vstřikování víceúčelových zkušebních těles a zkušebních těles tvaru pravoúhlého hranolu

[24] ČSN 64 0605 nahrazena normou ČSN EN ISO 3167 (ČSN 64 0209): Plasty - Víceúčelová zkušební tělesa

[25] ČSN EN ISO 1874-2: Plasty - Polyamidy (PA) pro tváření - Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností
[26] ČSN EN ISO 527-1: Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy
[27] ČSN EN ISO 527-2: Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty

Internetové zdroje:

[28] dostupné z: https://grantadesign.com/industry/products/ces-selector/ (poslední revize 30.3.2019)
[29] dostupné z: https://energy.gildemeister.com/en_en/ (poslední revize 22.1. 2016)
[30] dostupné z: https://publi.cz/books/180/04.html (poslední revize 22.1. 2016)
[31] dostupné z: http://www.dsm.com/nl_NL/downloads/dep/poissons_ratio.pdf (poslední revize 14.3. 2012)
[32] dostupné z: http://www.matnet.sav.sk/data/files/695.pdf (poslední revize 14.3. 2012)
[33] Přednášky a podklady předmětu KKS/KNM
[34] dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/pouziti-plastu-rychla-cesta-k-inovaci (poslední revize 17.3. 2012)
[35] dostupné z: http://www.britannica.com/EBchecked/media/2945/A-The-homopolymerarrangement-of-polyvinyl-chloride (poslední revize 10.5. 2014)
[36] dostupné z: http://science.howstuffworks.com/plastic2.htm (poslední revize 14.12. 2018)
[37] dostupné z: http://www.chemservis.cz/plasty.htm (poslední revize 22.1. 2016)
[38] dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-003/hesla/terpolymer.zakladni-pojmy.html
(poslední revize 22.1. 2016)
[39] dostupné z: http://www.jergym.hiedu.cz/~canovm/polymery/nazvy/nazvy.htm (poslední revize 18.4. 2019)
[40] dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm (poslední revize 22.1. 2016)
[41] dostupné z: http://www.ensinger-online.com/de/technische-kunststoffe-informationen/technischeeigenschaften/ (poslední revize 22.1. 2016)
[42] dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/specialni-priloha-cast-i-plastove-casti-stroju- astrojirenskych-zarizeni (poslední revize 22.1. 2016)
[43] dostupné z: http://www.spojky-ktr.cz/spojky (poslední revize 10.5. 2014)
[44] dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/vlastnosti-a-konstrukce-krytovani-pohyblivych- casti-obrabecich-stroju.html (poslední revize 10.5. 2014)
[45] dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28180 (poslední revize 22.1. 2016)
[46] dostupné z: http://tsubaki-kabelschlepp.com (poslední revize 18.4. 2016)
[47] dostupné z: http://www.chemservis.cz/plasty.htm (poslední revize 6.4. 2018)
[48] dostupné z: http://www.hennlich.cz (poslední revize 5.3. 2019)
[49] dostupné z: http://www.veemtrading.cz (poslední revize 5.3. 2019)
[50] dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/krytovani-stroju.html (poslední revize 22.1. 2016)

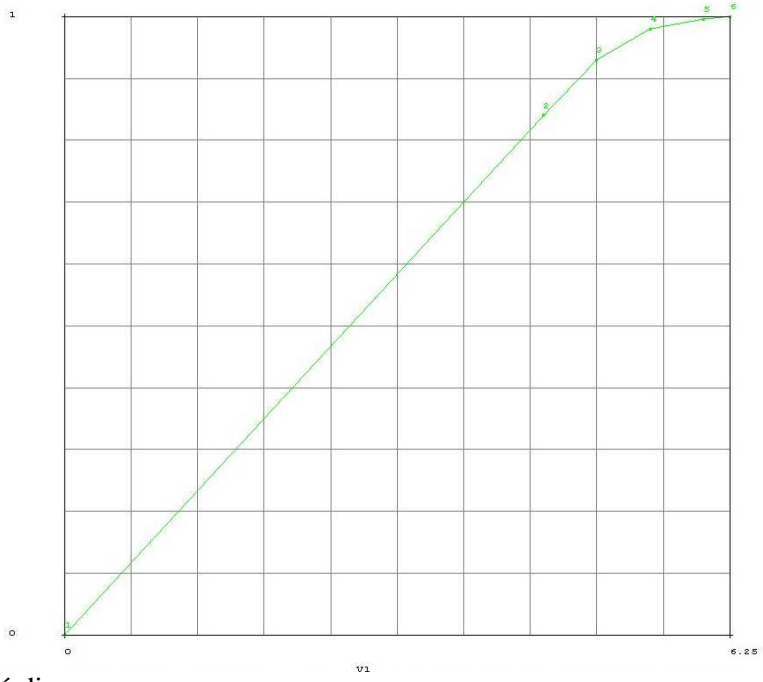
[51] dostupné z: http://www.ih.cas.cz/files/uploads/4_verejnost/1_verejnost/Reologie_starnuti.pdf (poslední revize 12.12. 2018)
[52] dostupné z: http://investree.cz/recyklace-plastu/ (poslední revize 26.4. 2019)
[53] dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/perspektivy-plastovych-ozubenych-prevodu.html (poslední revize 3.2. 2019)
[54] dostupné z: https://www.cad.cz/component/content/article/4807.html (poslední revize 3.2. 2019)
[55] dostupné z: https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/180-stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s.html (poslední revize 3.2. 2019)
[56] dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/3d-tiskarny/3d-tiskarna-ff-finder/ (poslední revize 3.2. 2019)
[57] dostupné z: https://www.dps-az.cz/vyroba/id:2168/cenove-dostupna-3d-tiskarna-na-obzoru (poslední revize 3.2. 2019)
[58] dostupné z: https://ourworldindata.org/plastic-pollution (poslední revize 16.4.2019)
[59] dostupné z: https://www.slideshare.net/djankit007/plastic-pollution-presentation-by-ankitmishra (poslední revize 16.4.2019)
[60] dostupné z: https://www.plasticroad.eu/en/ (poslední revize 12.4.2019)
[61] dostupné z: https://www.trideniodpadu.cz/bioplasty (poslední revize 12.4.2019)
[62] dostupné z: https://www.trideniodpadu.cz/plasty (poslední revize 12.4.2019)
[63] dostupné z: https://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluje-plast (poslední revize 12.4.2019)
[64] dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/plasty.pdf (poslední revize 18.4.2016)
[65] dostupné z: http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet3.htm (poslední revize 18.4.2016)
[66] dostupné z: http://www.lpm.cz/ (poslední revize 12.4.2019)
[67] DT zkoušky svarů a materiálů z plastů, TDS BRNO, 2008
[68] dostupné z: : http:// www.feronathyssen.cz (poslední revize 12.4.2019)
[69] dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Staticke_zkouseni_plasty.pdf (poslední revize 18.4.2016)
[70] dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Polyethylentereftal%C3%A1t (poslední revize 12.4.2019)
[71] dostupné z: https://www.haberkorn.cz/oploceni-zarizeni/ (poslední revize 10.5. 2014)

12 Přílohy

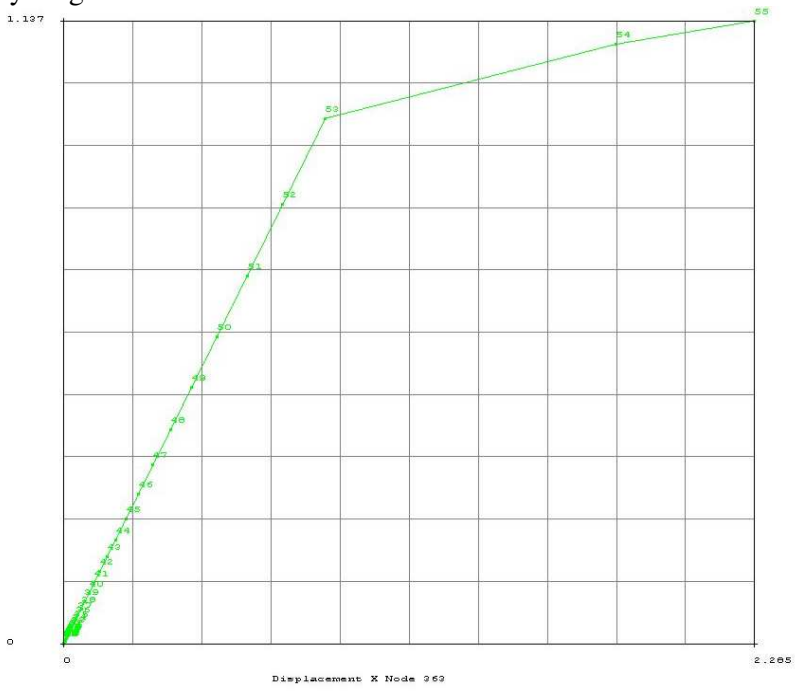
Příloha č. 1: MKP tahové zkoušky pro vybrané plasty

