Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek
Oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie

Srovnání různých typů polyurethanových lepidel a vliv změny teploty aplikace na mechanické vlastnosti

Bc. Martin Kolář

Diplomová práce

2021

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Martin Kolář**
Osobní číslo:	**C19507**
Studijní program:	**N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor:	**Technologie výroby a zpracování polymerů**
Téma práce:	**Srovnání různých typů polyurethanových lepidel a vliv změny teploty aplikace na mechanické vlastnosti**
Zadávající katedra:	**Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

Zásady pro vypracování

1. V literární rešerši přehledně popište problematiku polyurethanů se zaměřením na lepidla a tmely a jejich aplikace.
2. V teoretické části se dále zaměřte na teorii lepení a důležitost úpravy lepeného povrchu pro kvalitu lepeného spoje.
3. Charakterizujte různá lepidla na bázi jedno- a dvousložkových polyurethanů a připravte jednotlivé vzorky pro měření fyzikálně-mechanických vlastností daných lepidel a lepených spojů na různých adherendech. Zaměřte se na měření modulu pružnosti při různých teplotách.
4. Studujte vliv jednotlivých typů lepidel na změny mechanických vlastností s ohledem na změnu teploty.
5. Srovnejte a diskutujte zjištěné výsledky měřených vlastností v závislosti na typu lepidla a teploty aplikace.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Prokůpek, Dr.**
Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Datum zadání diplomové práce: **7. prosince 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **7. května 2021**

L.S.

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

doc. Ing. David Veselý, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2020

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 17.6.2021. Bc. Martin Kolář

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Luboši Prokůpkovi, Dr. za vedení práce, cenné rady a připomínky, které mi během její realizace poskytoval.

Děkuji Ing. Viktorovi Hladkému ze společnosti Matrix a.s. za odbornou pomoc při tvorbě této práce.

Diplomová práce vznikla za podpory projektu Modernizace praktické výuky a zkvalitnění praktických dovedností v technicky zaměřených studijních programech, reg. číslo CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002458 operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií.

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

ANOTACE

Diplomová práce se zaobírá studiem polyurethanových lepidel a jejich mechanických vlastností. První část této práce je věnována polyurethanům, popisuje jejich výrobu, vlastnosti, jejich využití s důrazem na lepidla a tmely. V teoretické části je také popsána teorie lepení se zaměřením na důležitost povrchových úprav pro kvalitu lepeného spoje.

V experimentální části je představeno osm lepicích systémů, u kterých jsou sledovány mechanické vlastnosti, charakteristické teploty, studují se zde také mechanické vlastnosti lepených spojů, vytvořených za použití těchto lepicích systémů, a vliv změny teploty na tyto vlastnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polyurethanová lepidla, lepené spoje, pevnost ve smyku, pevnost v tahu, adherendy, lepení

COMPARISON OF POLYURETHANE ADHESIVES AND THE INFLUENCE OF TEMPERATURE CHANGE TO THEIR MECHANICAL PROPERTIES

ANNOTATION

This thesis deals with a study of polyurethane adhesives and their mechanical properties. First part is dedicated to polyurethanes, it describes their manufacturing, properties, their usage with emphasis on adhesives and sealants. An adhesive bonding technology with emphasis on importance of surface preparation for a great quality of joint is also described in the theoretical part.

Eight polyurethane adhesives are presented in the experimental part. Their mechanical properties, characteristic temperatures, mechanical properties of joints, made with these adhesives and the influence of temperature change to these properties are also studied.

KEYWORDS

Polyurethane adhesives, glued joints, shear strenght, tensile strenght, adherends, gluing

OBSAH

Úvod **10**

1 Teoretická část **12**

1.1 Základní suroviny pro výrobu polyurethanů 12

1.1.1 Isokyanáty 12

1.1.1.1 Procesy bez fosgenu 13

1.1.2 Polyoly 15

1.1.2.1 Polyetheralkoholy a polyesteralkoholy 15

1.1.2.2 Ostatní polyoly 16

1.2 Syntéza polyurethanů 17

1.2.1 Síťování polyurethanů vícefunkčními polyoly 20

1.2.2 Katalyzátory 20

1.2.3 Nadouvadla 21

1.2.4 Chain extendery 21

1.2.5 Plniva 21

1.3 Aplikace polyurethanů 22

1.3.1 Pěny a lehčené hmoty 22

1.3.1.1 Lehčené hmoty v automobilovém průmyslu 23

1.3.2 Tmely 24

1.3.3 Nátěry 25

1.3.4 Lepidla 27

1.3.4.1 Bezrozpouštědlové systémy 28

1.3.4.2 Rozpouštědlové systémy 28

1.3.4.3 Speciální aplikace 29

1.4 Technologie lepení 29

1.4.1 Základní aspekty 29

1.4.2 Výběr vhodného lepidla 30

1.4.3 Design lepeného spoje 31

1.4.4 Porušení lepeného spoje 32

1.4.5 Příprava lepeného povrchu a adheze 32

1.4.5.1 Fyzikální mechanické úpravy povrchů 33

1.4.5.2 Fyzikální nemechanické úpravy povrchů 33

2 Experimentální část **34**

2.1 Použité suroviny 34
2.1.1 Použitá lepidla 34
2.1.1.1 Betamate 2810 MV 34
2.1.1.2 Betaforce 2850 M 34
2.1.1.3 Betaforce 2816S 35
2.1.1.4 Betaseal 1407 36
2.1.1.5 Betaseal HV 3 36
2.1.1.6 Betamate 7170 + Accel 2 36
2.1.2 Použité chemikálie 37
2.1.2.1 Betaprime 1707 37
2.1.2.2 Betaprime 5404 38
2.1.2.3 Čisticí prostředky 38
2.1.3 Použité adherendy 38
2.2 Příprava vzorků 38
2.2.1 Příprava vzorků pro měření pevnosti ve smyku – polykarbonát 38
2.2.2 Příprava vzorků pro měření pevnosti ve smyku – kovy 40
2.2.3 Příprava vzorků pro měření pevnosti v tahu, TMA, DMA a tvrdosti Shore 40
2.3 Metody měření 41
2.3.1 Měření pevnosti ve smyku 41
2.3.2 Měření pevnosti v tahu 42
2.3.3 Měření TMA 42
2.3.4 Měření DMA 43
2.3.5 Měření tvrdosti Shore 44
2.3.6 Měření doby gelace 44
3 Výsledky a diskuse 45
3.1 Výsledky měření pevnosti ve smyku 45
3.1.1 Betamate 2810 MV 45
3.1.2 Betaforce 2850 M 47
3.1.3 Betaforce 2816S 49
3.1.4 Betaseal 1407 51
3.1.5 Betaseal HV 3 53
3.1.6 Betamate 7170 55
3.1.7 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 58
3.1.8 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 60

3.1.9 Vzájemné srovnání mechanických vlastností ve smyku....62
3.2 Výsledky měření pevnosti v tahu....63
3.2.1 Betamate 2810 MV....63
3.2.2 Betaforce 2850 M....65
3.2.3 Betaforce 2816S....66
3.2.4 Betaseal 1407....68
3.2.5 Betaseal HV 3....69
3.2.6 Betamate 7170....70
3.2.7 Betamate 7170 + 1 % Accel 2....71
3.2.8 Betamate 7170 + 3 % Accel 2....72
3.2.9 Vzájemné srovnání mechanických vlastností v tahu....73
3.3 Výsledky měření TMA....75
3.4 Výsledky měření DMA....76
3.5 Výsledky měření tvrdosti Shore....79
3.6 Výsledky měření doby gelace....79
Závěr....81
Použitá literatura....83
Seznam obrázků....88
Seznam tabulek....90
Seznam grafů....91
Seznam vzorců....93
Seznam rovnic....94
Seznam zkratek....95

Úvod

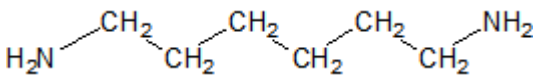
Polyurethany spadají do obsáhlé skupiny polyesteramidů, tedy polymerů, které jsou z chemického hlediska považovány za kombinaci polyesterů a polyamidů. Připravují se z vícefunkčních isokyanátů a látek obsahujících hydroxylové skupiny. Lineární polyurethany mají střední molární hmotnost obvykle v rozsahu od 7000 g/mol do 12 000 g/mol. Polyurethany se střední molekulovou hmotností, přesahující 15 000 g/mol, jsou většinou již slabě zesíťovány.

Ve srovnání s polyamidy vykazují polyurethany nižší navlhavost, lepší elektroizolační vlastnosti a lepší odolnost proti vodě, kyselinám i povětrnosti. Zpracovávají se vstřikováním, lisováním a zvlákňováním.

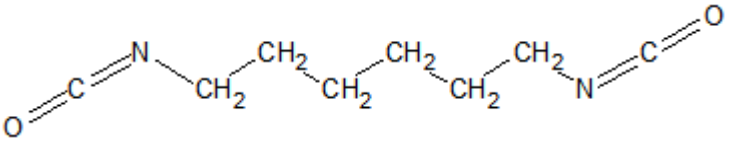
Mezi nejznámější využití polyurethanů patří polyurethanové lehčené hmoty. Tyto hmoty se vyrábějí reakcí diisokyanátů, polyhydroxysloučenin a vody. Jako polyhydroxysloučeniny zde však nevystupují polymerní dioly, ale polyetheralkoholy, či polyesteralkoholy, získávané většinou reakcí kyseliny adipové s diethylenglykolem. Jako diisokyanáty zde vystupují převážně toluendiisokyanáty. Polyurethanové pěny se dělí na měkké a tvrdé. Tvrdé pěny nacházejí využití jako izolační materiály ve stavebnictví a strojírenství, měkké pěny se používají k laminování textilu, jako matrace nebo pro obalové účely.

Lze tedy vyrobit polyurethany tuhé, měkké, lineární i síťované. Z těchto důvodu polyurethany zastupují širokou škálu vlastností, mezi které patří odolnost vůči oděru, dobrá adheze k velké řadě materiálu, včetně kovových a polymerních, čehož je využíváno při výrobě polyurethanových lepidel, či stálost ve vodném prostředí. [1]

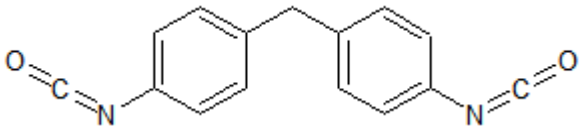
Polyurethany poprvé popsal Otto Bayer (1902–1982) v roce 1937. První polyurethan vznikl z hexan-1,6-diaminu (vzorec 1) a hexan-1,6-diisokyanátu (vzorec 2). V té době používané diisokyanáty difenylmethan-4,4´-diisokyanát (vzorec 3) a naftalen-1,5-diisokyanát (vzorec 4) jdou dodnes klíčovými produkty v polyurethanovém průmyslu. [2]



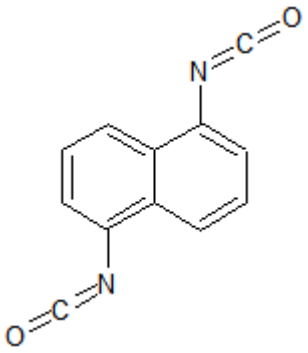
Vzorec 1 Hexan-1,6-diamin



Vzorec 2 Hexan-1,6-diisokyanát



Vzorec 3 Difenylmethan-4,4´-diisokyanát



Vzorec 4 Naftalen-1,5-diisokyanát

Kromě již zmíněných aplikací dosáhly polyurethany v poměrně krátké době svého vývoje rozsáhlého použití také v oblastech elastomerů, syntetických usní, licích pryskyřic, lepidel, nátěrových hmot, a dokonce se uplatnily i jako materiál k výrobě pneumatik.

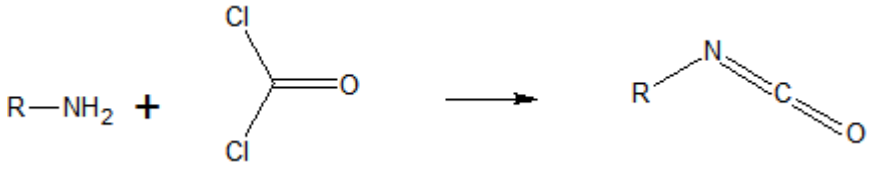
1 Teoretická část

1.1 Základní suroviny pro výrobu polyurethanů

Základními surovinami pro výrobu polyurethanů jsou di/isokyanáty a polyoly.

1.1.1 Isokyanáty

Vlastnosti polyurethanů ve velké míře závisí na vlastnostech diisokyanátů, z nichž jsou vyrobeny. Isokyanáty se obecně připravují fosgenací příslušných aminů. Schéma reakce je zobrazeno v následující rovnici 1.

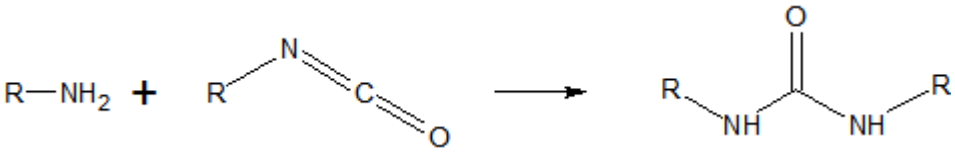


Rovnice 1 Výroba diisokyanátu

V určité míře probíhají i vedlejší reakce, jako vznik solí (rovnice 2).

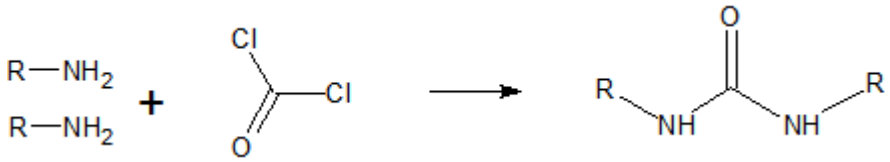
Rovnice 2 Vznik solí

Také může reagovat vzniklý isokyanát s aminem za vzniku močoviny (rovnice 3).



Rovnice 3 Vznik močoviny z isokyanátu a aminu

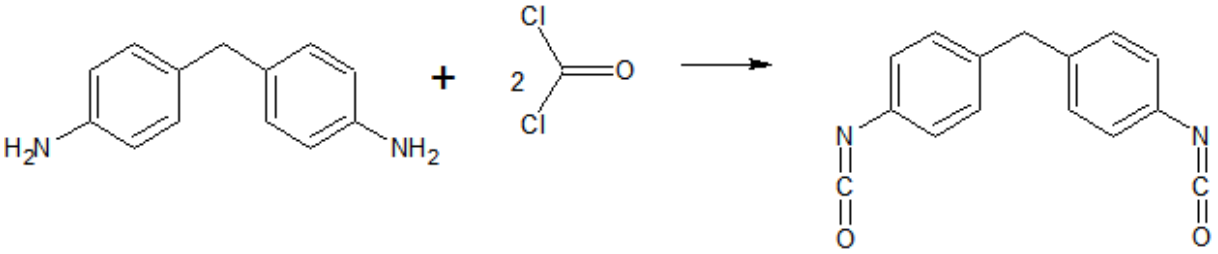
Popřípadě může močovina vznikat z aminů a fosgenu (rovnice 4).



Rovnice 4 Vznik močoviny z aminu a fosgenu

Pro výrobu polyurethanů se používají jak alifatické, tak i cykloalifatické či aromatické poly/diisokyanáty. [2][3]

V oblasti polyurethanových lepidel se velmi často jedná o difenylmethan-4,4´-diisokyanát, též označovaný jako MDI (Vzorec 3), či jeho variantu PMDI, označovanou jako „polymerní MDI“. MDI se připravuje fosgenací 4,4‘-methylendianilínu, označovaného jako MDA (rovnice 5). [4]



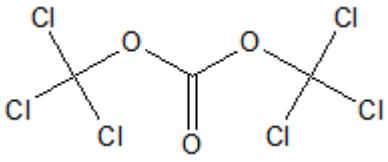
Rovnice 5 Příprava MDI

Destilací této směsi vzniká směs, zvaná PMDI. V této směsi je zastoupen jak symetrický 4,4‘-MDI, tak v menší míře také asymetrický 2,4‘-MDI a v ještě menší míře také 2,2‘-MDI. Mezi další isokyanáty, používané v oblasti polyurethanových lepidel, lze zařadit HDI (hexamethylendiisokyanát), TDI (toluendiisokyanát), IPDI (isoforondiisokyanát) či MIT (methylentrifenyltriisokyanát). [5]

Reaktivita aromatických diisokyanátů je vyšší, než cykloalifatických nebo alifatických, polyurethany, z nich vytvořené, také dosahují ve většině případů nejlepších vlastností. Avšak vlastnosti jako prodloužení při přetržení nebo odolnost vůči nárazu jsou lepší u cykloalifatických a alifatických. Nevýhodou aromatických diisokyanátů je také jejich poměrně nízká stabilita vůči UV záření, což se při delší expozici projevuje žloutnutím produktů. Toto žloutnutí způsobuje právě přítomnost aromatických struktur. [3]

1.1.1.1 **Procesy bez fosgenu**

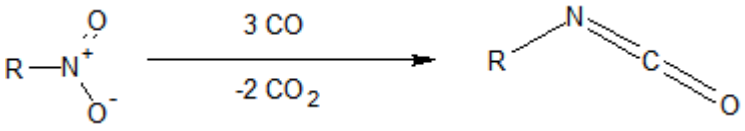
Jelikož syntéza isokyanátů vyžaduje přítomnost nebezpečných látek, například fosgenu, vznikl požadavek na nalezení alternativní metody syntézy, která by nevyžadovala přítomnost těchto látek. Využití nalezly oligomery fosgenu, například trifosgen (vzorec 5).



Vzorec 5 Trifosgen

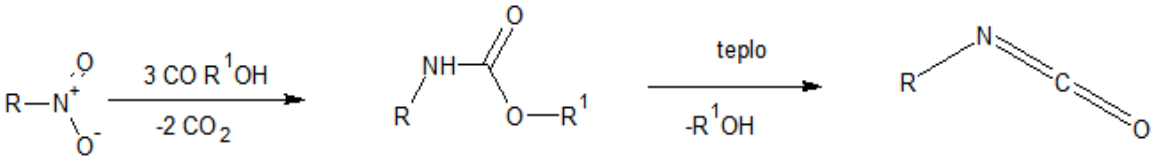
Využití těchto oligomerů je ale pouze v laboratorním měřítku, pro průmyslové technologie byly navrženy jiné postupy.

Prvním postupem je redukční karbonylace nitrosloučenin, která je schematicky popsána následující rovnicí. Tento postup byl od roku 1962 do devadesátých let předmětem rozsáhlých průmyslových studií kvůli poptávce pro nový, bezfosgenový způsob přípravy isokyanátů. Cílem byla levná, jednokroková syntéza z odpovídajících nitro prekurzorů (rovnice 6). [6][7]



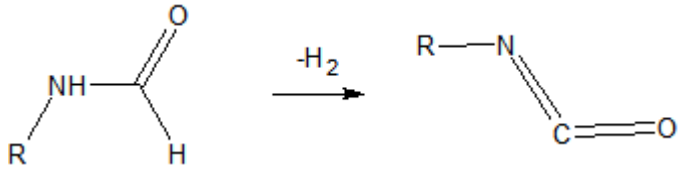
Rovnice 6 Redukční karbonylace nitrosloučenin

Později však byla upřednostňována dvoukroková syntéza přes urethany (rovnice 7).



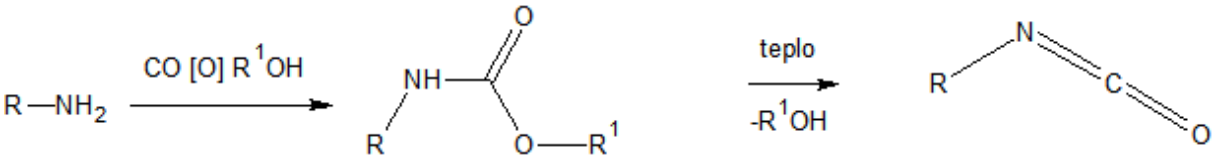
Rovnice 7 Dvoukroková bezfosgenová syntéza

Druhým navrženým postupem byla dehydrogenace formamidů (rovnice 8).