PEEK

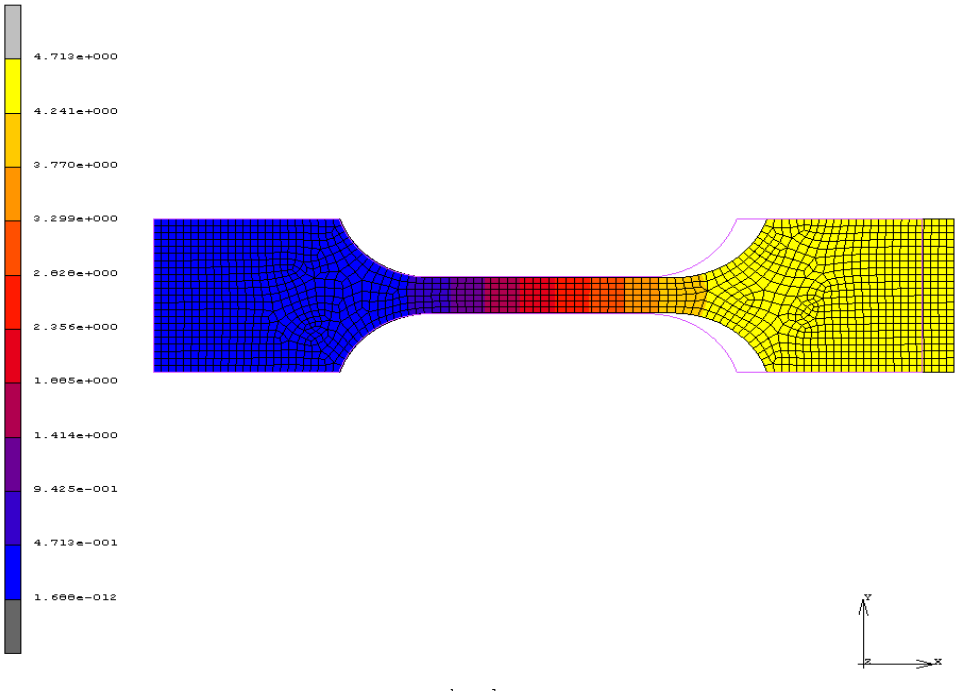
Vstupní tahový diagram



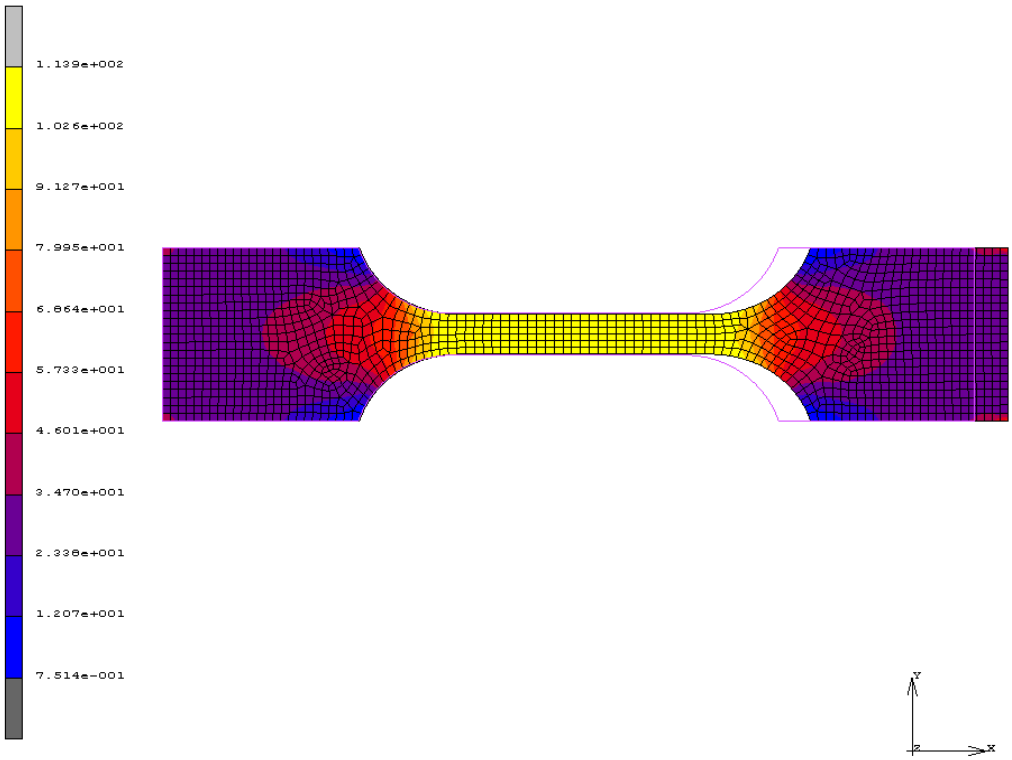
Výsledný tahový diagram



Maximální posunutí

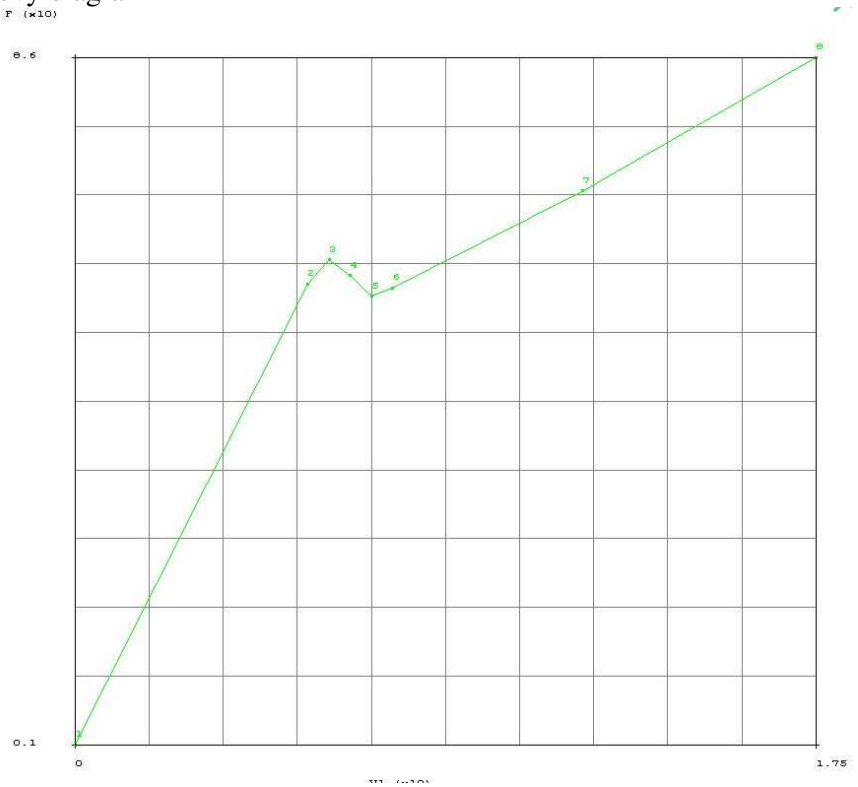


Maximální napětí

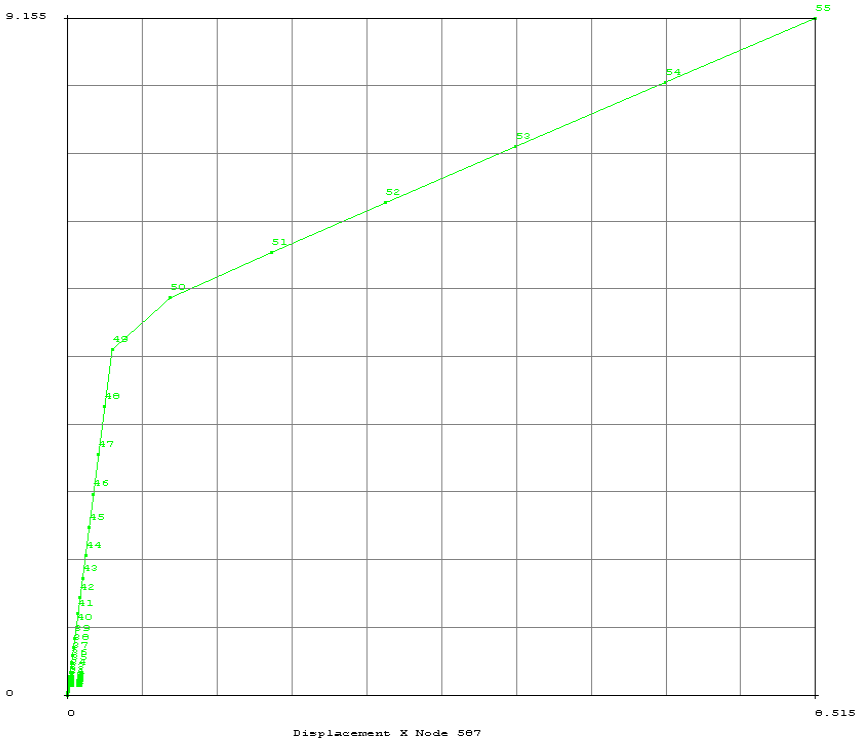


PA6

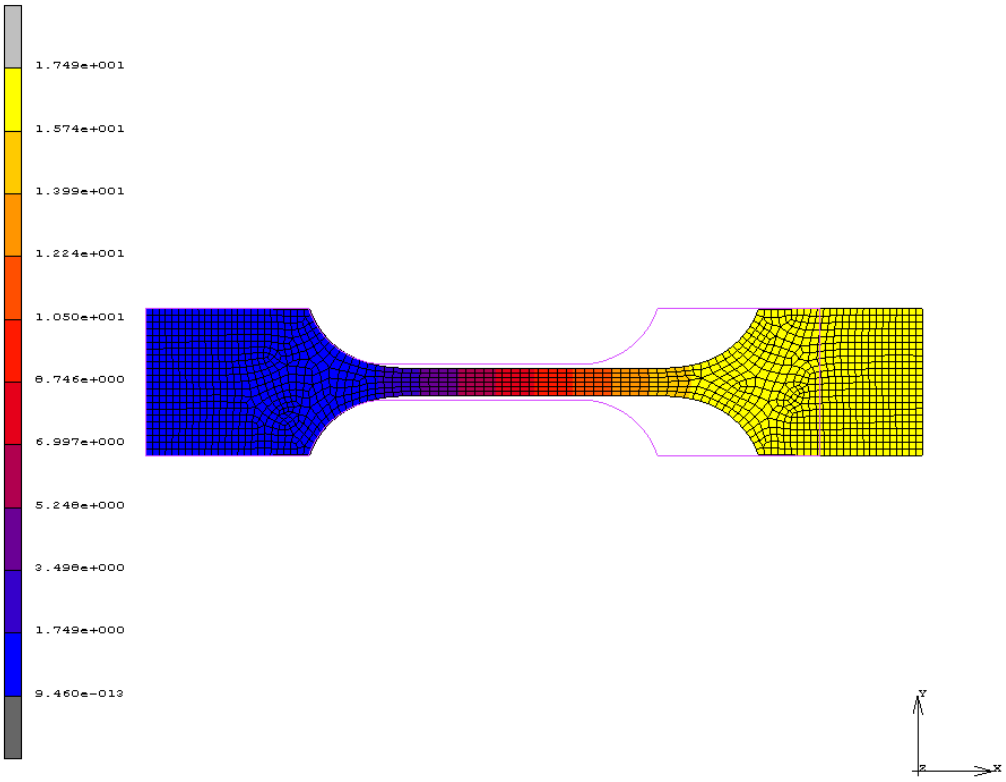
Vstupní tahový diagram



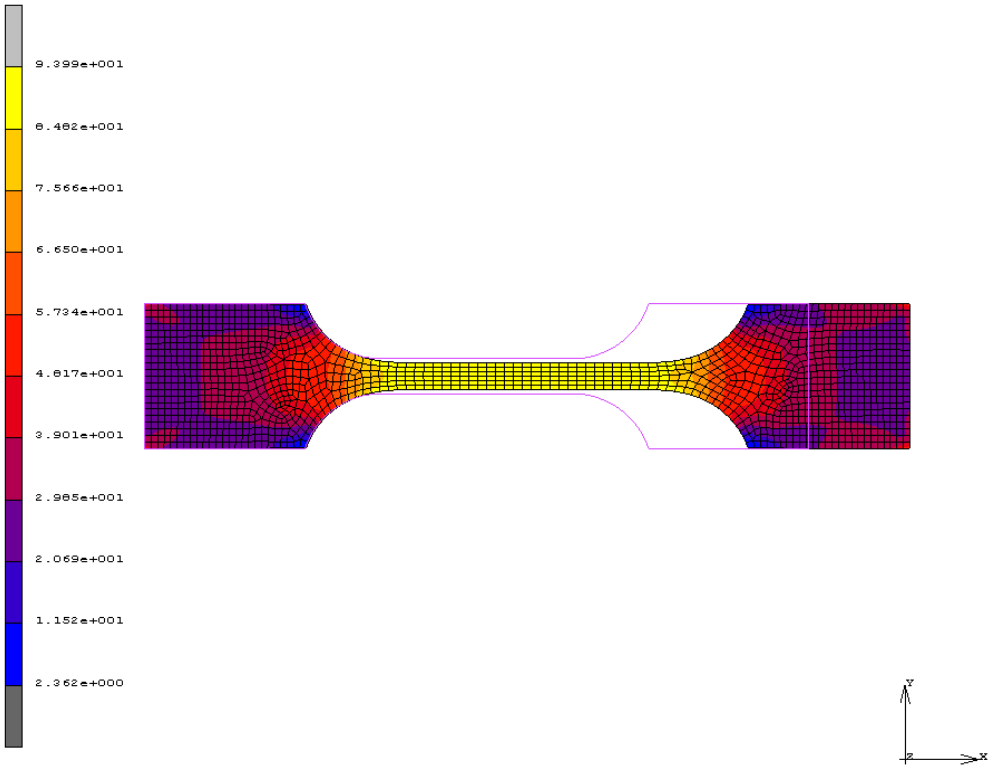
Výsledný tahový diagram



Maximální posunutí



Maximální napětí



Příloha č. 2: Materiálový list PS

CES 2013 EDUPACK

PS (high impact, flame retarded)

Identification

Designation
HIPS, High Impact Polystyrene, Flame retarded

Tradenames
Aim; Austrex; Avantra; Bapolan; Barlo; Cosden; DaicelStyrol; Diarex; Diostyrene; Dokl; Dunastyr; Dylene; Edistir; Empera; Estastir; Estmec; Estyrene; Extir; Farralloy; Ferrofio; Fiberfil; Fina; Hanapor; Hanarene; Highlac; Hiloy; HKPetro; Kanelite; KanePearl; Kaofulex; Krasten; Lacqrene; Ladene; Lastirol; LGStrene; LusepAPI; Lustrex; MK-Styrol; Nippi; Novacor; NSC; Owispol; Palstyrol; Permastat; Perstyr; Polidesa; Polyflam; PolyRex; Poly-Star; Polystyrol; Porene; Raflite; Replay; Resirene; Rexirene; Shuang Li; Solaroy; Starene; Stirofor; Stirolan; Styrobiend; Styrolen; Styrolux; Styron; Styron A-Tech; Sumibrite; Suprene; Talirex; TerraWave; Toporex; Tryclite; Umastyr; Uniclear; Valtra; Verex

General Properties

Density	1.15e3	-	1.17e3	kg/m^3
Price	* 73.2	-	80.5	CZK/kg

Composition overview

Composition (summary)
Typically 85-95% styrene and 5-15% cis-butadiene rubber (BR) with graft copolymerization. Some grades use other rubbers: styrene butadiene (SBR), ethylene propylene diene (EPDM), or styrene butadiene styrene (SBS). Flame retardant additives: typically brominated organic or more recently halogen-free.

Base	Polymer
Polymer class	Thermoplastic : amorphous
Polymer type	PS-HI
Polymer type full name	Polystyrene, high impact
Filler type	Unfilled

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	80	-	95	%
Flame retardant additive	✓			
Impact modifier	5	-	20	%

Mechanical properties

Young's modulus	1.65	-	2.07	GPa
Compressive modulus	* 1.65	-	2.07	GPa
Flexural modulus	1.93	-	2.27	GPa
Shear modulus	* 0.587	-	0.736	GPa
Bulk modulus	* 3.19	-	3.34	GPa
Poisson's ratio	* 0.397	-	0.413	
Shape factor	7.4			
Yield strength (elastic limit)	21.4	-	28.3	MPa
Tensile strength	18.3	-	28.3	MPa
Compressive strength	* 25.7	-	36.4	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	31	-	51.7	MPa
Elongation	30	-	50	% strain
Hardness - Vickers	6.4	-	9.1	HV
Hardness - Rockwell M	* 31	-	35	
Hardness - Rockwell R	38	-	65	
Fatigue strength at 10^7 cycles	* 7.32	-	11.3	MPa
Fracture toughness	* 0.761	-	2.29	MPa.m^0.5
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.0193	-	0.0242	

Impact properties

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

PS (high impact, flame retarded)

Impact strength, notched 23 °C	4.78	-	10.7	kJ/m^2
Impact strength, notched -30 °C	2.21	-	4.09	kJ/m^2
Impact strength, unnotched 23 °C	44.1	-	110	kJ/m^2
Impact strength, unnotched -30 °C	32.8	-	88.9	kJ/m^2

Thermal properties

Glass temperature	85	-	100	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	80	-	95	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	73	-	83	°C
Maximum service temperature	65	-	80	°C
Minimum service temperature	* -53	-	-33	°C
Thermal conductivity	0.15	-	0.19	W/m.°C
Specific heat capacity	* 1.57e3	-	1.63e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	79.4	-	82.6	µstrain/°C
Vicat softening point	83	-	98	°C

Processing properties

Linear mold shrinkage	0.3	-	0.6	%
Melt temperature	191	-	232	°C
Mold temperature	35	-	55	°C
Molding pressure range	41.3	-	103	MPa

Electrical properties

Electrical resistivity	* 5.98e21	-	5.38e22	µohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	* 3	-	3.2	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	* 0.001	-	0.006	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	20.8	-	22.5	MV/m
Comparative tracking index	275	-	575	V

Optical properties

Transparency	Opaque

Absorption, permeability

Water absorption @ 24 hrs	0.005	-	0.01	%
Water vapor transmission	0.713	-	1.44	g.mm/m².day
Permeability (O2)	156	-	163	cm³.mm/m².day.atm

Durability: flammability

Flammability	Self-extinguishing

Durability: fluids and sunlight

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Acceptable
Strong acids	Limited use
Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Limited use
Organic solvents	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	Poor
Oxidation at 500C	Unacceptable

Primary material production: energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	* 109	-	120	MJ/kg

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

PS (high impact, flame retarded)

CO2 footprint, primary production	* 4.77	-	5.27	kg/kg
Water usage	* 132	-	146	l/kg

Material processing: energy

Polymer extrusion energy	* 5.83	-	6.44	MJ/kg
Polymer molding energy	* 18.9	-	20.9	MJ/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 0.725	-	0.802	MJ/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 2.98	-	3.29	MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 5.48	-	6.06	MJ/kg

Material processing: CO2 footprint

Polymer extrusion CO2	* 0.437	-	0.483	kg/kg
Polymer molding CO2	* 1.42	-	1.56	kg/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.0544	-	0.0601	kg/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.223	-	0.247	kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0.411	-	0.455	kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✓			
Embodied energy, recycling	* 36.9	-	40.8	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 1.62	-	1.79	kg/kg
Recycle fraction in current supply	2.38	-	2.64	%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✓			
Heat of combustion (net)	* 33	-	35.1	MJ/kg
Combustion CO2	* 2.71	-	2.85	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			
A renewable resource?	✗			

Notes

Typical uses

Toys; light diffusers; beakers; cutlery; general household appliances; video/audio cassette cases; electronic housings; refrigerator liners.

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

Příloha č. 3: Materiálový list SAN

CES 2013 EDUPACK

SAN (molding and extrusion)

Identification

Designation
Styrene Acrylonitrile (Molding and Extrusion)

Tradenames
Anjalin; Arbesan; Bapolan; Barlo; Cevian; Dafnelac; Estasan; Fiberfil; Hanasan; Isosan; Kibisan; Kostil; Lastil; Litac-A; Lupan; Luran; Lustran; Nistil; Perlac; Ptasan; Polidux; Polyfort; Polyman; POLYsan; Porene; Rotec; Sanfor; Sangel; Sanrex; Starex; Sunrex; Tairisan; Terez; Tyril

General Properties

Density	1.06e3	-	1.08e3	kg/m^3
Price	* 50.6	-	55.8	CZK/kg

Composition overview

Composition (summary)
Copolymer of styrene (65-85%) and acrylonitrile (15-35%)

Base	Polymer
Polymer class	Thermoplastic : amorphous
Polymer type	SAN
Polymer type full name	Acrylonitrile styrene copolymer
Filler type	Unfilled

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	100	%

Mechanical properties

Young's modulus	3.28	-	3.86	GPa
Compressive modulus	3.64	-	3.99	GPa
Flexural modulus	3.44	-	4.19	GPa
Shear modulus	* 1.19	-	1.39	GPa
Bulk modulus	* 5.16	-	5.41	GPa
Poisson's ratio	* 0.39	-	0.395	
Shape factor	5.2			
Yield strength (elastic limit)	68.4	-	82.1	MPa
Tensile strength	69	-	82.1	MPa
Compressive strength	* 96.5	-	103	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	75.8	-	131	MPa
Elongation	2	-	3	% strain
Hardness - Vickers	* 20.5	-	24.8	HV
Hardness - Rockwell M	75	-	80	
Hardness - Rockwell R	75	-	83	
Fatigue strength at 10^7 cycles	* 26.5	-	34.5	MPa
Fracture toughness	* 1.49	-	3.2	MPa.m^0.5
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.0104	-	0.0122	

Impact properties

Impact strength, notched 23 °C	1.26	-	3.34	kJ/m^2
Impact strength, notched -30 °C	0.927	-	2.62	kJ/m^2
Impact strength, unnotched 23 °C	11.7	-	20.1	kJ/m^2
Impact strength, unnotched -30 °C	5.61	-	34.6	kJ/m^2

Thermal properties

Glass temperature	102	-	110	°C

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

SAN (molding and extrusion)

Heat deflection temperature 0.45MPa	104	-	107	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	95	-	104	°C
Maximum service temperature	80	-	100	°C
Minimum service temperature	* -52	-	-32	°C
Thermal conductivity	0.121	-	0.131	W/m.°C
Specific heat capacity	* 1.66e3	-	1.73e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	117	-	122	µstrain/°C
Vicat softening point	* 102	-	110	°C
Processing properties				
Linear mold shrinkage	0.3	-	0.5	%
Melt temperature	182	-	232	°C
Mold temperature	50	-	70	°C
Molding pressure range	34.4	-	138	MPa
Electrical properties				
Electrical resistivity	3.3e21	-	3e22	µohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	2.6	-	3.4	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	0.004	-	0.006	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	16.1	-	17.4	MV/m
Comparative tracking index	375	-	600	V
Optical properties				
Refractive index	1.56	-	1.57	
Transparency	Transparent			
Absorption, permeability				
Water absorption @ 24 hrs	0.15	-	0.25	%
Water vapor transmission	1.88	-	2.45	g.mm/m².day
Permeability (O2)	21.1	-	35.7	cm³.mm/m².day.atm
Durability: flammability				
Flammability	Highly flammable			
Durability: fluids and sunlight				
Water (fresh)	Excellent			
Water (salt)	Acceptable			
Weak acids	Excellent			
Strong acids	Acceptable			
Weak alkalis	Excellent			
Strong alkalis	Excellent			
Organic solvents	Unacceptable			
UV radiation (sunlight)	Fair			
Oxidation at 500C	Unacceptable			
Primary material production: energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	* 84.9	-	93.8	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 3.04	-	3.36	kg/kg
Water usage	* 128	-	142	l/kg
Material processing: energy				
Polymer extrusion energy	* 5.84	-	6.46	MJ/kg
Polymer molding energy	* 19.2	-	21.3	MJ/kg

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

SAN (molding and extrusion)

Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 1.36	-	1.5	MJ/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 9.33	-	10.3	MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 18.2	-	20.1	MJ/kg

Material processing: CO2 footprint

Polymer extrusion CO2	* 0.438	-	0.484	kg/kg
Polymer molding CO2	* 1.44	-	1.59	kg/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.102	-	0.113	kg/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.7	-	0.773	kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 1.36	-	1.51	kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✓			
Embodied energy, recycling	* 29.8	-	31.8	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 1.03	-	1.14	kg/kg
Recycle fraction in current supply	0.1			%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✓			
Heat of combustion (net)	* 37.2	-	39.1	MJ/kg
Combustion CO2	* 3.08	-	3.24	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			
A renewable resource?	✗			

Notes

Typical uses

Cups; toothbrush handles; trays; containers; covers; cassette cases; battery cases; dials; knobs; switches; lenses.