Rovnice 8 Dehydrogenace formamidů

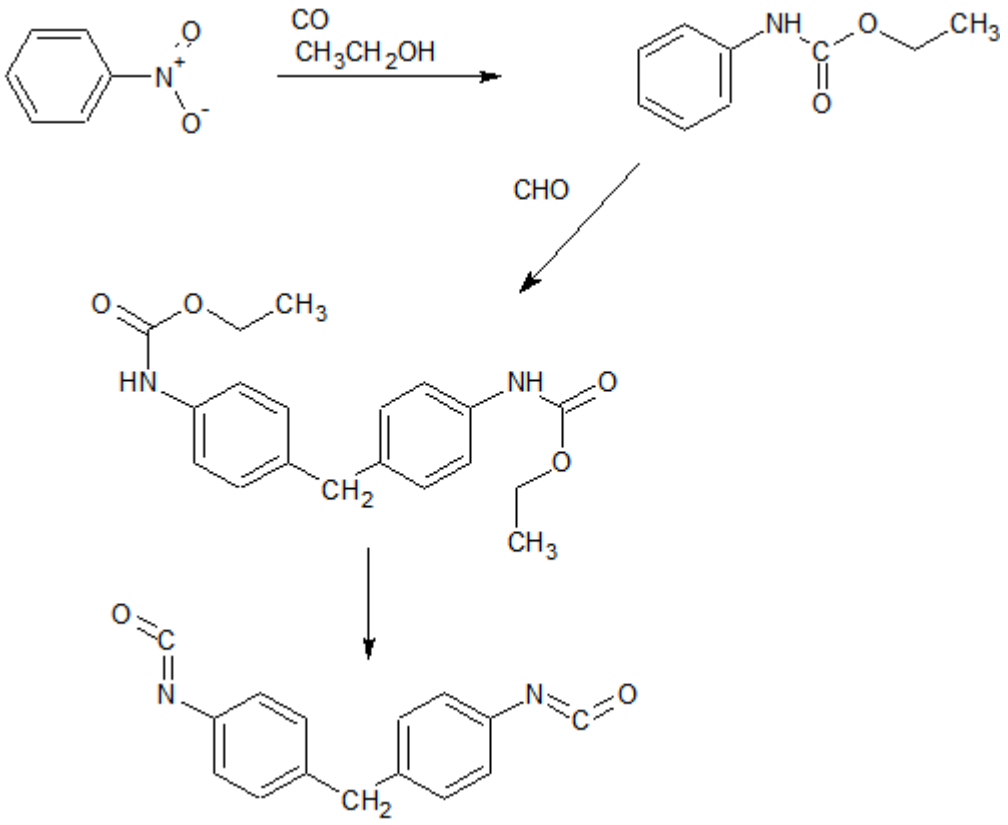
Dalším způsobem byla oxidační karbonylace aminů (rovnice 9).



Rovnice 9 Oxidační karbonylace aminů

Nejdůležitější alifatické diisokyanáty, HDI a IPDI, mohou být připraveny dvoukrokovou syntézou přes močovinu bez použití fosgenu. [8]

Následující schéma zobrazuje bezfosgenovou syntézu diisokyanátu MDI z nitrobenzenu. Z oxidu uhelnatého a ethanolu je formován ethyl urethan, který je následně karbonylační reakcí dimerizován. Zahřátím následně dochází k dekompozici urethanu na isokyanát a alkohol (rovnice 10). [2]



Rovnice 10 Syntéza MDI z nitrobenzenu

V současné době však nejsou bezfosgenové postupy průmyslově využívány z důvodu velkého množství vedlejších produktů, nedostatečné stability katalyzátorů, nízké selektivity a efektivity. [8]

1.1.2 Polyoly

1.1.2.1 Polyetheralkoholy a polyesteralkoholy

Jako polyalkoholové složky zde vystupují hlavně polyetheralkoholy a polyesteralkoholy. Jedná se většinou o viskózní kapaliny s molekulovou hmotností od 200 do 5000 g/mol. Polyalkoholová složka má velký vliv na degradační vlastnosti výsledného polyurethanu. [9]

Polyesteralkoholy jsou připravovány polyesterifikací dikarboxylových kyselin (hlavně kyseliny adipové a ftalanhydridu) a přebytku diolů (diethylenglykolu, 1,6-hexandiolu), aby došlo k obsazení konců řetězců hydroxylovými skupinami. Částečné nahrazení diolů triolem může způsobit rozvětvení produktu. Produkty, vytvrzované polyethery, mají vyšší odolnost vůči povětrnosti, vyšší tvrdost i lepší odolnost vůči zvýšeným teplotám, avšak snáze hydrolyzují.

Polyetheralkoholy se vyrábějí polymerací propylenoxidu či jeho směsi s ethylenoxidem. Funkčnost výsledných produktů se liší dle iniciující látky, na které dochází k adici propylenoxidu. Lineární polyetherdiol vzniká z propylenoxidu a vody, je-li použita látka s vícero aktivními vodíky, výsledkem budou rozvětvené vícefunkční polyetheralkoholy. Mezi tyto látky patří například pentaerythritol. [10]

Výběrem polyalkoholové složky se dají snadno ovlivnit vlastnosti výsledného produktu. Například modifikované polyethery, obsahující naroubovaný styren se používají u pěn k modifikaci pevnosti. Polyesteralkoholy, vyrobené polykondenzací di nebo polykarboxylových kyselin s di nebo více funkčními alkoholy jsou používány k výrobě elastických pěn.

Další alkoholy, jako například glycerol, sorbitol, modifikované přírodní produkty jako například ricinový olej se přidávají za účelem prodloužení řetězce. [11]

1.1.2.2 **Ostatní polyoly**

Mezi další polyoly lze zařadit uhlovodíkové polyoly, získávané živou aniontovou polymerací butadienu, iniciovanou sodnou solí naftalenu. Konce řetězců jsou terminovány přídavkem ethylenoxidu nebo propylenoxidu. Přidáním vody vznikne finální polybutadien s primárními a sekundárními hydroxylovými skupinami. Tento hydroxy-terminovaný polybutadien lze také připravit radikálovou polymerací butadienu, iniciovanou peroxidem vodíku. Hlavní výhodou uhlovodíkových polyolů je jejich chemická odolnost. Mají též velmi nízkou teplotu skelného přechodu.

Další malou skupinu tvoří polythioethery, které se připravují kondenzací thiodiglykolu s jiným glykolem, dikarboxylovou kyselinou, formaldehydem nebo aminoalkoholem.

Akrylové polyoly lze připravit kopolymerací akrylových monomerů, například ethylakrylátu, n-butylakrylátu, kyseliny akrylové nebo methylmethakrylátu. Akrylové polyoly nacházejí uplatnění u dvoukomponentních nátěrových systémů.

Jako polyol lze také použít tzv. zkapalněné dřevo, které se získává zkapalněným benzylovaného dřevěného odpadu za použití dibazických esterů jako rozpouštědla s kyselinou chlorovodíkovou jako katalyzátorem. Zkapalněné dřevo se používá jako diol pro diisokyanáty TDI, IPDI a HDI. Polyurethany ze zkapalněného dřeva mají vyšší teplotní stabilitu než tradiční polyurethany.

V poslední době své uplatnění také nacházejí přírodní zdroje hydroxylových sloučenin, a to zvláště z ekonomických a ekologických důvodů. Využití zde nachází sójový olej. Polyoly

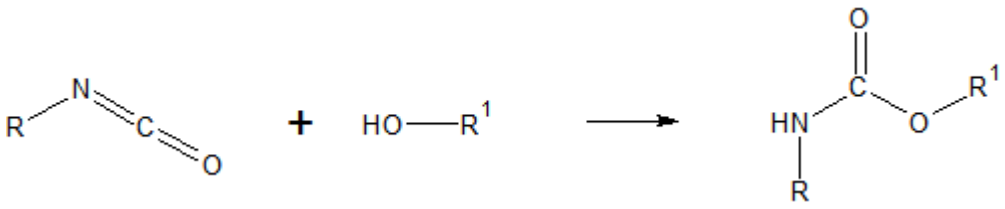
z epoxidovaného sójového oleje se získávají otevřením oxiranového kruhu pomocí methanolu. Dalším zdrojem polyolů je například ricinový olej. [2]

1.2 Syntéza polyurethanů

Polyurethany jsou polymery, charakteristické přítomností většího množství urethanových vazeb. Syntéza polyurethanů vyžaduje dvě hlavní komponenty, isokyanát (typicky diisokaynát) a dvou nebo vícefunkční polyol s dvěma nebo více hydroxylovými koncovými skupinami. Polyurethan lze také modifikovat přidáním třetí komponenty, takzvaného „chain extenderu“, který zajišťuje prodloužení řetězce. Použití vhodných vícefunkčních polyolů, isokyanátů nebo chain extenderů lze docílit zesítění nebo rozvětvení výsledného produktu. [12]

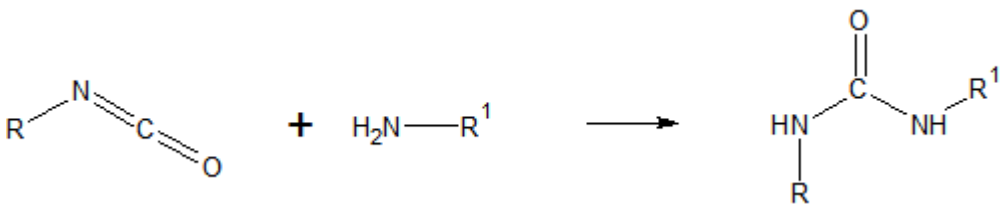
Reakce mezi těmito komponentami vede ke vzniku segmentovaných kopolymerů, charakteristických střídáním tvrdých a měkkých segmentů. Tvrdé segmenty jsou založeny na blocích, zformovaných reakcí di nebo vícefunkčního isokyanátu s chain extenderem, zatímco bloky, založené na polyolech, tvoří měkké segmenty. Výsledkem termodynamické nekompatibility tvrdých a měkkých segmentů je charakteristická dvoufázová morfologie polyurethanů.

V rovnici 11 je popsána hlavní růstová reakce isokyanátu s alkoholem.



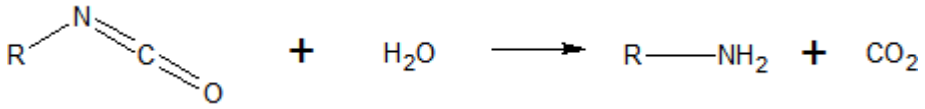
Rovnice 11 Reakce isokyanátu s alkoholem

Tato růstová reakce je však doprovázena dalšími vedlejšími reakcemi. Isokyanáty totiž reagují s mnoha sloučeninami, obsahujícími aktivní vodíkové atomy. S aminy reagují za vzniku substituovaných močovin (rovnice 12).



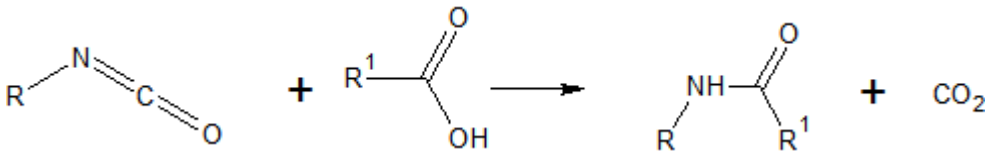
Rovnice 12 Reakce isokyanátu s aminem

Reakcí s vodou vznikají aminy za uvolnění oxidu uhličitého (blowing reaction, rovnice 13).



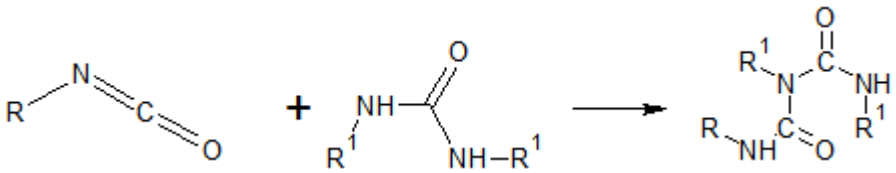
Rovnice 13 Reakce isokyanátu s vodou

Vzniklý amin může reagovat s další molekulou isokyanátu, přičemž dojde ke vzniku substituované močoviny. Reakcí s karboxylovými kyselinami vytvářejí isokyanáty substituované amidy a oxid uhličitý (rovnice 14).



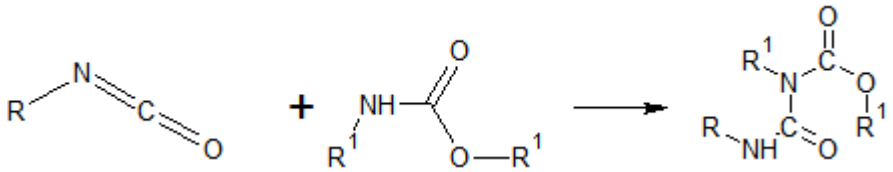
Rovnice 14 Reakce isokyanátu s karboxylovou kyselinou

Isokyanát může za určitých podmínek reagovat i se substituovanou močovinou za vzniku N-substituovaného biuretu (rovnice 15).

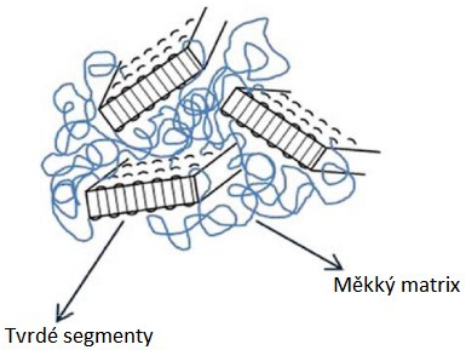


Rovnice 15 Reakce isokyanátu se substituovanou močovinou

Isokyanát také může obdobně reagovat s vodíkem z urethanové skupiny za vzniku N-substituovaných esterů kyseliny allofanové (rovnice 16). [10]



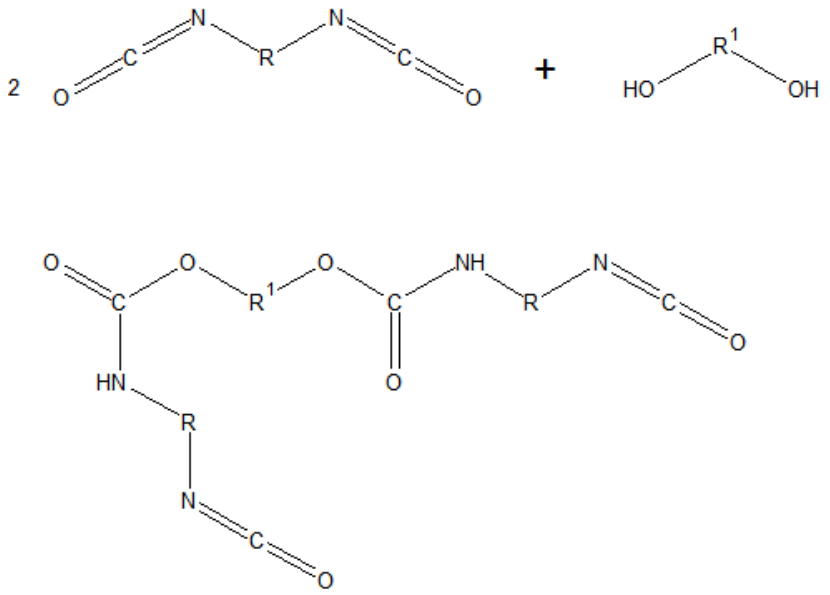
Rovnice 16 Reakce isokyanátu s urethanovou skupinou



Obrázek 1 Segmenty polyurethanu

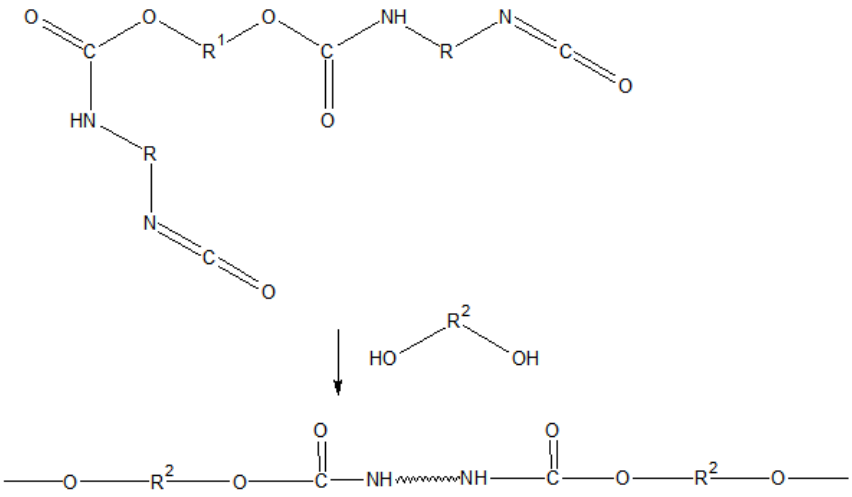
Obrázek 1 zobrazuje polyurethanové tvrdé segmenty, dispergované v měkkém matrixu. [13][14]

Komerčně se polyurethany připravují buďto jednokrokovou, nebo dvoukrokovou procedurou. Jednokroková procedura je z hlediska průmyslové náročnosti jednodušší, avšak má nevýhody z chemického a reakčního hlediska, neboť je při ní obtížné regulovat a kontrolovat vlastnosti finálního produktu. Proto je více používána syntéza dvoukroková. Zde v prvním kroku dochází k reakci polyolu s diisokyanátem za vzniku kapalného, velmi viskózního prepolymeru (rovnice 17).



Rovnice 17 Vznik prepolymeru

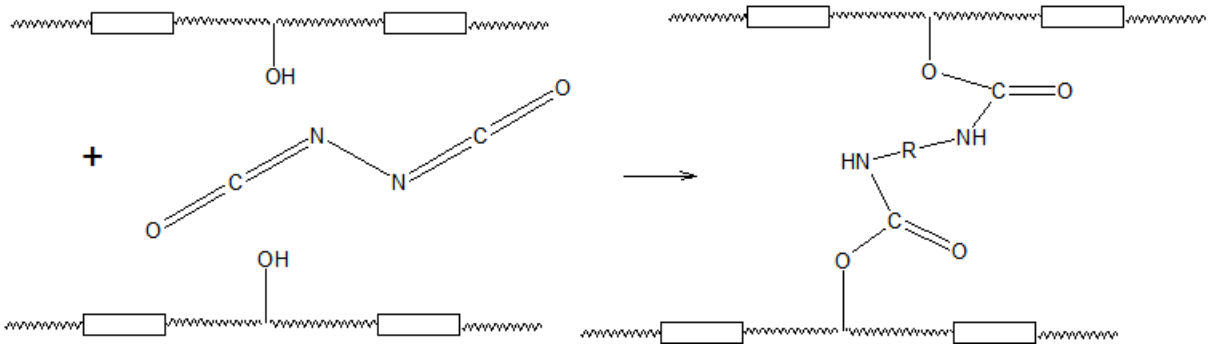
V druhém kroku prepolymer reaguje s diolem nebo diaminovým chain extenderem za vzniku blokového kopolymeru (rovnice 18). [15]



Rovnice 18 Reakce prepolymeru s diolem

1.2.1 Síťování polyurethanů vícefunkčními polyoly

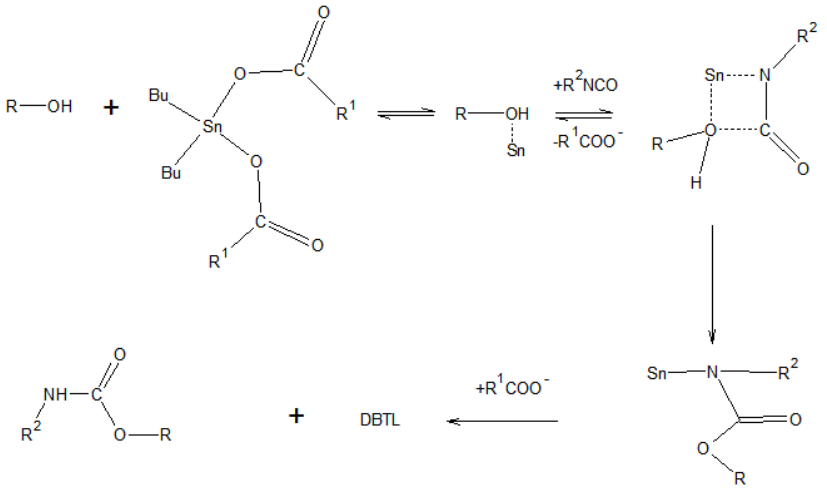
Síťování polyurethanů za použití vícefunkčních polyolů probíhá v měkkých segmentech a způsobuje zesítění hlavního řetězce prostřednictvím urethanových vazeb. Struktura a výsledné vlastnosti vzniklého polyurethanu silně závisí na funkčnosti a molekulové hmotnosti použitého polyolu. Síťování pomocí těchto vícefunkčních polyolů má efekt na snížení hustoty zesítění v oblasti tvrdých segmentů. Reakce probíhá dle rovnice 19. [16]



Rovnice 19 Zesítění polyurethanu pomocí vícefunkčních polyolů

1.2.2 Katalyzátory

Nejpoužívanějšími katalyzátory v oblasti polyurethanové chemie, používané v průmyslu, jsou katalyzátory, založené na terciálních aminech (TEA), 1,4-diazobicyklooktan (DABCO) či organocíničité sloučeniny (dibutylcíndilaurát, oktoát cínatý). Tyto katalyzátory urychlují reakci mezi isokyanátem a hydroxylovými skupinami. V oblasti polyurethanových elastomerů nacházejí uplatnění hlavně katalyzátory, založené na organokovových sloučeninách. Tyto katalyzátory formují přechodný komplex s isokyanátovou a hydroxylovou skupinou (rovnice 20). [17]



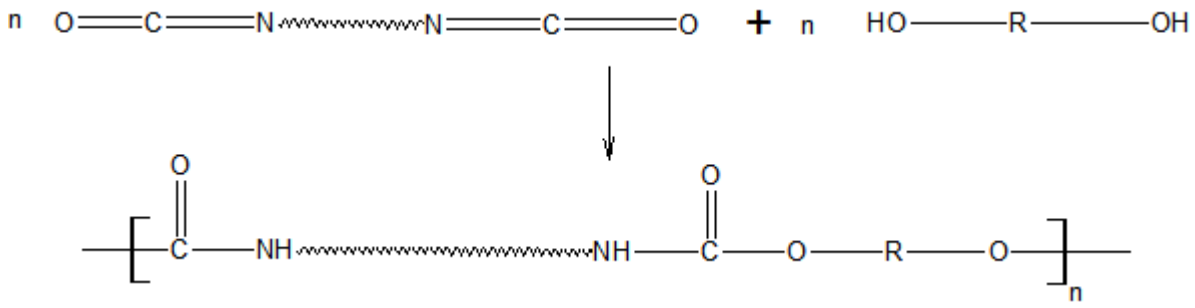
Rovnice 20 Schéma katalýzy pomocí dibutylcíndilaurátu