Links

Process Universe

Producers

Reference

Shape

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

Příloha č. 4: Materiálový list PPA GF30 a PPA GF30 V0

CES 2013 EDUPACK

PPA (33% glass fiber)

Identification

Designation
Polyphthalamide (33% glass fiber)

Note: Polyamides are moisture sensitive. Density, mechanical, impact, and electrical properties on this datasheet are for material conditioned at 50% relative humidity and 23°C. These are more typical of in-use performance than the properties of the dry material. Other properties are for the dry-as-molded material.

Tradenames
Amodel, Edgetek, Grivory, Zytel

General Properties

Density	1.46e3	-	1.49e3	kg/m^3
Price	* 177	-	209	CZK/kg

Composition overview

Composition (summary)
Polymamide co- or ter-polymer comprising of repeat units of PA (nylon) 66, 6T and/or 6I (T=terephthalic acid, I=isophthalic acid), with reinforcing filler. By strict definition, polyphthalamides (PPA) have >55 mol % of phthalic acids (aromatic diacids) and <45% aliphatic diacid.

Base	Polymer	
Polymer class	Thermoplastic : semi-crystalline	
Polymer type	PPA	
Polymer type full name	Polyphthalamide	
% filler (by weight)	33	%
Filler type	Long glass fiber	

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	67	%
Glass (fiber)	33	%

Mechanical properties

Young's modulus	10.9	-	13.6	GPa
Compressive modulus	* 11.6	-	12.9	GPa
Flexural modulus	10.1	-	12.1	GPa
Shear modulus	* 4.4	-	4.63	GPa
Bulk modulus	* 13.5	-	14.9	GPa
Poisson's ratio	* 0.343	-	0.356	
Shape factor	6.23			
Yield strength (elastic limit)	* 166	-	207	MPa
Tensile strength	168	-	205	MPa
Compressive strength	* 212	-	235	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	223	-	273	MPa
Shear strength	71.7	-	87.6	MPa
Elongation	1.74	-	2.51	% strain
Elongation at yield	* 1.47	-	2.78	% strain
Hardness - Vickers	* 53.1	-	58.7	HV
Hardness - Rockwell M	* 184	-	204	
Hardness - Rockwell R	* 184	-	204	
Hardness - Shore D	* 99	-	102	
Fatigue strength at 10^7 cycles	* 70.8	-	78.2	MPa
Fracture toughness	* 5.07	-	5.61	MPa.m^0.5
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.00754	-	0.00834	

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

PPA (33% glass fiber)

Impact properties				
Impact strength, notched 23 °C	5.95	-	11.6	kJ/m^2
Impact strength, notched -30 °C	5.51	-	12	kJ/m^2
Impact strength, unnotched 23 °C	45.6	-	66.9	kJ/m^2
Impact strength, unnotched -30 °C	44	-	66	kJ/m^2
Thermal properties				
Melting point	299	-	322	°C
Glass temperature	119	-	135	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	* 284	-	340	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	258	-	313	°C
Maximum service temperature	* 215	-	235	°C
Minimum service temperature	* -49	-	-29	°C
Thermal conductivity	0.0926	-	0.1	W/m.°C
Specific heat capacity	* 1.38e3	-	1.41e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	23	-	58	µstrain/°C
Processing properties				
Linear mold shrinkage	0.2	-	0.5	%
Melt temperature	288	-	349	°C
Molding pressure range	34.4	-	103	MPa
Electrical properties				
Electrical resistivity	1.55e18	-	3.87e19	µohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	* 3.93	-	5.54	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	* 0.00542	-	0.0143	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	25.3	-	43.2	MV/m
Comparative tracking index	575	-	600	V
Optical properties				
Transparency	Opaque			
Absorption, permeability				
Water absorption @ 24 hrs	0.2	-	0.33	%
Water absorption @ sat	3.3	-	4.4	%
Humidity absorption @ sat	1.4	-	2	%
Durability: flammability				
Flammability	Slow-burning			
Durability: fluids and sunlight				
Water (fresh)	Excellent			
Water (salt)	Excellent			
Weak acids	Excellent			
Strong acids	Limited use			
Weak alkalis	Excellent			
Strong alkalis	Limited use			
Organic solvents	Limited use			
UV radiation (sunlight)	Fair			
Oxidation at 500C	Unacceptable			
Primary material production: energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	* 127	-	140	MJ/kg

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

PPA (33% glass fiber)

CO2 footprint, primary production	* 8.48	-	9.35	kg/kg

Material processing: energy

Polymer extrusion energy	* 5.95	-	6.58	MJ/kg
Polymer molding energy	* 22.3	-	24.7	MJ/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 2.31	-	2.55	MJ/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 18.8	-	20.8	MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 37.2	-	41.1	MJ/kg

Material processing: CO2 footprint

Polymer extrusion CO2	* 0.448	-	0.493	kg/kg
Polymer molding CO2	* 1.67	-	1.85	kg/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.173	-	0.191	kg/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 1.41	-	1.56	kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 2.79	-	3.08	kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✗			
Recycle fraction in current supply	0.1			%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✓			
Heat of combustion (net)	* 19.9	-	20.9	MJ/kg
Combustion CO2	* 1.63	-	1.71	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			
A renewable resource?	✗			

Notes

Typical uses

Industrial and Chemical Processing Equipment; Bearings; Gears; Electrical Connectors; Packaging; Under bonnet automobile applications

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

PPA (33% glass fiber, flame retarded V-0)

Identification

Designation

Polyphthalamide (33% glass fiber, V-0)

Note: Polyamides are moisture sensitive. Density, mechanical, impact, and electrical properties on this datasheet are for material conditioned at 50% relative humidity and 23°C. These are more typical of in-use performance than the properties of the dry material. Other properties are for the dry-as-molded material.

Tradenames

Amodel, Edgetek, Grivory, Zytel

General Properties

Density	1.65e3	-	1.69e3	kg/m^3
Price	* 181	-	214	CZK/kg

Composition overview

Composition (summary)

Polymamide co- or ter-polymer comprising of repeat units of PA (nylon) 66, 6T and/or 6I (T=terephthalic acid, I=isophthalic acid), with reinforcing filler. By strict definition, polyphthalamides (PPA) have >55 mol % of phthalic acids (aromatic diacids) and <45% aliphatic diacid.

Base	Polymer	
Polymer class	Thermoplastic : semi-crystalline	
Polymer type	PPA	
Polymer type full name	Polyphthalamide	
% filler (by weight)	33	%
Filler type	Long glass fiber	

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	67	%
Flame retardant additive	✓	
Glass (fiber)	33	%

Mechanical properties

Young's modulus	11.3	-	14.2	GPa
Compressive modulus	* 12.1	-	13.4	GPa
Flexural modulus	12.1	-	14.5	GPa
Shear modulus	* 4.8	-	4.84	GPa
Bulk modulus	* 13.5	-	15	GPa
Poisson's ratio	* 0.337	-	0.351	
Shape factor	7.43			
Yield strength (elastic limit)	* 131	-	164	MPa
Tensile strength	133	-	162	MPa
Compressive strength	* 168	-	186	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	206	-	252	MPa
Shear strength	55.8	-	68.2	MPa
Elongation	1.23	-	1.77	% strain
Elongation at yield	* 1.04	-	1.97	% strain
Hardness - Vickers	* 42	-	46.5	HV
Hardness - Rockwell M	* 175	-	193	
Hardness - Rockwell R	* 175	-	193	
Hardness - Shore D	* 95.9	-	99.8	
Fatigue strength at 10^7 cycles	* 56.1	-	62	MPa
Fracture toughness	* 5.12	-	5.65	MPa.m^0.5
Mechanical loss coefficient (tan delta)				

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

PPA (33% glass fiber, flame retarded V-0)

	* 0.00689	-	0.00762	
Impact properties				
Impact strength, notched 23 °C	9.94	-	17.2	kJ/m^2
Impact strength, notched -30 °C	8.19	-	17.8	kJ/m^2
Impact strength, unnotched 23 °C	26.3	-	38.7	kJ/m^2
Impact strength, unnotched -30 °C	28	-	42	kJ/m^2
Thermal properties				
Melting point	299	-	322	°C
Glass temperature	119	-	135	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	* 272	-	327	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	247	-	300	°C
Maximum service temperature	* 209	-	228	°C
Minimum service temperature	* -49	-	-29	°C
Thermal conductivity	* 0.561	-	0.584	W/m.°C
Specific heat capacity	* 1.2e3	-	1.25e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	* 23	-	58	µstrain/°C
Processing properties				
Linear mold shrinkage	0.2	-	0.4	%
Melt temperature	288	-	349	°C
Molding pressure range	34.4	-	103	MPa
Electrical properties				
Electrical resistivity	2e18	-	5e19	µohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	2.24	-	3.16	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	0.0033	-	0.0087	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	22.9	-	39.1	MV/m
Comparative tracking index	400			V
Optical properties				
Transparency	Opaque			
Absorption, permeability				
Water absorption @ 24 hrs	0.15	-	0.25	%
Water absorption @ sat	2.9	-	3.9	%
Humidity absorption @ sat	1.2	-	1.6	%
Durability: flammability				
Flammability	Self-extinguishing			
Durability: fluids and sunlight				
Water (fresh)	Excellent			
Water (salt)	Excellent			
Weak acids	Excellent			
Strong acids	Limited use			
Weak alkalis	Excellent			
Strong alkalis	Limited use			
Organic solvents	Limited use			
UV radiation (sunlight)	Fair			
Oxidation at 500C	Unacceptable			

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

PPA (33% glass fiber, flame retarded V-0)

Primary material production: energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	* 143	-	159	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 9.62	-	10.6	kg/kg

Material processing: energy

Polymer extrusion energy	* 5.99	-	6.51	MJ/kg
Polymer molding energy	* 20.6	-	22.8	MJ/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 1.43	-	1.58	MJ/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 10	-	11.1	MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 19.6	-	21.6	MJ/kg

Material processing: CO2 footprint

Polymer extrusion CO2	* 0.442	-	0.488	kg/kg
Polymer molding CO2	* 1.54	-	1.71	kg/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.107	-	0.119	kg/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.752	-	0.831	kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 1.47	-	1.62	kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✗			
Recycle fraction in current supply	0.1			%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✓			
Heat of combustion (net)	* 16.3	-	17.3	MJ/kg
Combustion CO2	* 1.34	-	1.41	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			
A renewable resource?	✗			

Notes

Typical uses

Industrial and Chemical Processing Equipment; Bearings; Gears; Electrical Connectors; Packaging; Under bonnet automobile applications

Links

Process Universe

Producers

Reference

Shape

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

Příloha č. 5: Materiálový list PA66/6T GF60

CES 2013 EDUPACK

PA (type 66, 60% long glass fiber)

Identification

Designation
Polyamide (Nylon) (Type 66, 60% Long Glass Fiber)

Note: Polyamides are moisture sensitive. Density, mechanical, impact, and electrical properties on this datasheet are for material conditioned at 50% relative humidity and 23°C. These are more typical of in-use performance than the properties of the dry material. Other properties are for the dry-as-molded material.

Tradenames
Celstran

General Properties

Density	1.65e3	-	1.69e3	kg/m^3
Price	* 80.5	-	103	CZK/kg

Composition overview

Composition (summary)
(NH-(CH2)6-NH-CO-(CH2)4-CO)n + glass filler

Base	Polymer	
Polymer class	Thermoplastic : semi-crystalline	
Polymer type	PA66	
Polymer type full name	Polyamide/nylon 66	
% filler (by weight)	60	%
Filler type	Long glass fiber	

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	40	%
Glass (fiber)	60	%

Mechanical properties

Young's modulus	12.5	-	15.5	GPa
Compressive modulus	* 13.3	-	14.7	GPa
Flexural modulus	* 13.3	-	16	GPa
Shear modulus	* 5.13	-	5.39	GPa
Bulk modulus	* 13.1	-	14.5	GPa
Poisson's ratio	* 0.318	-	0.331	
Shape factor	6.69			
Yield strength (elastic limit)	* 169	-	211	MPa
Tensile strength	171	-	209	MPa
Compressive strength	* 217	-	239	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 290	-	354	MPa
Shear strength	* 103	-	125	MPa
Elongation	1.64	-	2.36	% strain
Elongation at yield	* 1.38	-	2.62	% strain
Hardness - Vickers	* 54.2	-	59.9	HV
Hardness - Rockwell M	* 184	-	204	
Hardness - Rockwell R	* 184	-	204	
Hardness - Shore D	* 98	-	102	
Fatigue strength at 10^7 cycles	* 72.2	-	79.8	MPa
Fracture toughness	* 5.21	-	5.76	MPa.m^0.5
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.00656	-	0.00725	

Impact properties

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

PA (type 66, 60% long glass fiber)

Impact strength, notched 23 °C	27.2	-	52.8	kJ/m^2
Impact strength, notched -30 °C	28.4	-	61.7	kJ/m^2
Impact strength, unnotched 23 °C	77	-	113	kJ/m^2
Impact strength, unnotched -30 °C	72	-	108	kJ/m^2
Thermal properties				
Melting point	250	-	271	°C
Glass temperature	54	-	66	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	* 263	-	317	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	237	-	290	°C
Maximum service temperature	90	-	130	°C
Minimum service temperature	-81	-	-71	°C
Thermal conductivity	0.53	-	0.57	W/m.°C
Specific heat capacity	* 1.21e3	-	1.26e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	19.8	-	20.2	µstrain/°C
Processing properties				
Linear mold shrinkage	0.2	-	0.6	%
Melt temperature	239	-	316	°C
Mold temperature	40	-	60	°C
Molding pressure range	68.8	-	138	MPa
Electrical properties				
Electrical resistivity	* 2e17	-	5e18	µohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	* 10.2	-	14.3	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	* 0.0857	-	0.226	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	* 39.2	-	66.8	MV/m
Comparative tracking index	* 475	-	525	V
Optical properties				
Transparency	Opaque			
Absorption, permeability				
Water absorption @ 24 hrs	* 0.25	-	0.4	%
Water absorption @ sat	* 2.8	-	3.7	%
Humidity absorption @ sat	* 0.81	-	1.1	%
Durability: flammability				
Flammability	Slow-burning			
Durability: fluids and sunlight				
Water (fresh)	Excellent			
Water (salt)	Excellent			
Weak acids	Unacceptable			
Strong acids	Unacceptable			
Weak alkalis	Acceptable			
Strong alkalis	Acceptable			
Organic solvents	Excellent			
UV radiation (sunlight)	Poor			
Oxidation at 500C	Unacceptable			
Primary material production: energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	* 78.4	-	86.6	MJ/kg

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

PA (type 66, 60% long glass fiber)

CO2 footprint, primary production	* 4.58	-	5.06	kg/kg
Water usage	* 466	-	515	l/kg

Material processing: energy

Polymer extrusion energy	* 5.84	-	6.46	MJ/kg
Polymer molding energy	* 19.2	-	21.3	MJ/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 2.31	-	2.56	MJ/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 18.9	-	20.8	MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 37.2	-	41.2	MJ/kg

Material processing: CO2 footprint

Polymer extrusion CO2	* 0.439	-	0.484	kg/kg
Polymer molding CO2	* 1.44	-	1.6	kg/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.173	-	0.192	kg/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 1.41	-	1.56	kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 2.79	-	3.09	kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✗			
Recycle fraction in current supply	0.1			%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✓			
Heat of combustion (net)	* 12	-	12.6	MJ/kg
Combustion CO2	* 0.911	-	0.957	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			
A renewable resource?	✗			

Notes

Typical uses

Gears; cams; rollers; bearings; nuts and bolts; power tool housing; electrical connectors; combs; coil formers; fuel tanks for cars; kitchen utensils.