1.2.3 **Nadouvadla**

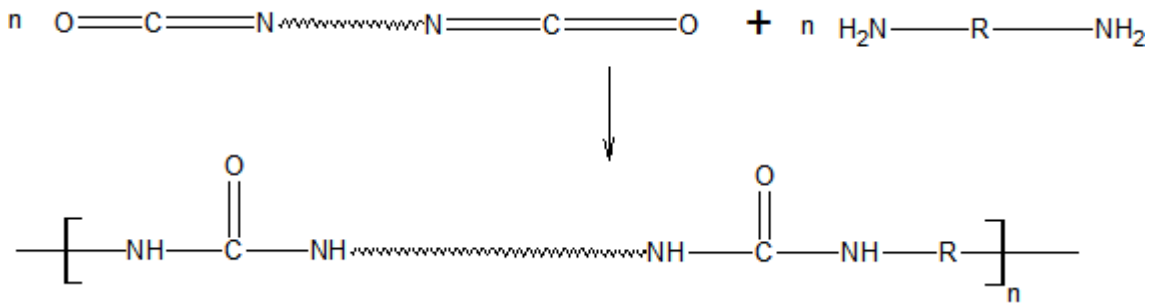
V technologii polyurethanových pěn se jako nadouvadlo často využívá oxid uhličitý, který je produktem reakce isokyanátu s vodou. Dalšími využívanými nadouvadly jsou freony (CFC), které jsem ovšem vzhledem ke své škodlivosti předmětem mnoha regulačních protokolů. HCFC (částečně halogenované chlor fluorované uhlovodíky, tzv. „měkké freony“) jsou méně chemicky stabilní, avšak rozkládají se v nižších vrstvách atmosféry a nejsou ohrožením pro ozonovou vrstvu. Použití též nacházejí fluorované uhlovodíky HCF, u nichž není prokázána škodlivost k životnímu prostředí. Obecnou nevýhodou používání uhlovodíků jako nadouvadel je jejich hořlavost. [16]

1.2.4 **Chain extendery**

Chain extendery se u polyurethanů používají k vytvrzení kapalného prepolymeru s koncovými isokyanátovými skupinami do výsledného produktu. Obvykle se jako chain extender používají dioly, trioly nebo diaminy (rovnice 21 a 22). [18]



Rovnice 21 Reakce isokyanátového prepolymeru s polyolem



Rovnice 22 Reakce isokyanátového prepolymeru s diaminem

1.2.5 **Plniva**

Plniva se používají k modifikaci mechanických vlastností výsledných produktů. Mezi plniva, používaná v polyurethanových systémech, patří například korek a saze. Přídavek korku do polyurethanových systémů vede ke zvýšení Youngova modulu pružnosti a ke snížení prodloužení

při přetržení. Polyurethanové systémy s korkem mají též výborné tlumící vlastnosti, proto nacházejí uplatnění například v izolacích pro železnice a podzemní dráhy.

Mezi další používaná plniva patří agar, uhlíkové nanomateriály či zeolity. Zeolity se uplatňují hlavně při modifikacích struktur polyurethanových membrán. [2]

1.3 Aplikace polyurethanů

1.3.1 Pěny a lehčené hmoty

Polyurethanové lehčené hmoty se připravují reakcí polyolů s koncovými hydroxylovými skupinami – glykolů, polyesterů, lze však použít i např. ricinový olej s diisokyanáty (a vodou). V reakční směsi jsou přítomny též katalyzátory a povrchově aktivní látky. Jako jeden z nejčastěji používaných diisokyanátů zde vystupuje toluen diisokyanát. V průmyslové výrobě se používají dvě metody, metoda jednokroková a metoda dvoukroková, která zahrnuje použití prepolymeru. V případě jednokrokové metody jsou všechny reakční komponenty smíchány dohromady a jejich reakce vede ke vzniku lehčené hmoty. Tato technologie však s sebou přináší určité nevýhody; reakce je rychlá, špatně se její proces kontroluje, reakční komponenty nemusí být dobře dispergovány. Reakce je navíc velmi exotermická, což může v krajních případech vést až k zuhelnatění ve středu vzniklé lehčené hmoty. Metoda však přináší určité výhody; je jednodušší než metoda dvoukroková, navíc reakční směs má velmi dobré tokové vlastnosti.

Ve dvoukrokové prepolymerové metodě spolu reaguje polyol a diisokyanát za vzniku nízkomolekulární kapalné pryskyřice. Následně jsou k této pryskyřici přidány katalyzátory, voda a emulgátory, čímž dojde ke zpěnění.

Reakce je rychlá (60 sekund). Voda zde vystupuje nadouvadlo (blowing agent), lze ji však nahradit například již zmíněnými freony nebo rozložitelnými látkami, jako například nitroso, azo či borohydridovými sloučeninami.

Exotermní krok reakce generuje plyn a vytváří expandovanou strukturu. Voda reaguje s isokyanátem za vzniku kyseliny karbamové, která se rozkládá na primární amin a oxid uhličitý. Přes urethanové vazby též může dojít k zesítění (vznikem allofanátů). Toto zesítění určuje charakteristické vlastnosti lehčené hmoty. [19] [20]

Příprava lehčených hmot nejčastěji probíhá v kontinuálně pracujících zpěňovacích strojích. Do míchací hlavy je dávkován kapalný isokyanát, polyol, voda a pomocné látky. Míchadlem s vysokými otáčkami se vytvoří vysokoviskózní kapalina, která je lita do forem, kde se vypění. Je

nutné zajištění odsávání par isokyanátů. Tvrdé pěny se připravují v otevřených či uzavřených formách. [10]

1.3.1.1 **Lehčené hmoty v automobilovém průmyslu**

Lehčené polyurethanové hmoty nacházejí velké uplatnění v automobilovém průmyslu, a to hlavně jako materiály pro odpružení v sedačkách (obrázky 2 a 3) či volantech. V historii se používaly kožené sedačky, připevněné pružinami k rámům. Časem však stoupaly požadavky na komfort pasažérů a polyurethanové lehčené hmoty se staly dominantním materiálem v tomto segmentu. Flexibilní polyurethanové lehčené hmoty jsou pro tyto účely vhodné vzhledem k jejich nízké hustotě, nízké ceně a dobrým mechanickým vlastnostem.

Velmi důležitými mechanickými vlastnostmi lehčených hmot v tomto odvětví jsou pevnost v tlaku a modul pružnosti v tlaku. Pevnost v tlaku musí být taková, aby materiál zvládl bez problémů podporovat celou hmotnost pasažéra. Lehčené hmoty jsou navrhovány tak, aby unesly celou jeho váhu, aniž by došlo k jejich úplnému stlačení, neboť to by vedlo k diskomfortu. Ideální materiál pro tyto aplikace by měl mít schopnost vrátit se do původního tvaru po odstranění zatížení. Polyurethanové lehčené pěny vykazují vysokou míru viskoelasticity a do svého původního tvaru se po nějakém čase vrátí.

Obrázek 2 Sedačka [21]

Obrázek 3 Vnitřek sedačky z polyurethanové pěny [22]

Polyurethanové lehčené hmoty však nacházejí i další uplatnění v automobilovém průmyslu. Jsou využívány jako absorbéry energie různých částí automobilu, jako třeba nárazníků či stropů z důvodu zvýšení bezpečnosti pasažérů v případě nehody. Zde se využívá jejich kompresních schopností, což vede k pohlcení velkého množství energie. Když je na polyurethanovou pěnu v případě nehody aplikována síla, její struktura umožnuje rozsáhlou deformaci, přičemž dojde

k pohlcení a disipaci energie. V tomto případě nacházejí uplatnění spíše rigidní verze polyurethanových lehčených hmot. [23]

1.3.2 **Tmely**

Polyurethanové tmely a lepidla se dodávají jako jedno nebo vícekomponentní. Jednokomponentní tmel je založen na prepolymeru, jehož isokyanátové skupiny po aplikaci reagují se vzdušnou vlhkostí za vzniku polyurethanu. Dvoukomponentní tmely jsou většinou založeny na kapalném prepolymeru, obsahujícím koncové isokyanátové skupiny, pigmenty, plniva či další přísady a polymeru s koncovými hydroxylovými skupinami, obsahujícím pigmenty a katalyzátory. Veškeré komponenty jsou míchány za zvýšených teplot ve vakuu, aby se předešlo předčasnému zesítění. Tmely, založené na polyesterech jsou tvrdší a pevnější než tmely, založené na polyolech, mají velmi dobrou adhezi, avšak hůře odolávají vodě a povětrnosti. Oproti tomu tmely, založené na polyetherech, mají horší adhezi, avšak mnohem lepší odolnost vůči vodě. Jak jednokomponentní, tak dvoukomponentní polyurethanové tmely jsou aditivovány například plnivy či látkami, zlepšujícími adhezi. [24] [25]

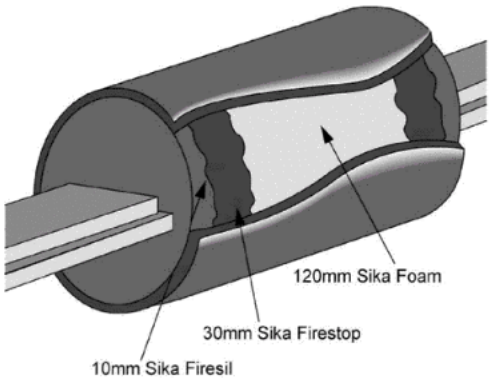
Nevýhodou použití aromatických isokyanátů v oblasti polymerů je jejich žloutnutí při světelné expozici. Tento problém lze odstranit použitím alifatických či cykloalifatických isokyanátů, které jsou ale dražší než isokyanáty aromatické.

Prepolymer s koncovými isokyanátovými skupinami může být vytvrzován dvěma způsoby. V případě dvoukomponentních systémů přídavkem koreaktantu, obsahujícího hydroxylovou skupinu, jako je polyester nebo polyether, nebo v případě jednokomponentních tmelů pomocí absorpce vzdušné vlhkosti. Tato absorpce vede ke vzniku polymočoviny za současného uvolnění oxidu uhličitého jako vedlejšího produktu. Vytvrzování jednokomponentních tmelů je výrazně pomalejší, než je tomu u tmelů dvoukomponentních, neboť závisí na mnoha faktorech, hlavně na relativní vlhkosti vzduchu.

Polyurethanové tmely mají obecně velmi dobrou odolnost vůči chemikáliím, ozonu či v závislosti na jejich struktuře vůči UV záření, dobře odolávají abrazi a lze je použít i za velmi nízkých teplot.

Polyurethanové tmely nacházejí široká uplatnění v praxi. Používají se ve stavebnictví k těsnění dynamických pohyblivých spojů u oken, či dveří. Využívají se také v automobilovém průmyslu jako materiály, určené k prevenci úniků kapalin, k redukci hluku či jako protikorozní ochrana.

V elektrotechnickém průmyslu se polyurethanové tmely využívají jako izolátory či komponenty, určené k disipaci tepla, které by mohlo poškodit jiné součástky (obrázky 4, 5 a 6). [24]



Obrázek 4 Ochrana kabelů za použití polyurethanových tmelů [26]

Obrázek 5 Aplikace polyurethanového tmelu [27]

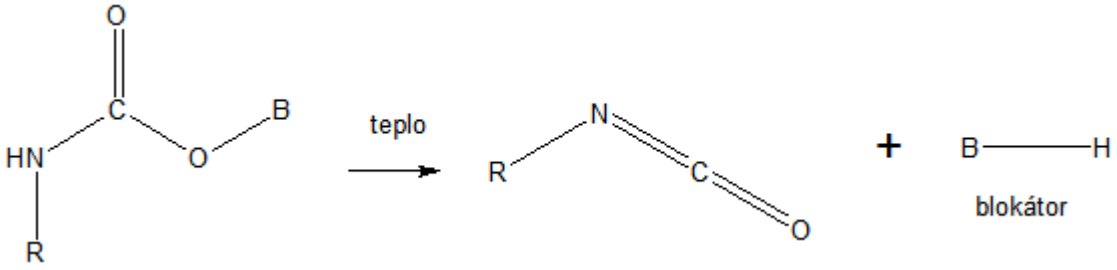
Obrázek 6 Aplikace polyurethanového tmelu (2) [27]

1.3.3 **Nátěry**

Vzhledem k jejich dobré odolnosti vůči povětrnosti, mechanickému poškození a rozpouštědlům nalezly polyurethany také uplatnění v nátěrech a lacích. Polyurethanové nátěry a laky se vyrábějí jako rozpouštědlové, bezrozpouštědlové (tzv. high-solid), vodové, vodou ředitelné a práškové. Vysoušení nátěrů probíhá odpařováním rozpouštědla a závisí na procesu zesítění. V závislosti na složení se polyurethanové nátěry a laky dodávají jako jednokomponentní (1K) nebo dvoukomponentní (2K). Jednokomponentní jsou založeny na stabilní směsi isokyanátových a polyolových komponent a lze je rozdělit na několik kategorií:

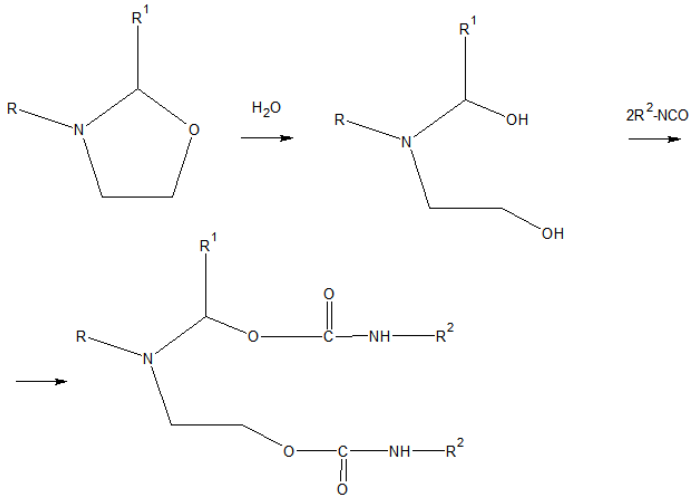
- polyurethanové nátěry síťované vzdušným kyslíkem. Jedná se hlavně o urethanové oleje, získané reakcí diisokyanátů s přírodními nenasycenými oleji a urethan-alkydové pryskyřice, modifikované nenasycenými oleji. Vysoušení a zesítění těchto produktů probíhá oxidací (oxidační zesítění),

- nátěry s blokovanými isokyanáty. Jedná se o produkty použití polyisokyanátů a urethanových oligomerů s blokovanými urethanovými skupinami (jako blokátor se nejčastěji používá 2-butanon oxim, kaprolaktam, diethyl malonát nebo fenol). Tyto systémy jsou za normálních podmínek stabilní, při zvýšení teploty (na 120-200 °C) dojde k odblokování isokyanátových skupin, které jsou poté schopné reagovat s aminovými nebo hydroxylovými skupinami polyolů nebo polyaminů (rovnice 23),



Rovnice 23 Odblokování isokyanátové skupiny

- nátěry, obsahující mikrokapsle isokyanátů. V těchto produktech jsou polyisokyanáty deaktivovány zapouzdřením pomocí vhodné pryskyřice (diamin nebo polyamin). Tyto mikrokapsle jsou stabilní při pokojové teplotě, ale při zvýšení teploty dojde k uvolnění polyisokyanátů a k reakci jejich volných isokyanátových skupin se skupinami hydroxylovými nebo aminovými,
- vodou ředitelné nátěry. Tyto nátěry se vyrábí z polyurethanů, které mají ve své struktuře iontové skupiny, což umožňuje vytvoření stabilní disperze ve vodě,
- nátěry s blokovanými tužidly. V těchto nátěrech jsou polyisokyanáty smíchány s latentními tužidly, například s oxazolidinem. Tužidlo je poté aktivováno pomocí vzdušné vlhkosti. Dojde k otevření oxazolidinového kruhu, uvolnění hydroxylových skupin, které reagují se skupinami isokyanátovými (rovnice 24).



Rovnice 24 Zesítění polyurethanů pomocí oxazolidinů

Dvoukomponentní nátěry mají nejširší praktické využití. Tyto produkty se skládají ze dvou reagentů, které jsou skladovány odděleně. Jedna komponenta se skládá z polymerních látek, obsahujících hydroxylové skupiny, katalyzátorů a aditiv, druhá komponenta obsahuje tužidlo ve formě polyisokyanátů. Vytvrzování je zahájeno ihned po smíchání obou komponent. Tyto produkty vytváří kvalitní a pevné nátěry s výbornou adhezí, dobrou odolností vůči chemikáliím a vodě. Nacházejí uplatnění v automobilovém průmyslu, v letectví či v plastikářském průmyslu. Příklad aplikace nátěru je zobrazen na obrázku 7. [16] [28] [29]

Obrázek 7 Příklad aplikace polyurethanového nátěru [30]

1.3.4 **Lepidla**

Vývoj polyurethanových lepidel odstartoval před více než 60 lety Otto Bayer, čímž se zasadil o rozšíření chemie polyurethanů i do tohoto segmentu. Objevil, že produkty kombinace polyesterových polyolů s diisokyanáty mají velmi dobré adhezní vlastnosti. V 50. letech byla polyurethanová lepidla používána k lepení kůže, dřeva, tkanin či pryží. O několik let později byla vyvinuta první dvoukomponentní polyurethanová lepidla, určená k lepení kovů. V roce 1968 Goodyear poprvé využil polyurethanová lepidla v automobilovém průmyslu, konkrétně k lepení kapot nákladních automobilů ze sklem vyztužených plastů. V roce 1978 již byla pokročilá dvoukomponentní polyurethanová lepidla ke komerčnímu užití k dispozici v širším rozsahu.

Polyurethanová lepidla se dají rozdělit na dvě základní skupiny; systémy bez rozpouštědel a s rozpouštědly. [31]

1.3.4.1 **Bezrozpouštědlové systémy**

Tato lepidla se dodávají jako jednokomponentní či dvoukomponentní systémy. Jednokomponentní systém obvykle obsahuje zhruba 15 % volných isokyanátů. Po jejich aplikaci je vytvrzovací proces dokončen reakcí se vzdušnou vlhkostí.

U dvoukomponentního systému je jednou komponentou polyol, druhou komponentou je obvykle částečně zreagovaný polyol s isokyanátem. Tato komponenta většinou obsahuje zhruba 30 % volných isokyanátů. Při smísení těchto komponent dojde k reakci isokyanátů z druhé komponenty s hydroxylovými skupinami z komponenty první. Vytvrzování těchto systémů není závislé na vzdušné vlhkosti.

Jednokomponentní lepidlo obvykle vytvoří lepený spoj po 24-36 hodinách, přičemž ke kompletnímu vytvrzení dojde zhruba po 4-5 dnech. Dvoukomponentní lepidlo tvoří lepený spoj po 24 hodinách a ke kompletnímu vytvrzení dojde obvykle po 2-3 dnech. [31] [32]

1.3.4.2 **Rozpouštědlové systémy**

U rozpouštědlových systémů se většinou jedná o jednokomponentní lepidlo, obsahující nehořlavé rozpouštědlo. Toto lepidlo se vytvrzuje vzdušnou vlhkostí. Obsah pevného podílu závisí na požadované aplikaci, u lepidel, aplikovaných ve spreji, většinou dosahuje 40-60 %. Tato lepidla se mohou vytvrzovat velmi rychle, u některých může být dosaženo lepeného spoje již po 20 minutách, přičemž ke kompletnímu vytvrzení dojde zhruba po 24 hodinách. Tyto systémy nacházejí uplatnění v odvětvích jako je například automobilový průmysl, kde jsou využívána k lepení obložení dveří či čalounění. [31]

Příkladem high-tech uplatnění polyurethanových lepidel v automobilovém průmyslu je lepení autoskel. Polyurethany zde nejenom poskytují kvalitní, vodotěsný lepený spoj, ale dodávají i strukturální podporu samotnému sklu (obrázek 8). [33]

Obrázek 8 Lepení autoskla [34]

Výborný lepicí efekt polyurethanových lepidel má mnoho příčin. Isokyanátové skupiny jsou schopny reagovat s vodním filmem na povrchu adherendu a odstraňují tuto mezivrstvu, přičemž na jejím místě vzniká vrstva polymočoviny, která s kovy tvoří cheláty a v důsledku silných vodníkových vazeb lpí na lepených površích. [10]

Polyurethanová lepidla však mají i některé nevýhody. Mezi ně patří nižší tepelná stabilita, než je třeba u lepidel epoxidových, křehnutí při delší expozici UV záření či ozonu, kratší otevřený čas pro zpracování a nutnost bezpečnostních opatření vzhledem k jejich toxikologickým vlastnostem.

Používání polyurethanových lepidel s sebou však přináší i určitá toxikologická rizika. Isokyanáty jsou velmi reaktivní, reagují se vzdušnou vlhkostí, a tudíž mohou reagovat i na lidské kůži, v případě inhalace i v plicích. Kupříkladu TDI může při delším vdechování vyvolat senzibilizaci respiračního traktu. V porovnání s TDI je bezpečnější MDI, neboť má nižší tlak par. V praxi není MDI zdrojem rizika, pokud se pracuje v teplotách nižší než 40 °C, zvláště pokud je zajištěna adekvátní ventilace. Pokud je teplota vyšší, nebo je lepidlo aplikováno ve spreji, dojde k vytvoření mlhy. Maximální přípustný limit pro MDI je 0,02 ppm. [31]

1.3.4.3 **Speciální aplikace**

Polyurethany nacházejí své uplatnění i v řadě speciálních aplikacích. Jednou z těchto aplikací je lékařství. Polyurethany se využívají pro výrobu systémů pro dlouhodobé uvolňování léčiv. Dobré výsledky mají polyurethany také na poli tkáňového inženýrství a regenerativní medicíny, kde se využívají pro obnovení orgánů či tkání.

Polyurethany byly zamýšleny i jako materiály pro výrobu medicínských zařízení, jako jsou umělé srdeční chlopně či krevní pumpy. Zde však vzhledem ke své tuhosti a jiným vlastnostem často selhávaly. [35]

1.4 **Technologie lepení**

1.4.1 **Základní aspekty**

U přípravy lepených spojů je nutné brát v potaz množství aspektů. Tyto aspekty zahrnují:

- výběr samotného lepidla; zde je nutné do úvahy zahrnout materiál, který se bude spojovat, napětí, které bude na lepený spoj kladeno, environmentální podmínky, v nichž se bude lepený spoj nacházet, způsob vytvrzování i technickou stránku věci,

- design a geometrii lepeného spoje,
- přípravu lepeného povrchu adherendů.

Je tedy nutné hledět na lepený spoj jako na komplexní systém. Selhání jednoho aspektu totiž může vést k celkovému selhání lepeného spoje. [36]

1.4.2 Výběr vhodného lepidla

Lepidla lze v závislosti na jejich chemickém složení a chování při změně teploty řadit mezi reaktoplasty, respektive termoplasty. Jejich nabídka je velmi široká, dodávají se jako kapaliny či pasty, jako jednokomponentní či dvoukomponentní systémy. Mimo samotných lepicích komponent lepidla obsahují další pomocné komponenty, jako plniva, změkčovadla či katalyzátory.

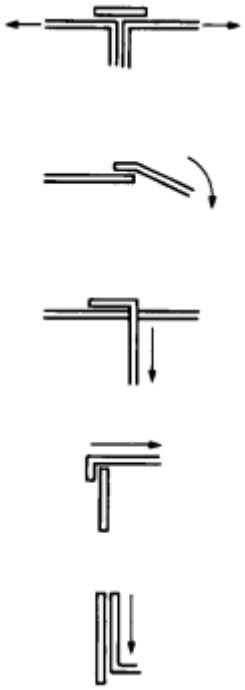
Mezi základní typy lepidel patří:

- epoxidová lepidla, která tvoří velmi silné a odolné lepené spoje. Své uplatnění nacházejí při lepení kovových materiálů, ale také mnoha druhů plastů, ve speciálních případech i k lepení dřeva,
- polyurethanová lepidla, blíže popsaná v kapitole 1.3.4,
- akrylová lepidla, která se využívají například k lepení sendvičů či obkladových panelů. Také se využívají všude, kde je požadována malá tloušťka lepeného spoje,
- polyesterová lepidla, která spadají do skupiny méně používaných lepidel, kvůli jejich špatným krípovým charakteristikám, relativně velkému smrštění a špatné odolnosti vůči vlhkosti a vodě,
- resorcinol-formaldehydová a fenol-resorcinol-formaldehydová lepidla, což jsou lepidla, využívána hlavně k lepení dřeva. Vytváří pevné spoje, odolné vůči vlhkosti a slané vodě,
- fenol-formaldehydová lepidla, většinou teplotně vytvrzovaná, používána při výrobě překližek,
- melamin-močovino-formaldehydová a močovino-formaldehydová lepidla, využívána k lepení dřeva, většinou jako ochranné nátěry,
- kaseinová lepidla, která se vyrábějí z mléka. Používají se pro vnitřní dřevěné konstrukce, avšak jejich použití je limitováno náchylností k plesnivění,

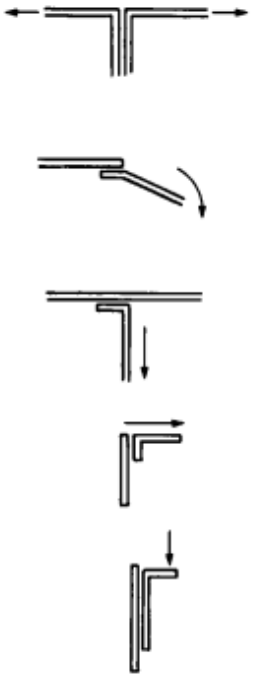
- polyvinyl-acetátová lepidla, využívána například při výrobě laminátů, hlavně pro aplikace v interiérech. [36]

1.4.3 **Design lepeného spoje**

Při navrhování lepicího systému je nutné brát design a geometrii lepeného spoje zvlášť v potaz. Maximální zatížení lepeného spoje by vždy mělo být ve směru maximální pevnosti spoje a zároveň by se měla minimalizovat působení zatížení ve slabých směrech, což jsou ty, kde může dojít k porušení spoje odlupem. Následující obrázky 9 a 10 zobrazují, jak mohou vypadat dobře navržené lepené spoje a spoje navržené špatně. [36]

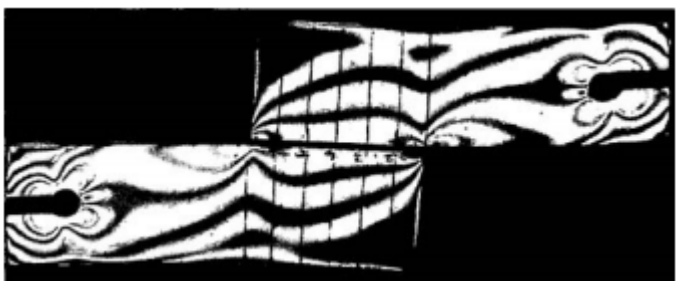


Obrázek 9 Příklady dobře navržených lepených spojů [36]



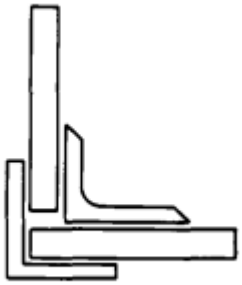
Obrázek 10 Příklady špatně navržených lepených spojů [36]

U všech lepených spojů se pík napětí nachází na koncích adhezní vrstvy. Jeho velikost závisí na relativní pevnosti lepidla i adherendů. Distribuce napětí v lepeném spoji typu „single lap“ je zobrazena obrázku 11.

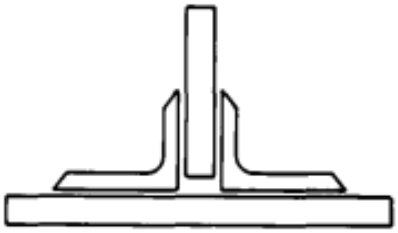


Obrázek 11 Fotoelastický test "single lap" lepeného spoje [36]

Komplikovanější lepené spoje, jako například spoje pod různými úhly, či „T“ spoje, vyžadují složitější řešení, jejichž příklady jsou zobrazeny na obrázcích 12 a 13.



Obrázek 12 "Úhlový" lepený spoj [36]



Obrázek 13 "T" spoj [36]

1.4.4 Porušení lepeného spoje

Při testování lepených spojů může dojít k několika základním druhům porušení spojů:

- porušení samotného adherendu – lepený spoj jako takový odolá zatížení, ale přetrhne se samotný adherend v jiném místě, než je lepený spoj (obrázek 14),
- delaminace – vrstva materiálu, jež je v kontaktu s lepidlem se odloupne (obrázek 15),
- kohezní porušení lepeného spoje – adheze lepidla k adherendu je silnější než jeho koheze (obrázek 16),
- adhezní porušení lepeného spoje – adheze lepidla k adherendu je slabší, než jeho koheze (obrázek 17).

Obrázek 14 Porušení adherendu [37]

Obrázek 15 Delaminace [37]

Obrázek 16 Kohezní porušení lepeného spoje [37]

Obrázek 17 Adhezní porušení lepeného spoje [37]

1.4.5 Příprava lepeného povrchu a adheze

Adheze je přilnavost mezi povrchy, která je spojována s intermolekulárními silami. Základní předpoklady dobré adheze jsou

- dobrý kontakt mezi lepidlem a substrátem,
- absence slabých míst a dekontaminace lepeného povrchu.

Vystupuje zde několik mechanismů působení sil, mezi které patří například adsorpce. U tohoto mechanismu jsou molekuly lepidla adsorbovány na povrch substrátu. V některých případech může dojít i k vytvoření chemických vazeb. Adhezi napomáhá i mechanické proplétání; u porézních substrátů, jako například beton či zdivo, dojde k penetraci lepidla do substrátu. V některých případech probíhají i difúzní procesy, kdy některá složka lepidla je schopna penetrovat povrch substrátu a vytvořit sloučeninu. [36] [38]

1.4.5.1 **Fyzikální mechanické úpravy povrchů**

Mezi tyto úpravy patří zdrsnění povrchu, kterého se dosáhne odíráním či otryskáváním. Odírání se provádí buďto použitím vhodného brusného papíru nebo trojrozměrného netkaného abraziva. Otryskávání se většinou uplatňuje u kovových materiálů, při opatrném postupu, kdy nedojde k nadměrné erozi, lze však tento postup užít i v případě plastových povrchů. Otryskávání se provádí tak dlouho, dokud se otryskávaný povrch nejeví jako stejnorodý. [39]

1.4.5.2 **Fyzikální nemechanické úpravy povrchů**

Tyto postupy jsou většinou zaměřeny na aplikaci výhodné chemické modifikace povrchu plastových adherendů oxidačními procesy. Hlavními příklady těchto postupů jsou ošlehávání plamenem a plazmový výboj. Metoda modifikace povrchu oxidačním plynovým plamenem je jednoduchým, rychlým a relativně účinným postupem pro zlepšení povrchu mnoha plastových adherendů. Metoda plazmového výboje (korónový výboj) má omezené využití, které závisí na měnící se topografii dílů. Využívá se spíše pro ploché díly. [39]

Neupravený kovový povrch ve stavu, v jakém opustí výrobu, má povrchové jevy vzniklé v důsledku výrobních operací. Takový povrch většinou není vhodný pro lepení. Povrch může být částečně zoxidovaný či pokrytý mikroskopickými kovovými hoblinami. [40]

Existuje mnoho postupů pro přípravu kovových adherendů. V praxi se nejčastěji uplatňuje postup složený z

- odmaštění lepeného povrchu,
- mírného mechanického zdrsnění odíráním nebo otryskáváním s opětovným následným odmaštěním,
- aplikace přípravku primer, což je přípravek, který se v tenké vrstvě aplikuje na lepený povrch a zlepšuje přilnavost lepidla.

2 Experimentální část

2.1 Použité suroviny

2.1.1 Použitá lepidla

Pro experimentální část bylo vybráno osm polyurethanových lepicích systémů.

2.1.1.1 Betamate 2810 MV

Betamate 2810 MV je dvousložkové polyurethanové lepidlo s vysokým prodloužením a průměrnou vytvrzovací rychlostí. Je navržené pro lepení plastů či laminátů v automobilovém průmyslu. Jeho vlastnosti jsou v tabulce 1. [41]

Tabulka 1 Vlastnosti lepidla Betamate 2810 MV

Výrobce	Dow Chemical
Základ	Komponenta 1: PU prepolymer Komponenta 2: Polyol
Barva	Komponenta 1: Černá Komponenta 2: Bílá
Hustota	Komponenta 1: 1,11 g/cm3 Komponenta 2: 1,41 g/cm3
Mísící poměr	1:1
Otevřený čas	6–10 minut

2.1.1.2 Betaforce 2850 M

Betaforce 2850M je dvoukomponentní polyurethanové lepidlo s průměrným modulem pružnosti a průměrným časem zpracování za pokojové teploty. Vyniká dobrou adhezí k plastům, kompozitům, lakovaným povrchům či kovům. Zvýšením teploty lze dosáhnout urychlení jeho vytvrzování. Má vysokou mechanickou pevnost a prodloužení při přetržení. Jeho vlastnosti jsou v tabulce 2. [42]

Tabulka 2 Vlastnosti lepidla Betaforce 2850 M

Výrobce	DuPont de Nemours, Inc.
Základ	Komponenta 1: Isokyanát Komponenta 2: Polyol
Barva	Komponenta 1: Černá Komponenta 2: Bílá
Hustota	Komponenta 1: 1,17 g/cm3 Komponenta 2: 1,43 g/cm3
Mísící poměr	1:1
Doba zpracování	10–15 minut

2.1.1.3 **Betaforce 2816S**

Betaforce 2816S je dvoukomponentní lepidlo s rychlým vytvrzováním, dobrou adhezí k plastům, kompozitům, lakovaným povrchům a kovům. Je optimalizováno pro urychlování pomocí infračerveného záření. Má vysokou pevnost a prodloužení při přetržení. Jeho vlastnosti jsou popsány v tabulce 3. [43]

Tabulka 3 Vlastnosti lepidla Betaforce 2816S

Výrobce	Dow Chemical
Základ	Komponenta 1: Isokyanát Komponenta 2: Polyol
Barva	Komponenta 1: Černá Komponenta 2: Černá
Hustota	Komponenta 1: 1,16 g/cm3 Komponenta 2: 1,42 g/cm3
Mísící poměr	1:1
Otevřený čas	4–7 minut

2.1.1.4 **Betaseal 1407**

Betaseal 1407 je jednosložkové, vysoce viskózní lepidlo/tmel, určené pro přímé zasklívání, vytvrzované atmosférickou vlhkostí. Mezi jeho vlastnosti patří nízký elektrický odpor a dobrá vysokofrekvenční charakteristika. Tyto vlastnosti, včetně plné slučitelnosti se skly ho předurčují k využití v oblastech přímého zasklívání. Jeho vlastnosti jsou v tabulce 4. [44]

Tabulka 4 Vlastnosti lepidla Betaseal 1407

Výrobce	Dow Chemical
Základ	Polyurethanové prepolymery
Barva	Černá
Hustota	1,37 g/cm3
Doba zpracování	15 minut

2.1.1.5 **Betaseal HV 3**

Betaseal HV 3 je jednosložkové, vysoce viskózní lepidlo, vytvrzované atmosférickou vlhkostí, vyznačující se vysokou pevností a stálou elasticitou spoje. Jeho vlastnosti jsou v tabulce 5. [45]

Tabulka 5 Vlastnosti lepidla Betaseal HV 3

Výrobce	Dow Chemical
Základ	Polyurethanové prepolymery
Barva	Černá
Hustota	1,25 g/cm3
Otevřený čas	15 minut

2.1.1.6 **Betamate 7170 + Accel 2**

Betamate 7170 je jednokomponentní lepidlo, vytvrzované atmosférickou vlhkostí. Vytvrzení je závislé na teplotě, vlhkosti a aplikačních rozměrech. Lepidlo má vysokou přilnavost a nízkou vodivost na skle. Betamate Accel 2 je akcelerátor na vodní bázi. Byly použity tři systémy, samotné lepidlo a dále lepidlo s jedním a třemi hmotnostními procenty akcelerátoru. Vlastnosti jsou popsány v tabulce 6. [46]

Tabulka 6 Vlastnosti lepidla Betamate 7170 a boosteru Accel 2

Výrobce	Dow Chemical
Základ	7170: Polyurethanové prepolymery Accel 2: Polyolové sloučeniny
Barva	7170: Černá Accel 2: Bílá
Hustota	7170: 1,25 g/cm3 Accel 2: 1,60 g/cm3
Mísící poměr	100:0, 99:1, 97:3
Otevřený čas	Max. 20 minut při 3 % Accel 2

2.1.2 **Použité chemikálie**

Mezi ostatní používané chemikálie patří primery a čisticí prostředky pro povrchovou úpravu adherendů.

2.1.2.1 **Betaprime 1707**

Betaprime 1707 je reaktivní dvoukomponentní primer na kovové povrchy. Jeho vlastnosti jsou popsány v tabulce 7. [47]

Tabulka 7 Vlastnosti primeru Betaprime 1707

Výrobce	Dow Chemical
Základ	Komponenta 1: epoxidová pryskyřice Komponenta 2: polyisokyanát
Barva	Komponenta 1: bílá Komponenta 2: bezbarvá až světle žlutá
Hustota	Komponenta 1: 1,4 g/cm3 Komponenta 2: 0,9 g/cm3
Čas odpaření	30 minut

2.1.2.2 **Betaprime 5404**

Betaprime 5404 je jednokomponentní primer bez toluenu na plasty a lakované povrchy. Jeho vlastnosti jsou popsány v tabulce 8. [48]

Tabulka 8 Vlastnosti primeru Betaprime 5404

Výrobce	Dow Chemical
Základ	Polyisokyanáty
Barva	Černá
Hustota	0,91 g/cm3
Čas odpaření	Min. 30 sekund při 23 °C a 50 % rel. vlhkosti

2.1.2.3 **Čisticí prostředky**

Pro odmaštění adherendů byly využívány dva čisticí prostředky:

- čisticí prostředek Betaclean 3350 na heptanové bázi, [49]
- čisticí prostředek MT-IPA Cleaner na bázi isopropanolu.

2.1.3 **Použité adherendy**

Pro přípravu lepených spojů byly použity tyto typy adherendů:

- uhlíkatá ocel třídy 11,
- hliník,
- polykarbonát – čirý Makrolon (dodavatel Plastpartner, s. r. o. Sezemice).

2.2 **Příprava vzorků**

2.2.1 **Příprava vzorků pro měření pevnosti ve smyku – polykarbonát**

Prvním krokem přípravy polykarbonátových lepených spojů byla povrchová úprava adherendů. Zde jsme zvolili postup, který nejblíže reflektoval postupy, běžně užívané v průmyslu. Výsledkem byla povrchová úprava, která zahrnovala:

- odmaštění povrchu přípravkem MT-IPA Cleaner,
- mechanické zdrsnění brusným papírem,

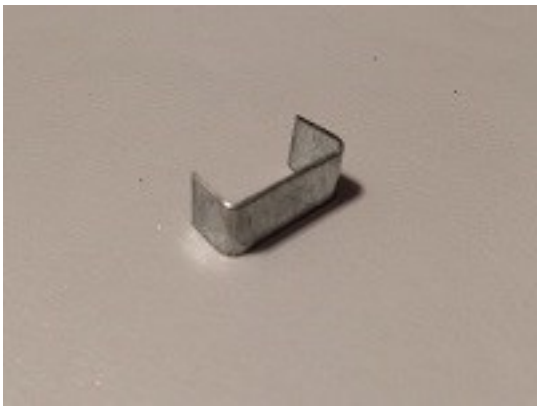
- opětovné odmaštění,
- aplikaci primeru Betaprime 5404.

Takto upravený adherend byl vložen do lepicí formy (obrázek 18). Na upravenou stranu bylo naneseno dostatečné množství lepidla, aby bylo po přiložení druhého adherendu zajištěno, že dojde k rovnoměrnému rozložení lepidla po celé ploše lepeného spoje.

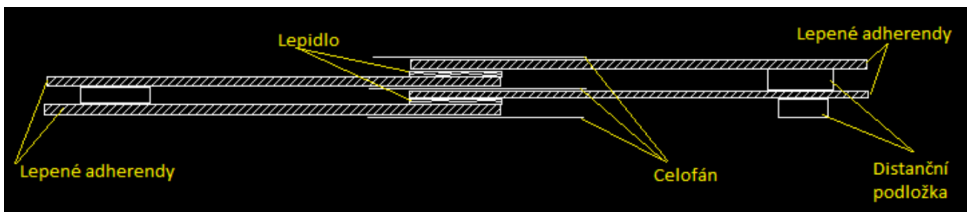
Vzhledem k velké tloušťce lepeného spoje (5 mm), která byla zvolena s ohledem na požadované aplikační vlastnosti, bylo nutné navrhnout distanční vložku, která by tuto tloušťku zajistila. Standardně používané distanční drátky byly pro toto použití nevhodné, proto byla navržena podložka ve tvaru písmene U, která byla vysoká přesně 5 mm (obrázek 19). Tato podložka byla ponořena do lepidla. Na druhou stranu lepicí formy byla položena jiná podložka o stejné tloušťce jako daný adherend. Na tuto podložku byla navíc přiložena podložka „U“ tak, aby se lepené adherendy nacházely ve stejné rovině a tím pádem nedocházelo k lámání lepeného spoje. K prevenci vzájemného slepení byly jednotlivé lepené spoje odděleny celofánem. Lepené spoje se poté ve formě zatížily závažím o hmotnosti 1 kg a ponechaly se minimálně po dobu 24 hodin. Poté byly z formy vyjmuty. Pro každý lepicí systém bylo připraveno 10 lepených spojů. Schéma lepení je zobrazeno na obrázku 20.

Vyjmuté lepené spoje byly ponechány k dotvrzení minimálně 14 dní. Poté byly mechanicky odstraněny přetoky lepidla.