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

Příloha č. 6: Materiálový list VMQ/FMVQ

CES 2013 EDUPACK

Silicone (VMQ, heat cured)

Identification

Designation

Silicone elastomer / Polydimethylsiloxane / Vinyl methyl silicone (VMQ / SI) : heat cured

Tradenames

Silastic, Elastosil-R, Baysilone, GE LIM, Shincor LIM, Rhodorsil HCR, Tufel, Silopren

General Properties

Density	1.02e3	-	1.22e3	kg/m^3
Price	* 208	-	247	CZK/kg

Composition overview

Composition (summary)

Polymer of dimethyl silicone, formula -[OSi(CH3)2]-, with some methyl groups substituted by vinyl groups as cure sites (crosslinking sites), formula -(OSiCH3CH=CH2)-. Typically compounded with 10-30% fumed silica (SiO2) with 100-325 m2/g surface area. Contains organic peroxide or platinum (addition) heat cure system for LIM (liquid injection molding) or HTV (high temperature vulcanization).

Base	Polymer			
Polymer class	Thermoset elastomer : rubber			
Polymer type	SI-VMQ (heat cured)			
Polymer type full name	Silicone rubber, vinyl methyl type, heat cured			
% filler (by weight)	10	-	30	%
Filler type	Mineral			

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	70	-	90	%
Silica (fumed)	10	-	30	%

Mechanical properties

Young's modulus	0.005	-	0.05	GPa
Compressive modulus	* 0.005	-	0.05	GPa
Flexural modulus	0.005	-	0.05	GPa
Shear modulus	* 3e-4	-	0.02	GPa
Bulk modulus	* 1.5	-	2	GPa
Poisson's ratio	* 0.47	-	0.49	
Shape factor	1.7			
Yield strength (elastic limit)	7	-	11.5	MPa
Tensile stress at 100% strain	1.2	-	3.6	MPa
Tensile strength	7	-	11.5	MPa
Compressive strength	* 8.4	-	13.8	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 16	-	22.7	MPa
Elongation	270	-	600	% strain
Elongation at yield	270	-	600	% strain
Hardness - Shore A	30	-	75	
Fatigue strength at 10^7 cycles	* 2.9	-	4.6	MPa
Fracture toughness	* 1.04	-	1.65	MPa.m^0.5
Mechanical loss coefficient (tan delta)	0.06	-	0.15	
Compression set at 23°C	5	-	10	%
Compression set at 70°C	5	-	10	%
Compression set at 100°C	5	-	10	%
Tear strength	10	-	40	N/mm

Impact properties

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

Silicone (VMQ, heat cured)

Impact strength, notched 23 °C	590	-	600	kJ/m^2
Impact strength, notched -30 °C	590	-	600	kJ/m^2
Impact strength, unnotched 23 °C	590	-	600	kJ/m^2
Impact strength, unnotched -30 °C	590	-	600	kJ/m^2
Thermal properties				
Glass temperature	-70	-	-60	°C
Maximum service temperature	200	-	250	°C
Minimum service temperature	-60	-	-50	°C
Thermal conductivity	0.2	-	0.3	W/m.°C
Specific heat capacity	1.05e3	-	1.1e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	* 250	-	300	µstrain/°C
Processing properties				
Linear mold shrinkage	2.4	-	4	%
Mold temperature	180	-	200	°C
Electrical properties				
Electrical resistivity	3e19	-	5e20	µohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	2.3	-	3.1	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	0.003	-	0.024	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	16	-	20	MV/m
Comparative tracking index	400	-	600	V
Optical properties				
Refractive index	1.4	-	1.44	
Transparency	Translucent			
Absorption, permeability				
Water absorption @ 24 hrs	0.1	-	0.15	%
Water vapor transmission	1.53	-	3.51	g.mm/m².day
Permeability (O2)	1.29e4	-	3.01e4	cm³.mm/m².day.atm
Durability: flammability				
Flammability	Self-extinguishing			
Durability: fluids and sunlight				
Water (fresh)	Excellent			
Water (salt)	Excellent			
Weak acids	Excellent			
Strong acids	Excellent			
Weak alkalis	Excellent			
Strong alkalis	Excellent			
Organic solvents	Acceptable			
Oils and fuels	Limited use			
UV radiation (sunlight)	Good			
Oxidation at 500C	Unacceptable			
Primary material production: energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	* 118	-	131	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 7.55	-	8.34	kg/kg
Water usage	190	-	571	l/kg

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

Silicone (VMQ, heat cured)

Material processing: energy

Polymer molding energy	* 14.1	-	15.5	MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 2.31	-	2.55	MJ/kg

Material processing: CO2 footprint

Polymer molding CO2	* 1.13	-	1.24	kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0.173	-	0.191	kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✗			
Recycle fraction in current supply	0.1			%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✓			
Heat of combustion (net)	* 13.1	-	14.2	MJ/kg
Combustion CO2	* 1.3	-	1.37	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			
A renewable resource?	✗			

Notes

Typical uses

Automotive: seals, hose, spark-plug boots, gaskets, mounts, cable sheathing. Electrical/electronic: computer key pads, insulators, surge arresters. Food contact: Gaskets for Pressure Cookers, Heat resistant kitchen mats. Medical: seals, syringe plungers, breast nipple protectors, catheters, sterilization mats, O-Rings for dialysers, baby bottle parts. Sports: swimming goggles and caps. Other: molds.

Other notes

Strengths: Outstanding property stability of rubber properties over large temperature range (-50 to 200 C), including high temperature performance and low temperature flexibility; chemical resistance, weatherability, ozone/oxidation, electrical performance, sealing capability
Limitations: low room temperature strength, low oil resistance

Process information

Compression, injection, transfer molding; extrusion; calendering.
Heat cured: LIM (liquid injection molding) or HTV (high temperature vulcanizing)

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

Fluorosilicone (FVMQ, heat cured)

Identification

Designation

Fluorosilicone elastomer / Trifluoropropyl vinyl methyl silicone (FVMQ / SI / FSI) : heat cured

Tradenames

Silastic, Elastosil-R, Baysilone, GE LIM, Shincor LIM, Rhodorsil HCR, Tufel

General Properties

Density	1.4e3	-	1.5e3	kg/m^3
Price	* 1.3e3	-	1.55e3	CZK/kg

Composition overview

Composition (summary)

Polymer of dimethyl silicone, formula -(OSi(CH3)2)-, with some methyl groups substituted by gamma-trifluoropropyl groups, formula -(OSiCH3C2H4CF3)-, and some by vinyl groups as cure sites (crosslinking sites), formula -(OSiCH3CH=CH2)-. Typically compounded with 10-30% fumed silica (SiO2) with 100-325 m2/g surface area. Contains organic peroxide or platinum (addition) heat cure system for LIM (liquid injection molding) or HTV (high temperature vulcanization).

Base	Polymer			
Polymer class	Thermoset elastomer : rubber			
Polymer type	SI-FVMQ			
Polymer type full name	Silicone rubber, fluorovinylmethyl type			
% filler (by weight)	10	-	30	%
Filler type	Mineral			

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	70	-	90	%
Silica (fumed)	10	-	30	%

Mechanical properties

Young's modulus	0.005	-	0.05	GPa
Compressive modulus	* 0.005	-	0.05	GPa
Flexural modulus	0.005	-	0.05	GPa
Shear modulus	* 3e-4	-	0.02	GPa
Bulk modulus	* 1.5	-	2	GPa
Poisson's ratio	* 0.47	-	0.49	
Shape factor	1.7			
Yield strength (elastic limit)	8.2	-	12.1	MPa
Tensile stress at 100% strain	1.2	-	3.6	MPa
Tensile strength	8.2	-	12.1	MPa
Compressive strength	* 9.84	-	14.5	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 17.8	-	23.6	MPa
Elongation	270	-	675	% strain
Elongation at yield	270	-	675	% strain
Hardness - ShoreA	25	-	70	
Fatigue strength at 10^7 cycles	* 3.28	-	4.84	MPa
Fracture toughness	* 1.04	-	1.65	MPa.m^0.5
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.2	-	0.4	
Compression set at 23°C	5	-	10	%
Compression set at 70°C	5	-	10	%
Compression set at 100°C	5	-	10	%
Tear strength	17.5	-	46.4	N/mm

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

Fluorosilicone (FVMQ, heat cured)