Obrázek 18 Lepicí forma



Obrázek 19 Distanční vložka



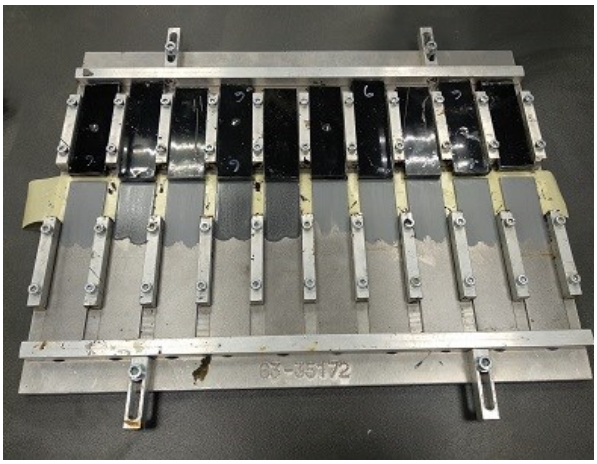
Obrázek 20 Schéma lepení [50]

2.2.2 Příprava vzorků pro měření pevnosti ve smyku – kovy

Metoda povrchové úpravy pro kovové adherendy spočívala v:

- odmaštění povrchu přípravkem Betaclean 3350,
- mechanickém zdrsnění povrchu brusným papírem
- opětovném odmaštění,
- aplikaci primeru Betaprime 1707.

Pro přípravu kovových adherendů byly k dispozici jiné formy (Obrázky 21 a 22). V těchto formách byla výška lepeného spoje nastavitelná pomocí vhodné podložky na druhé straně formy. Po provedení povrchové úpravy se adherendy vložily na jednu stranu formy, na druhou stranu formy se vložily podložky o tloušťce 5 mm. Na adherendy se naneslo dostatečné množství lepidla a přiložily se druhé adherendy, čímž došlo k vytvoření lepených spojů. V této formě se mohly přetoky lepidla odstranit ihned po aplikaci. Lepené spoje byly ponechány ve formě minimálně po dobu 24 hodin, vyjmuté lepené spoje byly ponechány k dotvrzení minimálně 14 dní. Pro každý typ adherendu (ocel a hliník) bylo připraveno 10 lepených spojů.



Obrázek 21 Upravené adherendy ve formě

Obrázek 22 Hotové lepené spoje ve formě

2.2.3 Příprava vzorků pro měření pevnosti v tahu, TMA, DMA a tvrdosti Shore

Pro měření pevnosti v tahu, TMA, DMA a tvrdosti Shore byly pomocí silikonových forem vytvořeny následující vzorky:

- pro měření pevnosti v tahu lopatky o rozměrech 50×5×2 mm,
- pro měření TMA čtverečky o rozměrech cca 5×5×2 mm,
- pro měření DMA hranoly o rozměrech 50×5×2 mm,

- pro měření tvrdosti Shore deska.

Tyto vzorky byly po vytvrzení z formy vyjmuty a očištěny.

2.3 Metody měření

2.3.1 Měření pevnosti ve smyku

Lepené spoje byly podrobeny měření pevnosti ve smyku na trhacích zařízeních MTS – 4/M (obrázek 23) pro ocel a hliník a SHIMANDZU AGS – X (obrázek 24) pro polykarbonát. Důvodem nutnosti použití druhého trhacího zařízení byla příliš velká tloušťka polykarbonátových lepených spojů a jejich nemožnost upnutí do čelistí trhacího zařízení MTS – 4M. Na kovové adherendy byly nalepeny distanční podložky, aby se po vykompenzování tloušťky lepeného spoje nacházely oba adherendy v jedné rovině a předešlo se tak lámání samotného spoje. Po přerušení došlo k vyhodnocení, jehož výsledkem byly v případě kovových adherendů mez pevnosti ve smyku (N, MPa), modul pružnosti ve smyku (MPa) a tažnost (%). U polykarbonátových lepených spojů byla vyhodnocena pouze mez pevnosti (N, MPa). Upínací délka (počáteční vzdálenost) byla u obou zařízení 112,5 mm, rychlost posunu čelistí činila 5 mm/min. Maximální zátěž hlavy byla 20 kN (MTS – 4/M), respektive 50 kN (SHIMANDZU AGS – X).

Obrázek 23 Trhací zařízení MTS – 4/M

Obrázek 24 Trhací zařízení SHIMANDZU – AGS-X

2.3.2 Měření pevnosti v tahu

Měření pevnosti v tahu vycházelo z americké normy ASTM D1708-18. Toto měření se provádělo jak za laboratorní teploty, tak za zvýšené teploty 70 °C. Výstupem měření byly veličiny mez pevnosti v tahu (N, MPa), protažení (%) a modul pružnosti v tahu (MPa). Měření se provádělo na trhacím zařízení MTS – 4/M (hlava 20 kN). Rozměry vzorků byly 50×5×2 mm, upínací délka 30 mm, rychlost měření 5 mm/min. U každé teploty bylo změřeno 5 vzorků.

Obrázek 25 Měření pevnosti v tahu

Obrázek 26 Měření pevnosti v tahu za zvýšené teploty

2.3.3 Měření TMA

Principem měření termomechanické analýzy (TMA) je sledování výšky vzorku studovaného materiálu v závislosti na teplotě, čase a vložené síle. Metodou TMA lze stanovit teplotu skelného přechodu (T_g), teplotu tání (T_m), koeficient teplotní roztažnosti (α), v daném teplotním intervalu i průběh jeho závislosti na teplotě, bod měknutí daného materiálu aj.

Pro měření zkušebních vzorků byl zvolen vhodný teplotní režim. Měření bylo provedeno na zařízení TMA CX04R od firmy RMI (obrázky 27 a 28) Vložená síla činila 50 mN. Teplota skelného přechodu T_g byla stanovena z grafické závislosti výšky vzorku na jeho teplotě. Zvolený teplotní režim se skládal z:

- ochlazení na teplotu −90 °C rychlostí 3 °C/min,
- ohřátí na teplotu 0 °C rychlostí 3 °C/min,

- ochlazení na teplotu −90 °C rychlostí 3 °C/min,
- ohřátí na teplotu 0 °C rychlostí 3 °C/min.

Odečtení teploty skelného přechodu T_g se provedlo z druhého kroku (první ohřev).

Obrázek 27 Zařízení TMA CX04R

Obrázek 28 Měření TMA

2.3.4 **Měření DMA**

Metoda dynamické termomechanické analýzy (DMA) spočívá v namáhání vzorku definovanou silou a měření deformační odezvy za různých podmínek. Pokud má mechanické namáhání průběh sinusoidy, jedná se o klasickou dynamickou analýzu. Výsledkem vyhodnocení průběhů napětí a deformace jsou závislosti modulu pružnosti a ztrátového úhlu na teplotě, čase, frekvenci působící síly či velikosti deformace. Ze získaných průběhů lze určit charakteristické vlastnosti daného materiálu, jako jsou například teplota skelného přechodu T_g, ztráty v materiálu (tlumící schopnosti), stupně krystalizace či míra orientace.

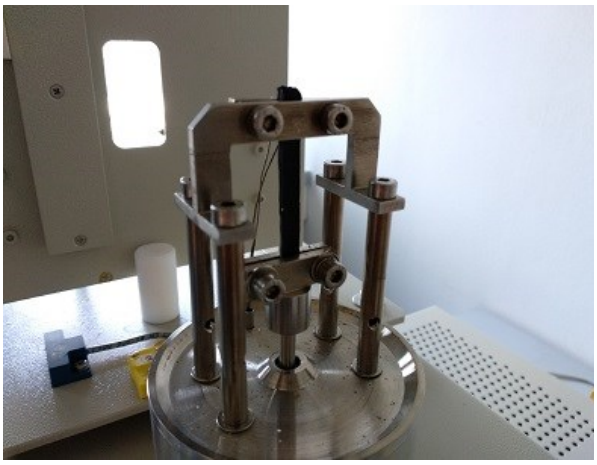
Měření bylo prováděno na zařízené DMA DX04T od firmy RMI (obrázek 29) Jako měřící mód byl zvolen „tah“ (obrázek 30). Z grafické závislosti modulu pružnosti a ztrátového faktoru na teplotě byly stanoveny teploty blízké teplotě skelného přechodu T_1 a T_2; teplota T_1 jako tangenta ze závislosti modulu pružnosti, teplota T_2 jako maximum ze ztrátového faktoru. Dále byly změřeny moduly pružnosti při teplotách −30 °C, 23 °C a 70 °C. Podmínky měření byly:

- měřící mód: tah,
- frekvence: 1 Hz,
- upínací délka: 30 mm,
- konstantní deformace: 0,15 mm.

Zvolený teplotní režim zahrnoval:

- ochlazení na teplotu −90 °C rychlostí 10 °C/min a setrvání na ní po dobu 10 minut,
- ohřátí na teplotu 100 °C rychlostí 3 °C/min.

Obrázek 29 Zařízení DMA DX04T



Obrázek 30 Měření DMA

2.3.5 **Měření tvrdosti Shore**

Tvrdost je obecně definována jako odpor materiálů vůči pronikání druhého, tvrdšího materiálu.

Zařízeno pro měření tvrdosti Shore se skládá z ocelového odpruženého hrotu, který je vtlačován do materiálu. Stupnice tvrdosti Shore má rozsah od 0 (hloubka penetrace 2,5 mm) do 100 (hloubka penetrace 0 mm), vyšší číslo tedy znamená vyšší tvrdost. V závislosti na použitém typu hrotu a vložené síle se rozlišuje tvrdost Shore A či Shore D, existují i další metody, ty se však využívají zřídkakdy. Shore A se používá pro měkčí elastomery, Shore D pro tvrdší materiály. Měření jsou standardizovaná podle norem ČSN EN ISO 868 či ASTM D2240 – 15e1. [51]

Pro vytvořené vzorky byla vzhledem k jejich charakteristice použita metoda Shore A se zatížením 1 kg.

2.3.6 **Měření doby gelace**

Doba gelace (želatinace) je čas, za který dojde v systému ke zgelovatění. Do kelímku bylo naváženo zhruba 50 g polyurethanového systému. Skleněnou tyčinkou se mícháním a vytahováním tyčinky zjišťovalo, zda se vlákno, které se táhlo od dna kelímku lámalo. V momentě jeho zlomení nastal bod gelace. Pro každý systém bylo provedeno jedno měření.

3 Výsledky a diskuse

V této práci byly připraveny lepené spoje pro 8 polyurethanových lepících systémů, dále vzorky pro měření pevnosti v tahu, TMA, DMA a tvrdosti Shore. U lepených spojů byly sledovány mechanické vlastnosti mez pevnosti, tažnost, modul pružnosti (pro polykarbonátové adherendy pouze mez pevnosti) těchto systémů v závislosti na typu použitého adherendu. U vzorků pro měření pevnosti v tahu byly sledovány mechanické vlastnosti mez pevnosti, protažení, modul pružnosti a jejich změna při zvýšení teploty.

Pomocí metody TMA byla následně na připravených vzorcích měřena teplota skelného přechodu T_g. Metodou DMA byly stanoveny teploty blízké teplotě skelného přechodu T_1 a T_2 a moduly pružnosti při různých teplotách. Na připravené desce byla měřena pevnost Shore. U lepících systémů byla též stanovena doba gelace.

U lepených spojů na polykarbonátových adherendech docházelo kvůli velké tloušťce lepeného spoje a samotného adherendu během měření k částečnému odlupu. Vzhledem k této tloušťce bohužel nebylo technicky možné, aby se oba vzájemně slepené adherendy nacházely zcela v rovině. Lze tedy předpokládat, že bez výskytu tohoto jevu by byla naměřená pevnost na polykarbonátu ještě vyšší.

3.1 Výsledky měření pevnosti ve smyku

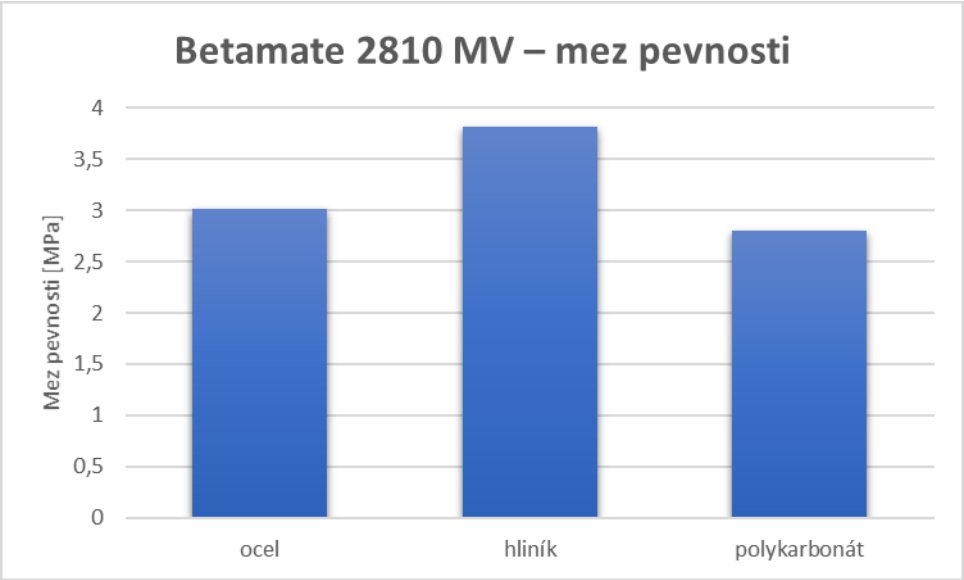
V následujících kapitolách jsou přehledně zobrazeny naměřené veličiny pro každý lepící systém. V grafech jsou zobrazeny primárně sledované veličin mez pevnosti a modul pružnosti.

3.1.1 Betamate 2810 MV

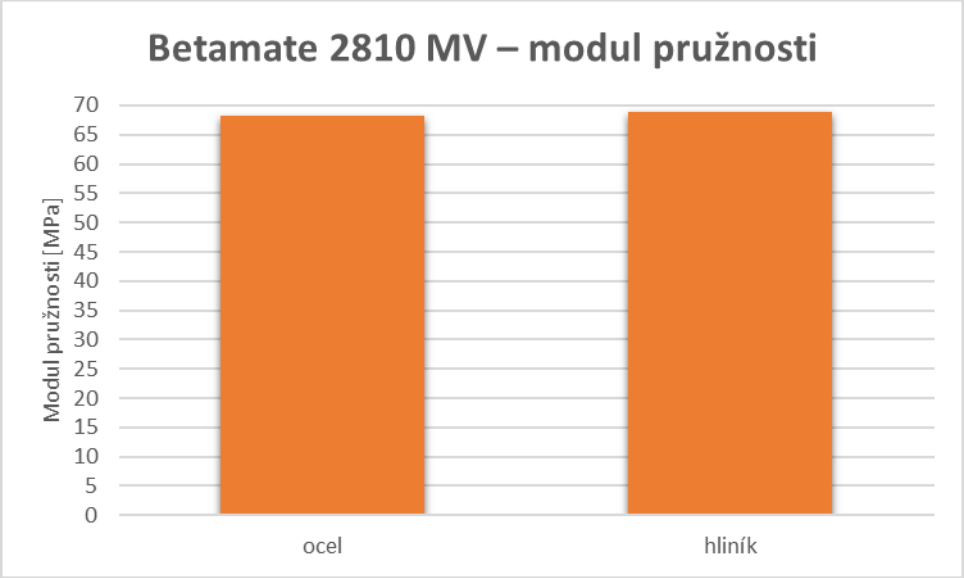
Výsledky měření pevnosti ve smyku pro lepidlo Betamate 2810 MV jsou uvedeny v tabulce 9 a grafech 1 a 2.

Tabulka 9 Betamate 2810 MV – pevnost ve smyku

Adherend	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Modul pružnosti [MPa]
Ocel	2217 ± 262,69	3,02 ± 0,28	5,15 ± 0,3	68,29 ± 6,81
Hliník	2306 ± 217,51	3,81 ± 0,41	5,85 ± 0,48	68,86 ± 6,61
Polykarbonát	2161 ± 295,18	2,8 ± 0,21		



Graf 1 Betamate 2810 MV – mez pevnosti ve smyku



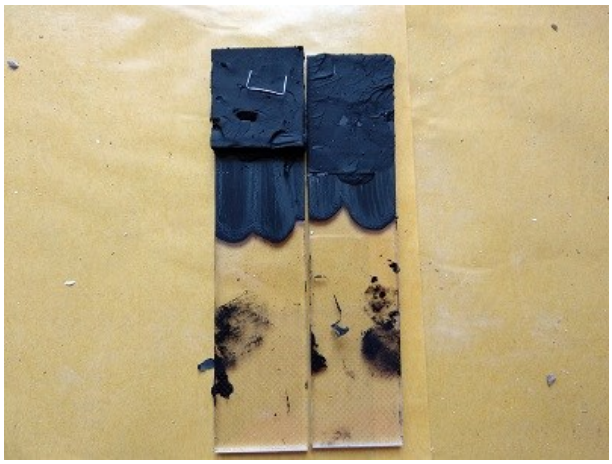
Graf 2 Betamate 2810 MV – modul pružnosti ve smyku

Z grafů a tabulky je patrné, že nejvyšší pevnosti dosahovalo toto lepidlo na hliníkovém adherendu. Výsledky na oceli a polykarbonátu jsou srovnatelné. Modul pružnosti na obou adherendech dosahoval velmi podobných hodnot, stejně jako tažnost.

U všech třech typů adherendů docházelo ke koheznímu porušení lepeného spoje. Ukázky přerušených lepených spojů jsou na obrázcích 31-33.

Obrázek 31 Betamate 2810 MV – ocel

Obrázek 32 Betamate 2810 MV – hliník



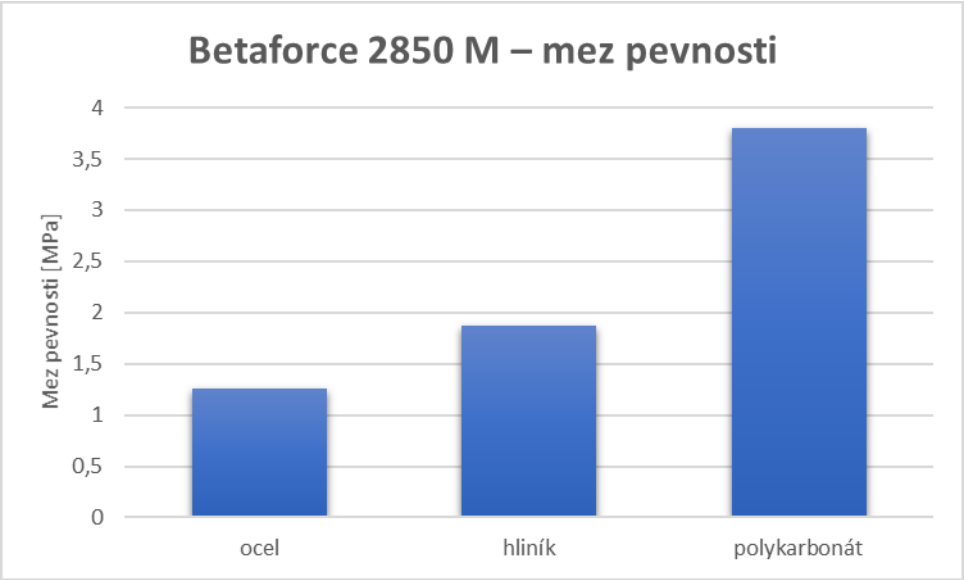
Obrázek 33 Betamate 2810 MV – polykarbonát

3.1.2 **Betaforce 2850 M**

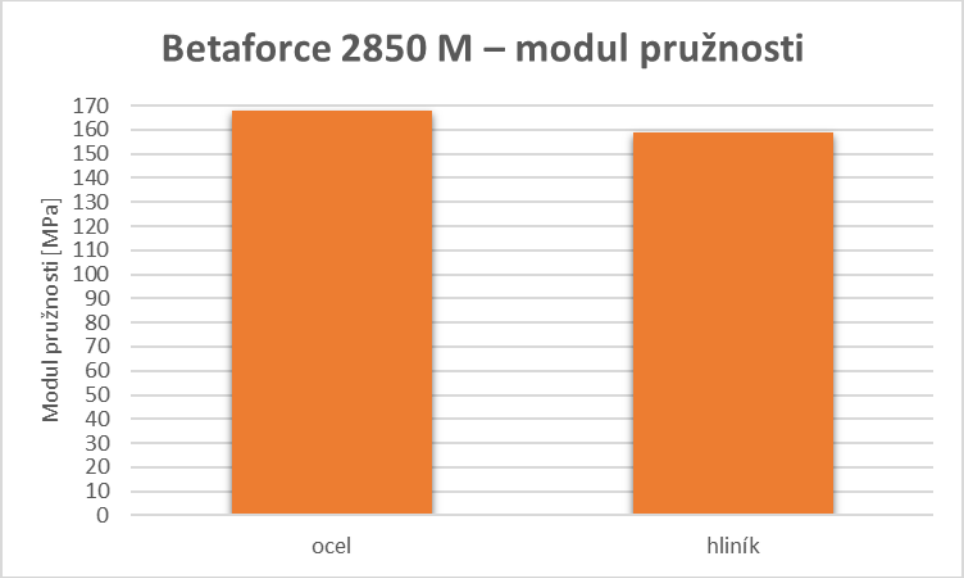
Výsledky měření pro lepidlo Betaforce 2850 M jsou uvedeny v tabulce 10 a grafech 3 a 4.

Tabulka 10 Betaforce 2850 M – pevnost ve smyku

Adherend	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Modul pružnosti [MPa]
Ocel	876,07 ± 110,16	1,26 ± 0,13	0,85 ± 0,11	167,98 ± 21,75
Hliník	1301,85 ± 135,5	1,87 ± 0,19	1,46 ± 0,37	158,82 ± 20,21
Polykarbonát	2900,8 ± 393,62	3,8 ± 0,68		



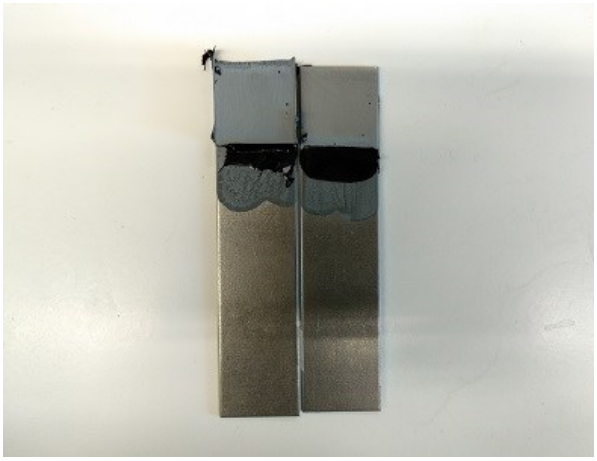
Graf 3 Betaforce 2850 M – mez pevnosti ve smyku



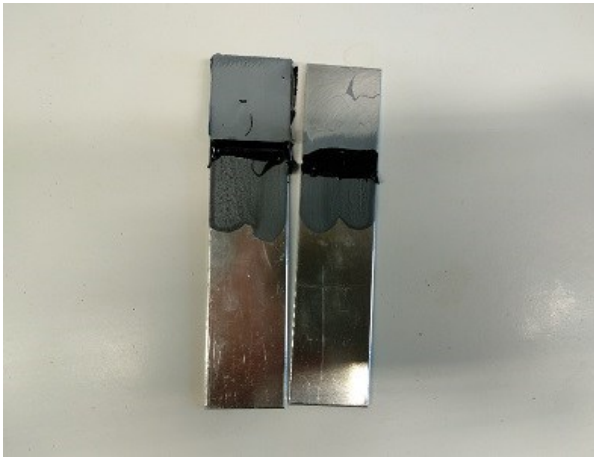
Graf 4 Betaforce 2850 M – modul pružnosti ve smyku

Lepidlo Betaforce 2850 M dosahovalo nejvyšší pevnosti na polykarbonátových adherendech. Pevnost na tomto typu adherendu byla výrazně vyšší, než tomu bylo na ocelových a hliníkových adherendech. Modul pružnosti byl na obou adherendech srovnatelný, tažnost byla vyšší na hliníkových adherendech.

U ocelových a hliníkových adherendů docházelo k adheznímu porušení lepeného spoje, u polykarbonátového ke koheznímu. Rozdíl v typech porušení může být příčinnou velmi rozdílných pevností mezi kovovými a polykarbonátovými adherendy. Ukázky přerušených lepených spojů jsou na obrázcích 34-36.



Obrázek 34 Betaforce 2850 M – ocel



Obrázek 35 Betaforce 2850 M – hliník

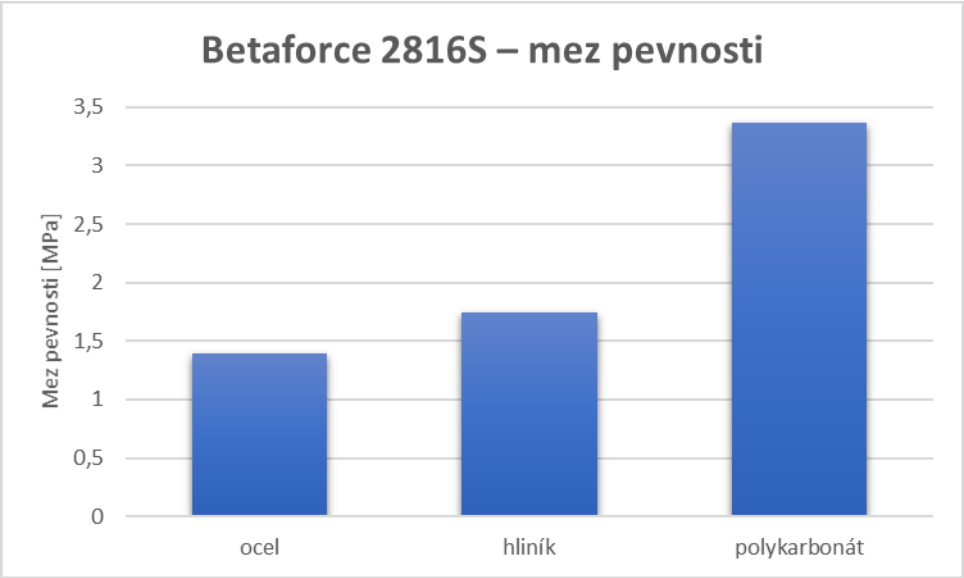
Obrázek 36 Betaforce 2850 M – polykarbonát

3.1.3 **Betaforce 2816S**

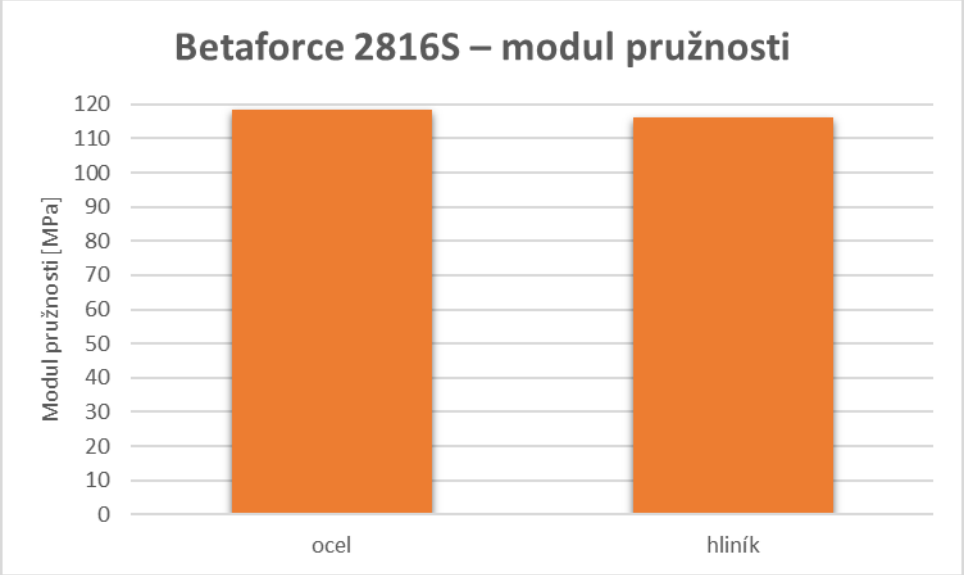
Výsledky měření lepidla Betaforce 2816S jsou zobrazeny v tabulce 11 a grafech 5 a 6.

Tabulka 11 Betaforce 2816S – pevnost ve smyku

Adherend	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Modul pružnosti [MPa]
Ocel	970,43 ± 125,6	1,39 ± 0,18	1,27 ± 0,14	118,52 ± 11,43
Hliník	1161,2 ± 179,33	1,74 ± 0,28	1,77 ± 0,31	116,04 ± 9,07
Polykarbonát	2670,59 ± 443,1	3,37 ± 0,5		



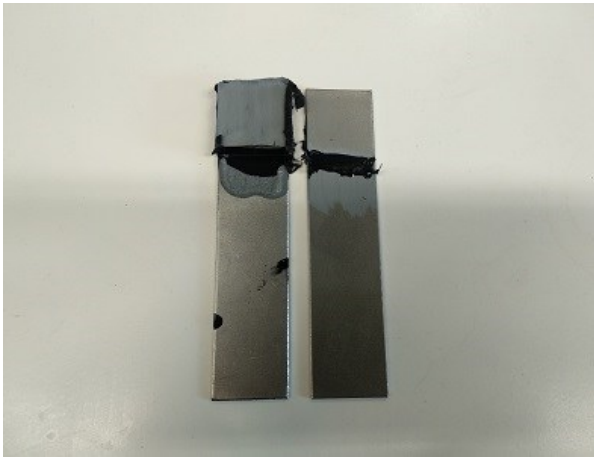
Graf 5 Betaforce 2816S – mez pevnosti ve smyku



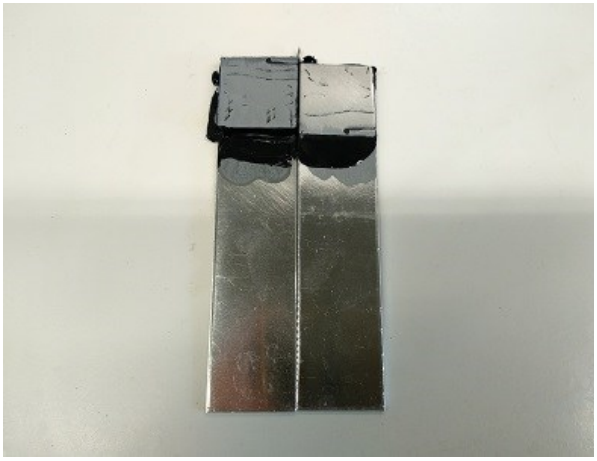
Graf 6 Betaforce 2816S – modul pružnosti ve smyku

Z grafů a tabulky je patrné, že nejvyšší pevnosti dosahovalo toto lepidlo na polykarbonátových adherendech, opět s poměrně velkým rozdílem oproti kovovým adherendům. Výsledky modulu pružnosti jsou na oceli a hliníku téměř totožné. Tažnost dosahovala vyšších hodnot na hliníkových adherendech.

Na kovových adherendech docházelo k adheznímu porušení lepeného spoje, u polykarbonátového k porušení koheznímu, v jednom případě také k porušení samotného substrátu. To může být opět příčinnou poměrně dost rozdílných pevností. Ukázky přerušených lepených spojů jsou na obrázcích 37-39.



Obrázek 37 Betaforce 2816S – ocel



Obrázek 38 Betaforce 2816S – hliník

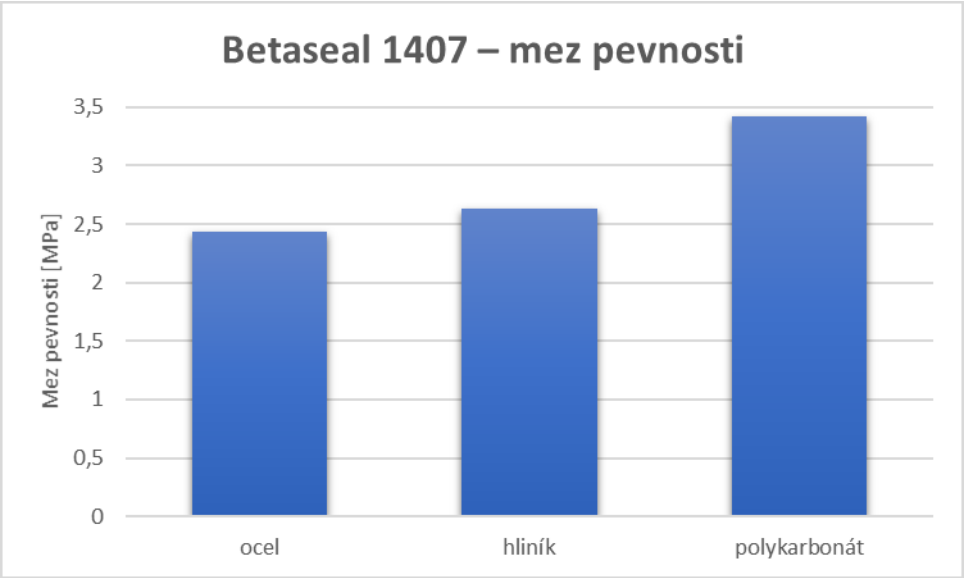
Obrázek 39 Betaforce 2816S – polykarbonát

3.1.4 **Betaseal 1407**

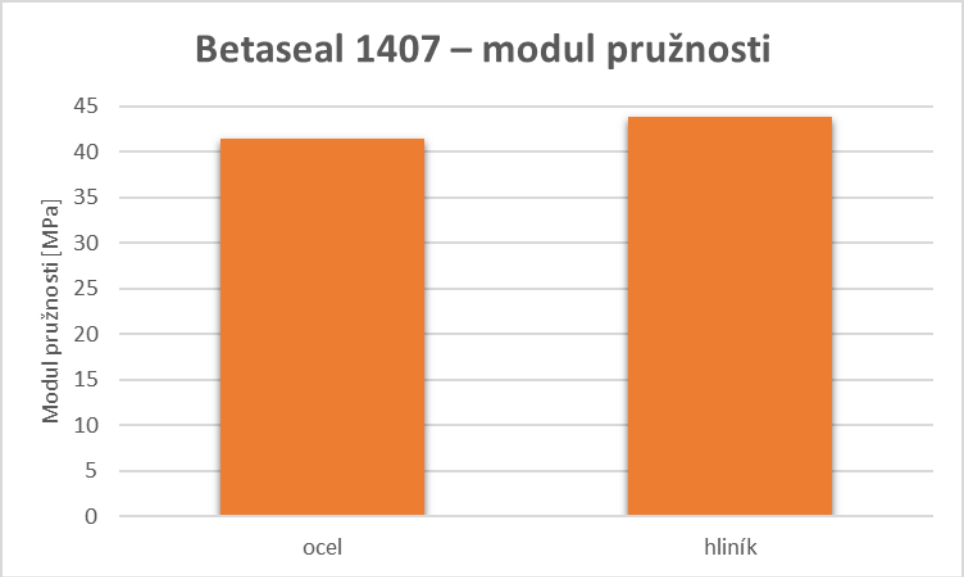
Naměřené hodnoty pro lepidlo Betaseal 1407 jsou uvedeny v tabulce 12 a grafech 7 a 8.

Tabulka 12 Betaseal 1407 – pevnost ve smyku

Adherend	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Modul pružnosti [MPa]
Ocel	1630,52 ± 77,55	2,44 ± 0,18	6,57 ± 1,4	41,4 ± 3,22
Hliník	1848,05 ± 199,9	2,63 ± 0,29	6,2 ± 0,87	43,84 ± 3,43
Polykarbonát	2602,46 ± 333,1	3,42 ± 0,37		



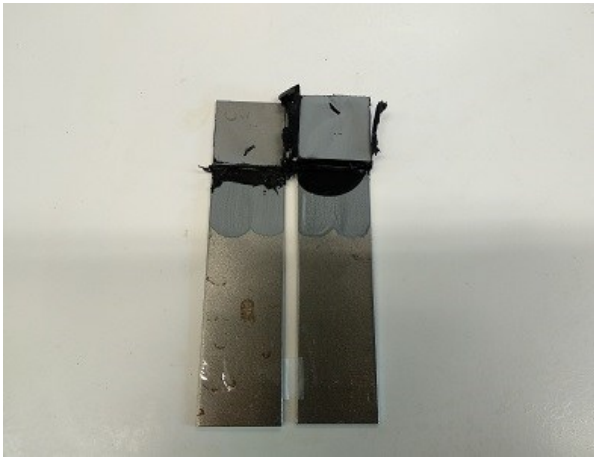
Graf 7 Betaseal 1407 – mez pevnosti ve smyku



Graf 8 Betaseal 1407 – modul pružnosti ve smyku

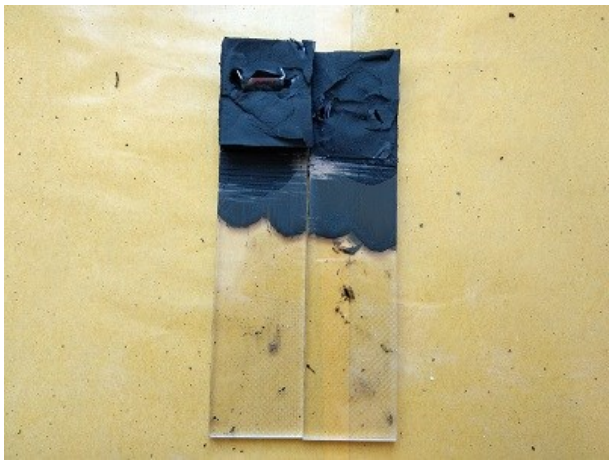
Lepidlo Betaseal 1407 dosahovalo nejvyšší pevnosti na polykarbonátových adherendech. Pevnost na oceli a hliníku je srovnatelná. Modul pružnosti byl na obou kovových adherendech taktéž srovnatelný. Hodnoty tažnosti byly na obou typech adherendů také srovnatelné.

U ocelových adherendů docházelo k adheznímu porušení lepeného spoje, u hliníkových k adheznímu, v některých případech také k adhezně-koheznímu. U polykarbonátových adherendů se jednalo o kohezní porušení. Ukázky přerušených lepených spojů jsou na obrázcích 40-42.



Obrázek 40 Betaseal 1407 – ocel

Obrázek 41 Betaseal 1407 – hliník



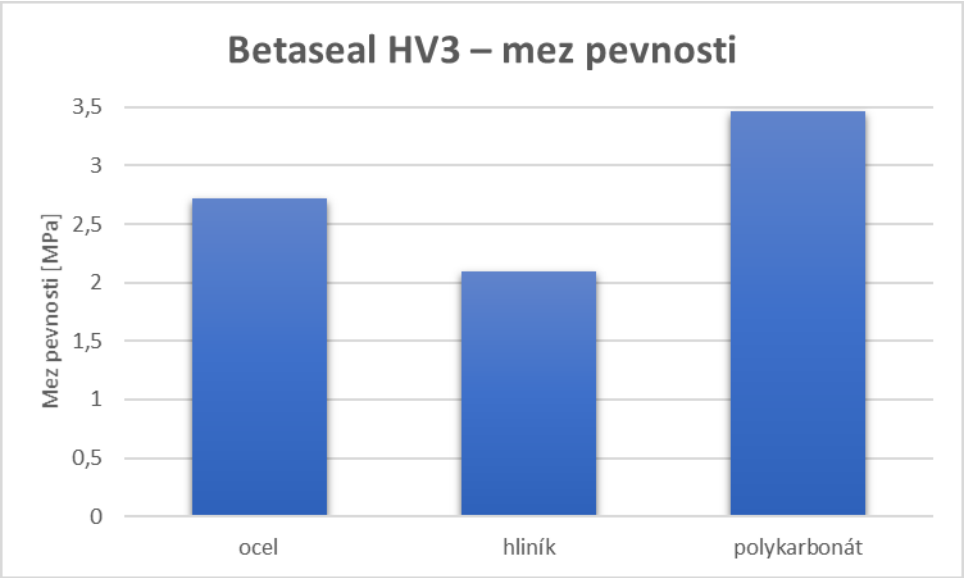
Obrázek 42 Betaseal 1407 – polykarbonát

3.1.5 **Betaseal HV 3**

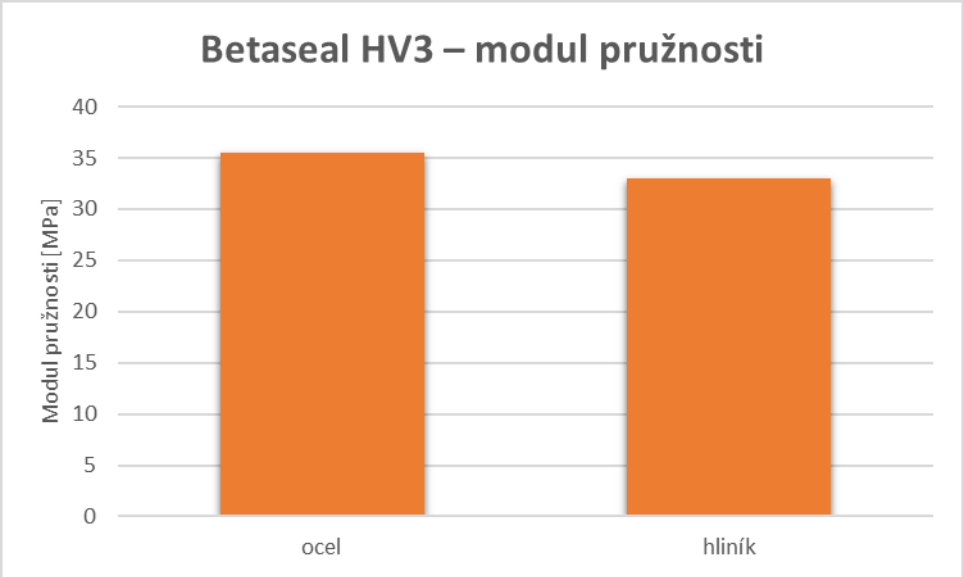
Výsledky měření pro lepidlo Betaseal HV 3 jsou uvedeny v tabulce 13 a grafech 9 a 10.