Impact properties				
Impact strength, notched 23 °C	590	-	600	kJ/m^2
Impact strength, notched -30 °C	590	-	600	kJ/m^2
Impact strength, unnotched 23 °C	590	-	600	kJ/m^2
Impact strength, unnotched -30 °C	590	-	600	kJ/m^2
Thermal properties				
Glass temperature	-70	-	-60	°C
Maximum service temperature	200	-	250	°C
Minimum service temperature	-57	-	-47	°C
Thermal conductivity	0.2	-	0.3	W/m.°C
Specific heat capacity	1.05e3	-	1.1e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	* 250	-	300	µstrain/°C
Processing properties				
Linear mold shrinkage	2.4	-	4	%
Mold temperature	180	-	200	°C
Electrical properties				
Electrical resistivity	3e19	-	5e20	µohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	2.3	-	3.1	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	0.003	-	0.024	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	16	-	20	MV/m
Comparative tracking index	400	-	600	V
Optical properties				
Refractive index	1.4	-	1.44	
Transparency	Translucent			
Absorption, permeability				
Water absorption @ 24 hrs	0.1	-	0.15	%
Water vapor transmission	* 1.53	-	3.51	g.mm/m².day
Permeability (O2)	* 1.1e4	-	2.5e4	cm³.mm/m².day.atm
Durability: flammability				
Flammability	Self-extinguishing			
Durability: fluids and sunlight				
Water (fresh)	Excellent			
Water (salt)	Excellent			
Weak acids	Excellent			
Strong acids	Excellent			
Weak alkalis	Excellent			
Strong alkalis	Excellent			
Organic solvents	Acceptable			
Oils and fuels	Excellent			
UV radiation (sunlight)	Good			
Oxidation at 500C	Unacceptable			
Primary material production: energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	* 118	-	131	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 7.09	-	7.84	kg/kg
Water usage	190	-	571	l/kg

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

CES 2013 EDUPACK

Fluorosilicone (FVMQ, heat cured)

Material processing: energy

Polymer molding energy	* 14.1	-	15.5	MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 2.04	-	2.26	MJ/kg

Material processing: CO2 footprint

Polymer molding CO2	* 1.13	-	1.24	kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0.153	-	0.169	kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✗			
Recycle fraction in current supply	0.1			%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✗			
Heat of combustion (net)	* 10.6	-	11.1	MJ/kg
Combustion CO2	* 0.939	-	0.987	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegrade	✗			
A renewable resource?	✗			

Notes

Typical uses

Similar to regular silicone but where oil and fuel resistance is required.

Other notes

Strengths: oil resistance, high temperature stability, low temperature flexibility, chemical resistance, weatherability, ozone/oxidation, electrical performance, sealing capability
Limitations: strength, cost

Process information

Compression, injection, transfer molding; extrusion; calendering.
Heat cured: LIM (liquid injection molding) or HTV (high temperature vulcanizing)

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

Příloha č. 7: Materiálový list zkušebního vzorku pro tahovou zkoušku PA6

Material: Polyamide 6
Abbreviation: PA 6

Licharz engineering plastics

Short description of Material:

This extruded polyamide has good strength, impact resistance and damping behaviour. Due to its production method, it has higher moisture absorption and is less dimensionally stable and wear resistant than cast polyamide.

Application examples:

- wheels
- bearings
- gears
- hammer heads
- cover strips

Colours: natural, black

		dry / humid	
Mechanical values			
Density	ISO 1183	1,14	g/cm³
Yield stress	ISO 527	70 / 45	MPa
Elongation due to tearing	ISO 527	50 / 180	%
Modulus of elasticity resulting from tensile test	ISO 527	2.700 / 1.800	MPa
Modulus of elasticity resulting from bending test	ISO 178	2.500 / 1.400	MPa
Flexural strength	ISO 178	130 / 40	MPa
Impact strength[1]	ISO 179	o.B.	kJ/m²
Notched-bar impact strength	ISO 179	> 3 / o.B.	kJ/m²
Ball indentation hardness $H_{358/30}$	ISO 2039-1	160 / 70	MPa
Creep rate stress at 1% elongation[2]	DIN 53 444	> 8	MPa
Sliding friction coefficient against steel (dry running)[3]	—	0,38 / 0,42	—
Sliding wear against steel (dry running)[3]	—	0,23	µm/km
Thermal values			
Melting temperature	ISO 3146	+ 218	°C
Thermal conductivity	DIN 52 612	0,23	W/(K·m)
Specific thermal capacity	—	1,7	J/(g·K)
Coefficient of linear expansion[4]	—	8 - 9	$10^{-5}\cdot K^{-1}$
Operating temperature range (long-term)[5]	—	- 30 / + 100	°C
Operating temperature range (short-term)[5]	—	+ 140	°C
Fire behaviour	UL 94	HB	—
Electrical values			
Dielectric constant[6]	IEC 250	3,7 / 7	—
Dielectric loss factor[6]	IEC 250	0,031 / 0,3	—
Specific volume resistance	IEC 93	10^{15} / 10^{12}	Ω·cm
Surface resistance	IEC 93	10^{13} / 10^{10}	Ω
Dielectric strength	IEC 243	50 / 20	KV/mm
Creep current resistance	IEC 112	KA 3c / KA 3b	—
Miscellaneous data			
Moisture absorption in normal climate until saturated	DIN 53 715	3,0	%
Water absorption until saturated	ISO 62	10,0	%

[1]: Measured with a pendulum impact testing machine 0,1 DIN 51 222
[2]: Tension resulting in 1% total elongation after 1.000 h
[3]: against steel, hardened and ground , P = 0,05 MPa, V = 0,6 m/s, t = 60 °C near runnig surface
[4]: For a temperature range of + 23 °C to + 60 °C
[5]: Experience values established with finished parts that are not under any stress in heated air, depending on the type and form of heat exposure. short-term = max. 1 h, long-term = months
[6]: at 10^6 Hz

w.b. = without breakage
1 MPa = 1 N/mm²
1 g/cm³ = 1.000 kg/m³
1 kV/mm = 1 MV/m

Licharz GmbH
Industriepark Nord 15
D - 53567 Buchholz/Germany
Phone: ++49 / (0) 26 83 / 9 77 -0
Fax: ++49 / (0) 26 83 / 9 77 -111
Internet: www.licharz.de
E-Mail: info@licharz.de

As of 07/2003

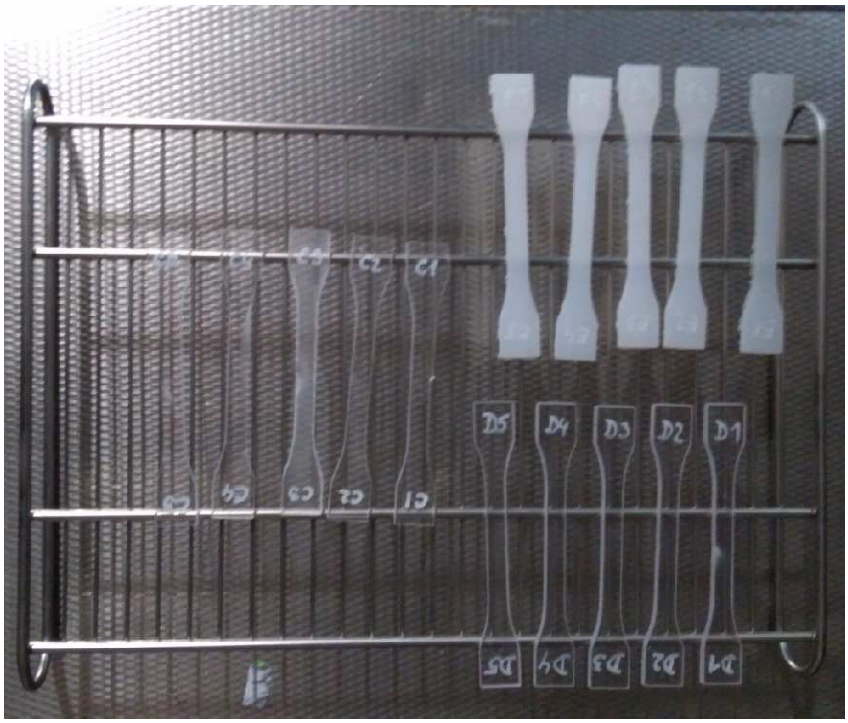
The contents of this datasheets are meant to give an overview of the product's properties. It reflects our current knowledge and may not be complete. The values should be taken as guide values because they are very dependent on surrounding conditions and machining methods. The values are in no way a legally binding assurance of the product's properties or its suitability for use in a specific application. All stated values are average values established from many individual tests. They are based on a temperature of 23 °C und 50 % RH. For specific applications, we recommend determining suitability by means of a trial.

Příloha č. 8: Fotodokumentace z experimentální tahové zkoušky

DOLNÍ

Příloha č. 9: Fotodokumentace z experimentálního umělého stárnutí plastů

Umístění vzorků do klimakomory



Graf průběhu umělého stárnutí v klimakomoře