Tabulka 13 Betaseal HV 3 – pevnost ve smyku

Adherend	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Modul pružnosti [MPa]
Ocel	1758,4 ± 249,25	2,72 ± 0,45	7,61 ± 0,77	35,55 ± 2,51
Hliník	1305,4 ± 123,65	2,1 ± 0,24	6,4 ± 0,35	32,96 ± 1,98
Polykarbonát	2383,28 ± 88,04	3,47 ± 0,15		



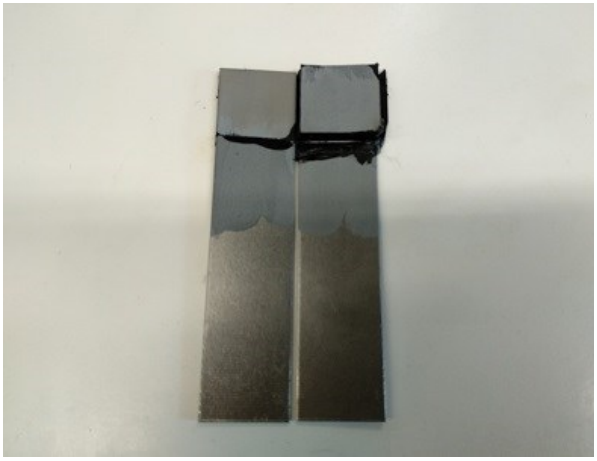
Graf 9 Betaseal HV 3 – mez pevnosti ve smyku



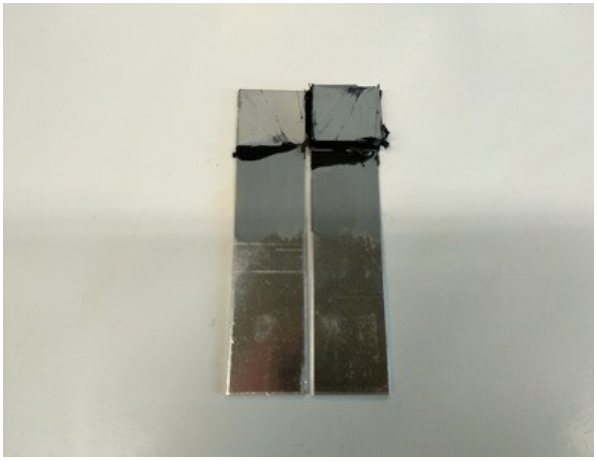
Graf 10 Betaseal HV 3 – modul pružnosti ve smyku

Lepidlo Betaseal HV 3 dosahovalo nejvyšší pevnosti na polykarbonátových adherendech. Z kovových adherendů tvořilo pevnější lepené spoje na ocelových adherendech. Modul pružnosti vycházel u obou adherendů srovnatelně, mírně vyšších hodnot nabýval na oceli. Toto lepidlo vynikalo zejména svou vysokou tažností oproti jiným lepidlům, především z řady Betaforce.

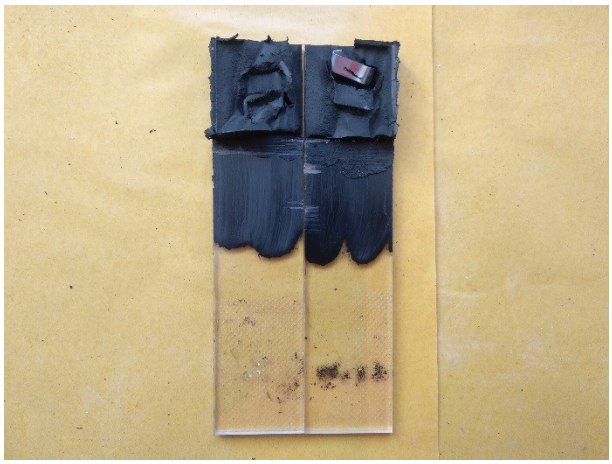
Na obou kovových adherendech docházelo k adheznímu porušení lepených spojů, na polykarbonátových adherendech k porušení koheznímu. Ukázky přerušených lepených spojů jsou na obrázcích 43-45.



Obrázek 43 Betaseal HV 3 – ocel



Obrázek 44 Betaseal HV 3 – hliník



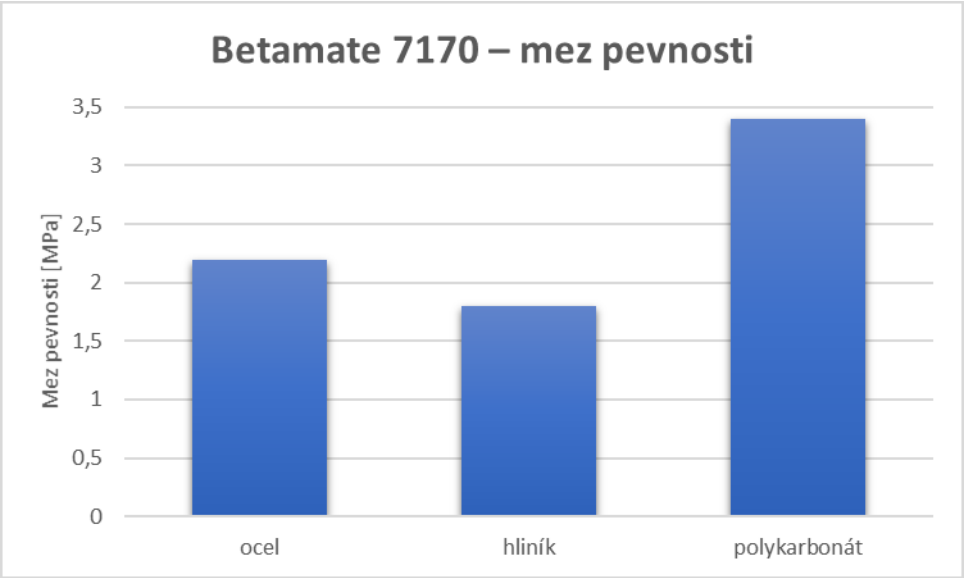
Obrázek 45 Betaseal HV 3 – polykarbonát

3.1.6 **Betamate 7170**

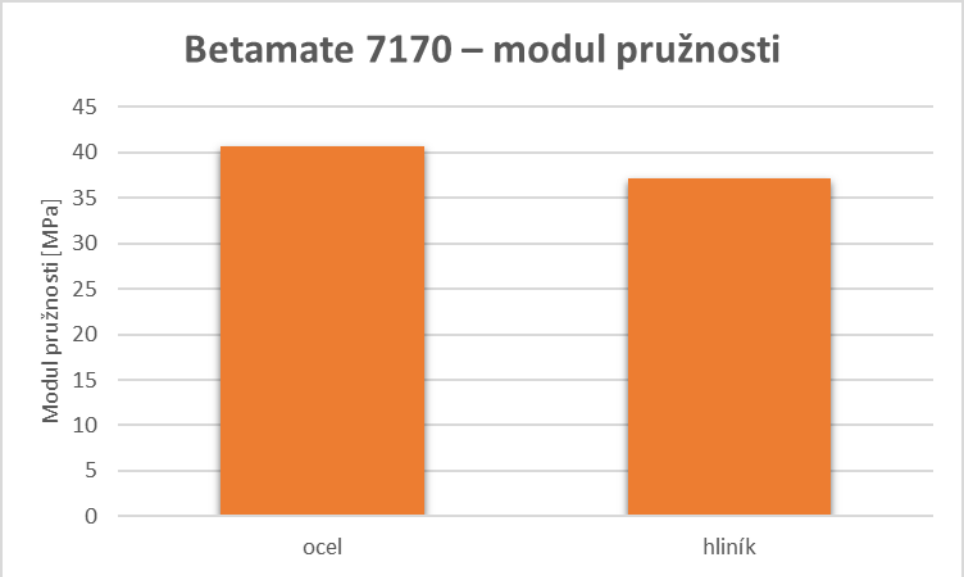
Naměřené hodnoty pro lepidlo Betamate 7170 jsou uvedeny v tabulce 14 a grafech 11 a 12.

Tabulka 14 Betamate 7170 – pevnost ve smyku

Adherend	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Modul pružnosti [MPa]
Ocel	1322,31 ± 177,7	2,19 ± 0,28	5,58 ± 0,7	40,69 ± 4,52
Hliník	1138,6 ± 119,17	1,8 ± 0,21	4,86 ± 0,59	37,18 ± 2,36
Polykarbonát	2480,97 ± 211,1	3,4 ± 0,39		



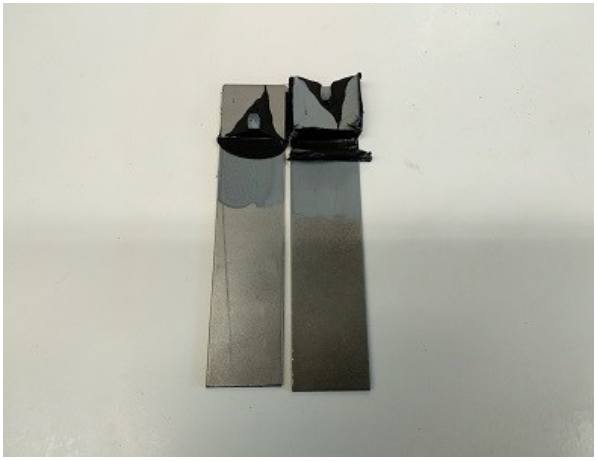
Graf 11 Betamate 7170 – mez pevnosti ve smyku



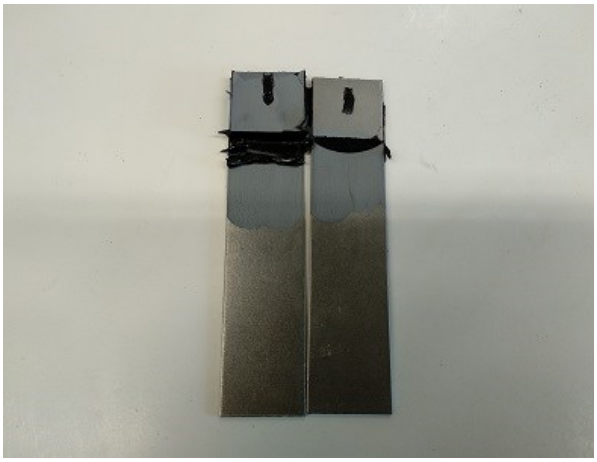
Graf 12 Betamate 7170 – modul pružnosti ve smyku

Toto lepidlo dosahovalo nejvyšší pevnosti na polykarbonátových adherendech. U kovových adherendů byla pevnost mírně lepší na adherendech z oceli. Modul pružnosti byl mírně vyšší taktéž na ocelových adherendech. Tažnost dosahovala vyšších hodnot na ocelových adherendech.

Na kovových adherenceh se vyskytovalo adhezně-kohezní porušení, v menší míře také porušení adhezní. U polykarbonátových nastávalo kohezní porušení lepeného spoje. Příklady přerušených lepených spojů jsou na obrázcích 46-50.

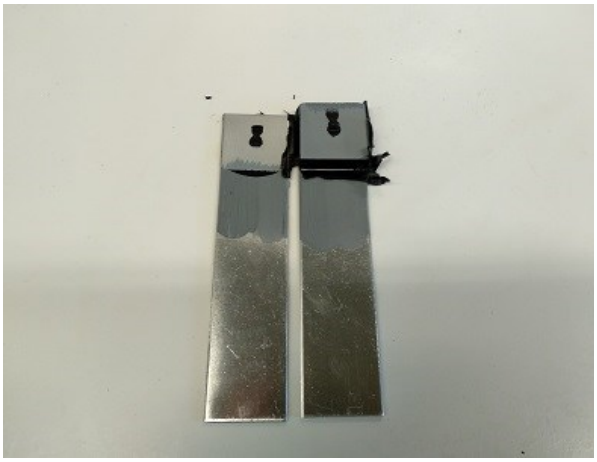


Obrázek 46 Betamate 7170 – ocel (adhezně-kohezní porušení)

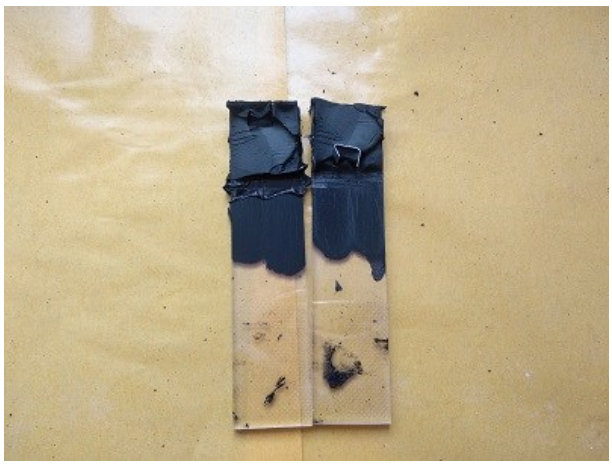


Obrázek 47 Betamate 7170 – ocel (adhezní porušení)

Obrázek 48 Betamate 7170 – hliník (adhezně-kohezní porušení)



Obrázek 49 Betamate 7170 – hliník (adhezní porušení)



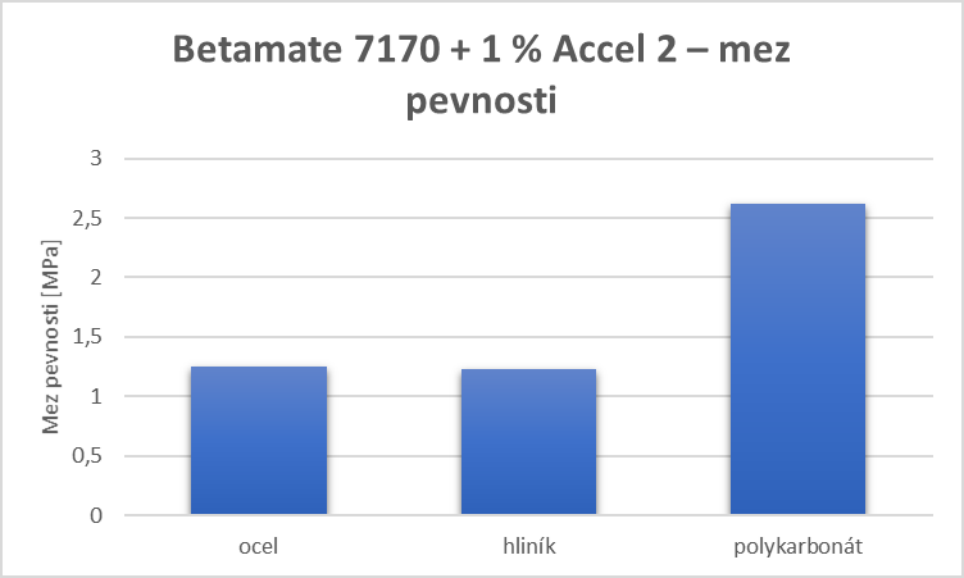
Obrázek 50 Betamate 7170 – polykarbonát

3.1.7 **Betamate 7170 + 1 % Accel 2**

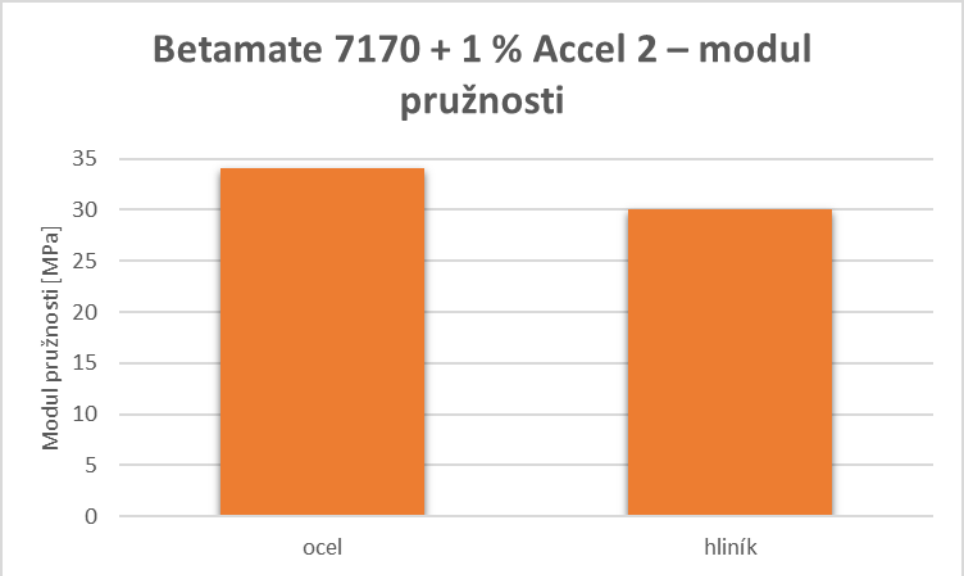
Výsledky měření pro lepidlo Betamate 7170 + 1 % Accel 2 jsou uvedeny v tabulce 15 a grafech 13 a 14.

Tabulka 15 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – mez pevnosti ve smyku

Adherend	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Modul pružnosti [MPa]
Ocel	827,95 ± 108,47	1,25 ± 0,19	3,66 ± 0,37	34,1 ± 3,55
Hliník	838,76 ± 99,53	1,23 ± 0,18	4,15 ± 0,43	29,99 ± 3,34
Polykarbonát	1942,04 ± 185,7	2,62 ± 0,27		



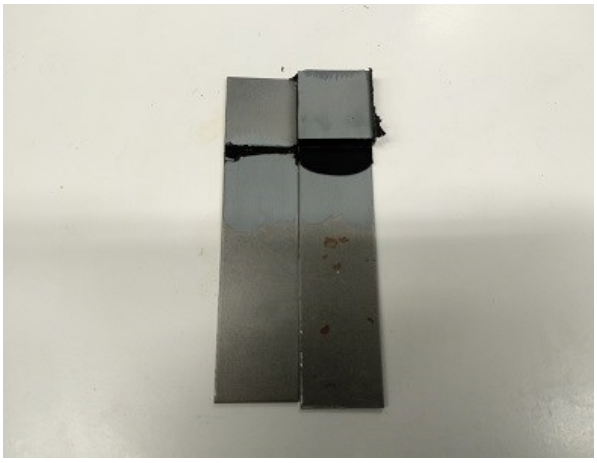
Graf 13 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – mez pevnosti ve smyku



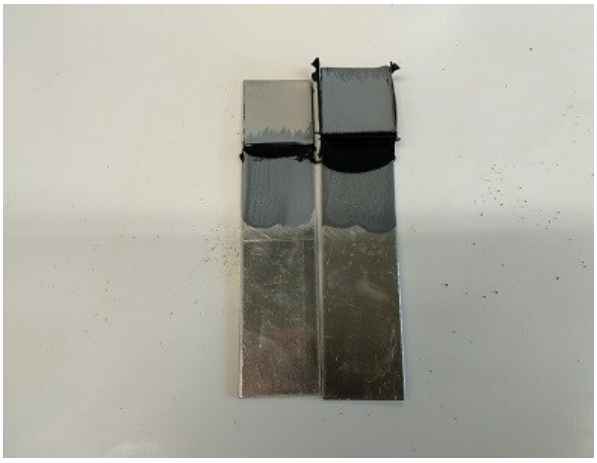
Graf 14 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – modul pružnosti ve smyku

Z tabulky a grafů vyplývá, že největší pevnosti dosahoval tento lepící systém na polykarbonátových adherendech a to s poměrně výrazným odstupem od adherendů kovových. Modul pružnosti byl mírně vyšší na ocelových adherendech. Tažnost byla vyšší na hliníkových adherendech.

Na ocelových i hliníkových adherendech docházelo k adheznímu porušení lepeného spoje, u adherendů polykarbonátových nastávalo porušení kohezní. Tímto rozdílem v typu porušení lepeného spoje lze pravděpodobně vysvětlit velmi rozdílné hodnoty meze pevnosti na polykarbonátových a kovových adherendech. Příklady porušení lepených spojů jsou na obrázcích 51-53.



Obrázek 51 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – ocel



Obrázek 52 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – hliník

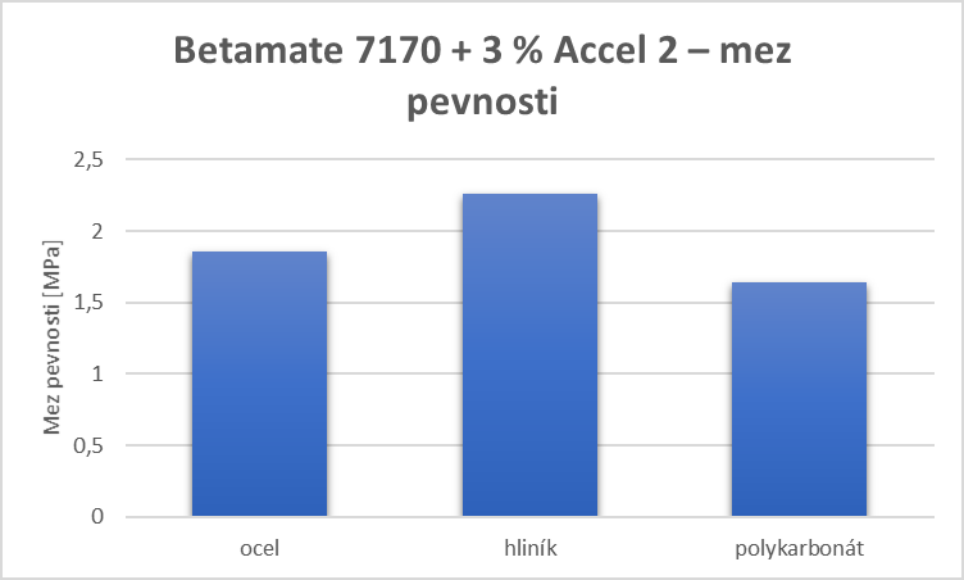
Obrázek 53 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – polykarbonát

3.1.8 **Betamate 7170 + 3 % Accel 2**

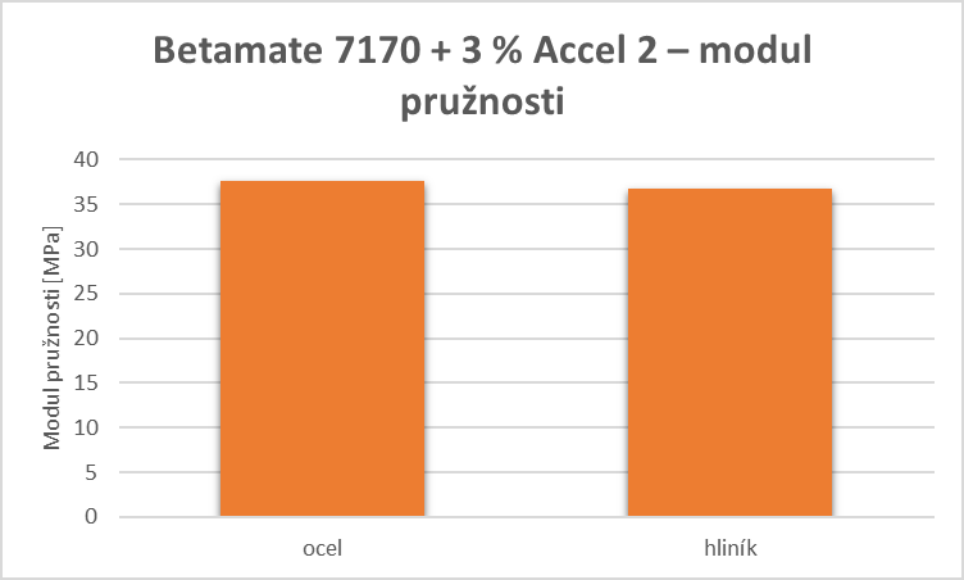
Naměřené hodnoty lepícího systému Betamate 7170 + 3 % Accel 2 jsou uvedeny v tabulce 16 a grafech 15 a 16.

Tabulka 16 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – pevnost ve smyku

Adherend	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Modul pružnosti [MPa]
Ocel	1338,97 ± 163	1,86 ± 0,21	5,14 ± 1,06	37,58 ± 6,85
Hliník	1469,33 ± 170,7	2,26 ± 0,23	6,85 ± 0,47	36,75 ± 3,35
Polykarbonát	1198,57 ± 121	1,64 ± 0,15		



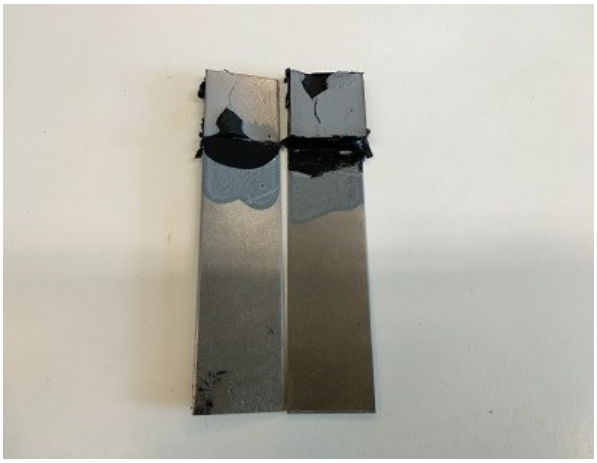
Graf 15 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – mez pevnosti ve smyku



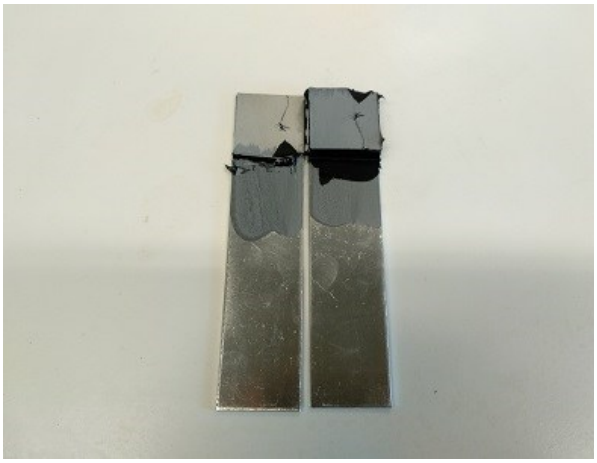
Graf 16 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – modul pružnosti ve smyku

Lepící systém Betamate 7170 + 3 % Accel 2 dosahoval nejvyšších hodnot meze pevnosti na hliníkových adherendech. Modul pružnosti byl u obou kovových adherendů srovnatelný. Tažnost dosahovala vyšších hodnot na hliníkových adherendech.

Jak u oceli, tak u hliníku docházelo převážně k adhezně-koheznímu porušení lepených spojů. U polykarbonátu docházelo k porušení koheznímu. Ukázky přerušených lepených spojů jsou zobrazeny na obrázcích 54-56.



Obrázek 54 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – ocel

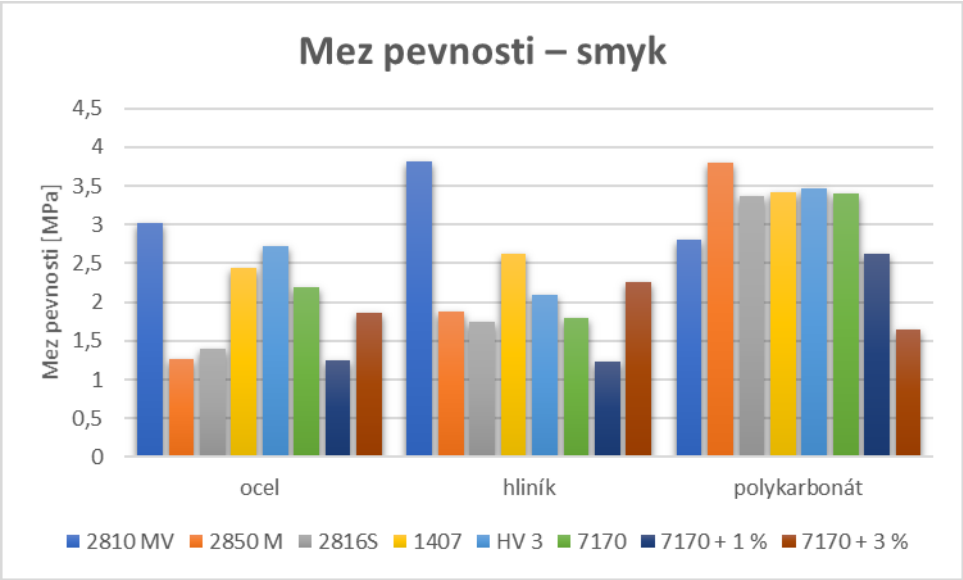


Obrázek 55 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – hliník

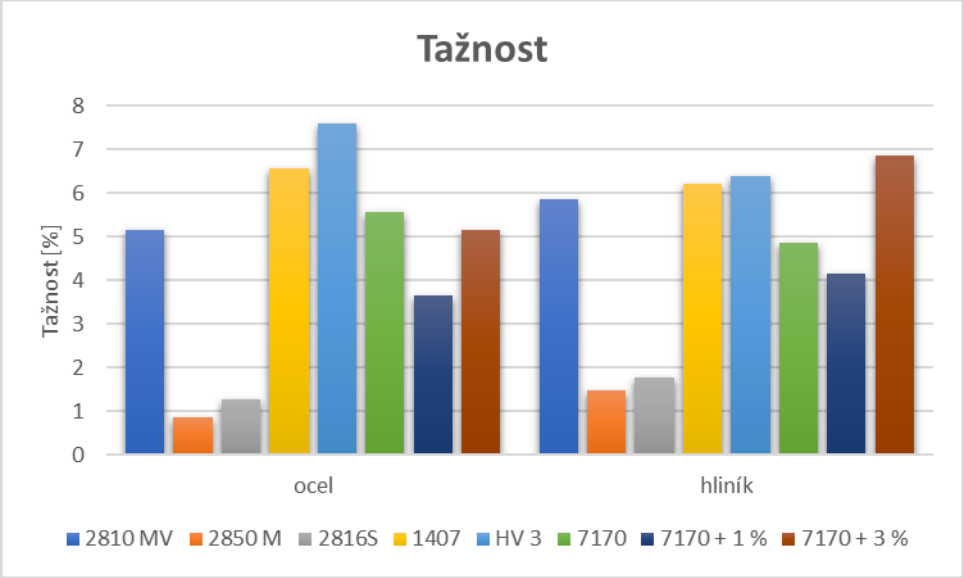
Obrázek 56 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – polykarbonát

3.1.9 Vzájemné srovnání mechanických vlastností ve smyku

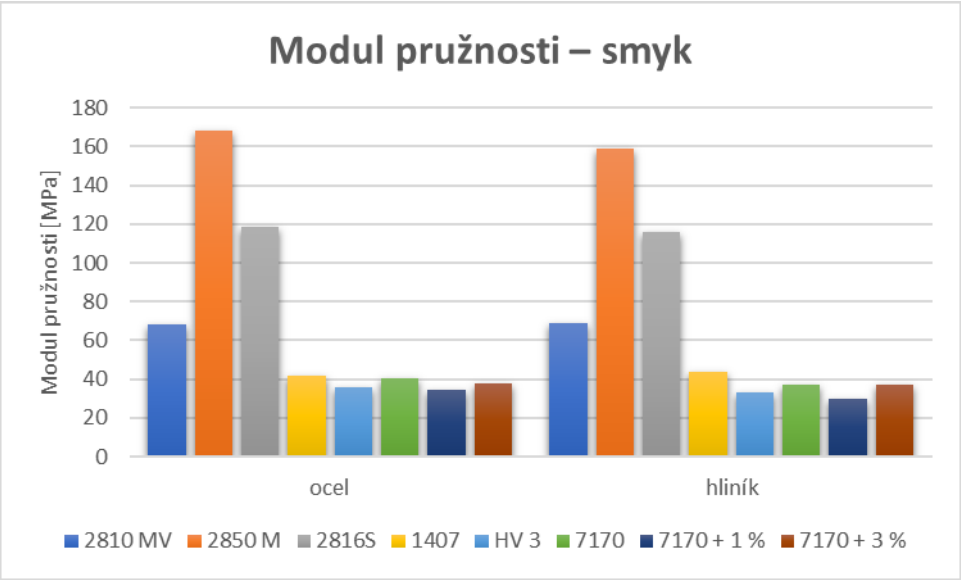
V následujících grafech 17, 18 a 19 jsou přehledně zobrazeny naměřené hodnoty pro všechny lepící systémy.



Graf 17 Srovnání všech lepidel – mez pevnosti ve smyku



Graf 18 Srovnání všech lepidel – tažnost



Graf 19 Srovnání všech lepidel – modul pružnosti ve smyku

Z grafů je patrné, že nejvyšších hodnot mezí pevnosti bylo obecně dosahováno na polykarbonátových adherendech (s výjimkou lepidel Betaforce 2850M a systému Betamate 7170 + 3 % Accel 2). Na kovových adherendech byly nejpevnější spoje tvořeny za použití lepidla Betamate 2810 MV, u polykarbonátu nejvyšší pevnosti dosahovalo lepidlo Betaforce 2850 M.

Tažnost lepidel byla velice proměnlivá, lepidla třídy Betaforce dosahovala velmi nízkých hodnot. Nejvyšších hodnot dosahovala lepidla třídy Betaseal, konkrétně 1407 a HV 3.

Modul pružnosti se v závislosti na použitém typu adherendu příliš neměnil, rozdíl na adherendech byl spíše dán kvalitou lepeného spoje. Nejvyšších modulů pružnosti dosahovala lepidla třídy Betaforce, tedy lepidlo 2850 M a 2816S. Nejnižších modulů pružnosti dosahoval lepící systém Betamate 7170 + 1 % Accel 2 a lepidlo Betaseal HV 3.

3.2 Výsledky měření pevnosti v tahu

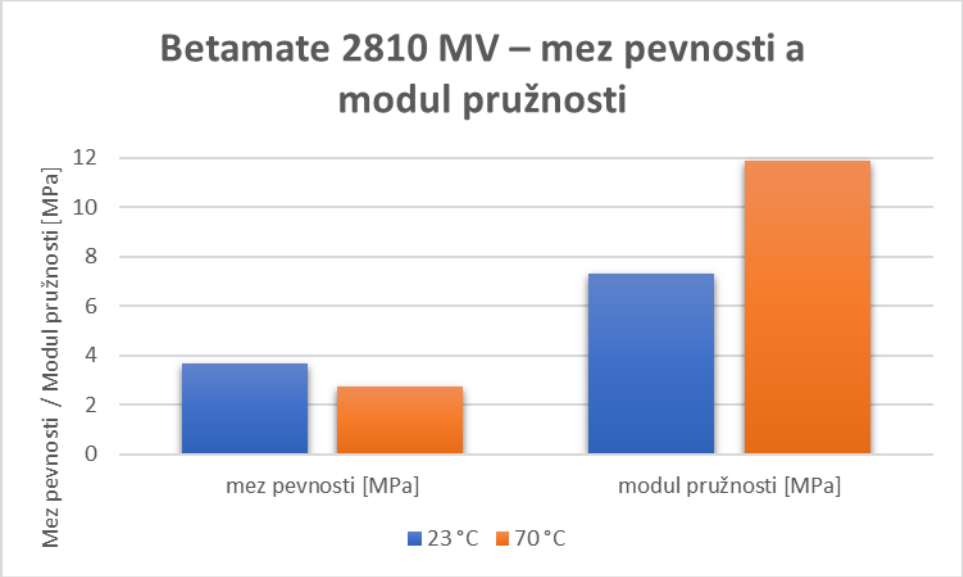
V následujících kapitolách jsou přehledně zobrazeny naměřené hodnoty pro teploty měření 23 °C a 70 °C. V grafech jsou zobrazeny všechny tři sledované veličiny, tedy mez pevnosti v tahu, prodloužení a modul pružnosti v tahu.

3.2.1 Betamate 2810 MV

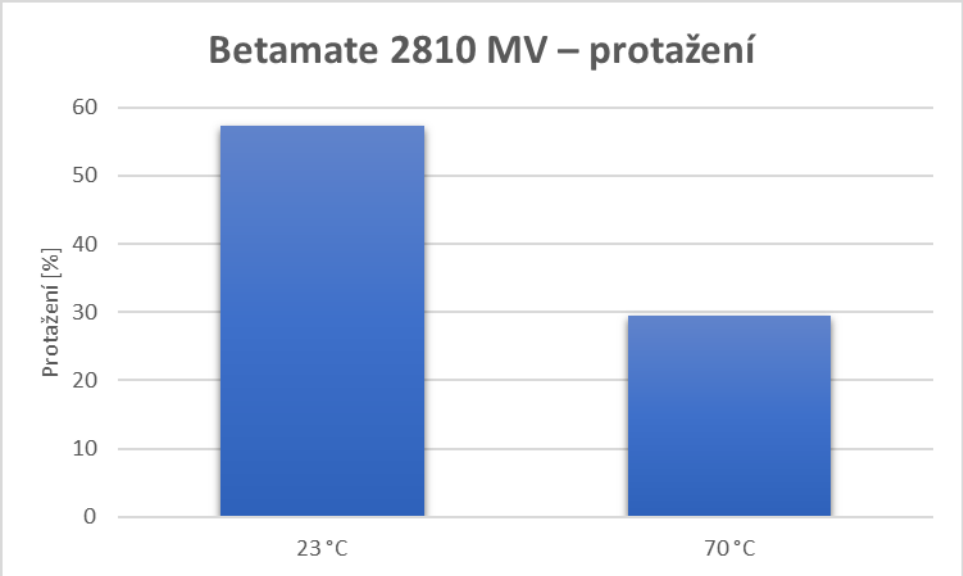
Naměřené hodnoty pro lepidlo Betamate 2810 MV jsou zobrazeny v tabulce 17 a grafech 20 a 21.

Tabulka 17 Betamate 2810 MV – pevnost v tahu

Teplota	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Protažení [%]	Modul pružnosti [MPa]
23 °C	36,55 ± 6,58	3,69 ± 0,69	57,29 ± 9,36	7,3 ± 0,48
70 °C	25,05 ± 3,66	2,71 ± 0,46	29,4 ± 7,98	11,9 ± 2,42



Graf 20 Betamate 2810 MV – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu



Graf 21 Betamate 2810 MV – protažení

Z tabulek a grafu je patrné, že při zvýšení teploty došlo ke snížení meze pevnosti a zvýšení modulu pružnosti. Protažení tohoto lepidla při zvýšení teploty poklesla téměř o polovinu. Ukázka původního a přetrženého vzorku je zobrazena na obrázku 57.

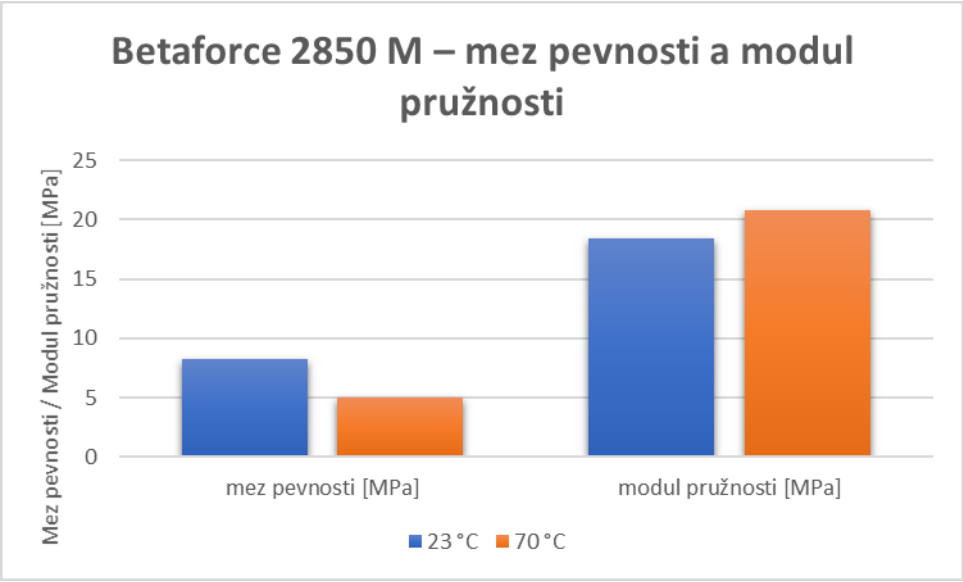
Obrázek 57 Původní a přetržený vzorek – měření pevnosti v tahu

3.2.2 **Betaforce 2850 M**

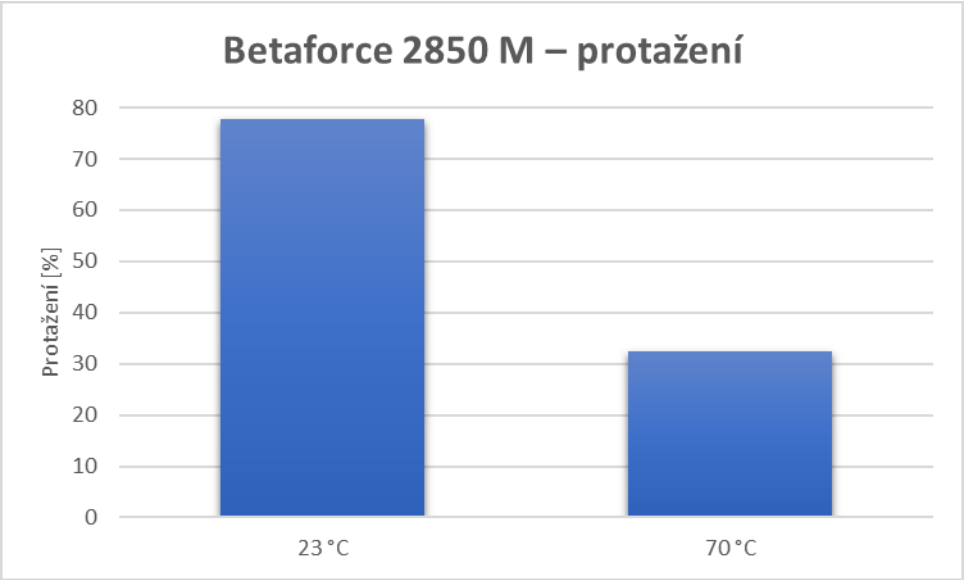
Naměřené hodnoty lepidla Betaforce 2850 M jsou zobrazeny v tabulce 18 a grafech 22 a 23.

Tabulka 18 Betaforce 2850 M – pevnost v tahu

Teplota	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Protažení [%]	Modul pružnosti [MPa]
23 °C	87,9 ± 12,18	8,3 ± 0,25	77,69 ± 7,04	18,47 ± 0,84
70 °C	49,1 ± 8,34	4,98 ± 0,28	32,51 ± 1,83	20,86 ± 1,88



Graf 22 Betaforce 2850 M – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu



Graf 23 Betaforce 2850 M – protažení

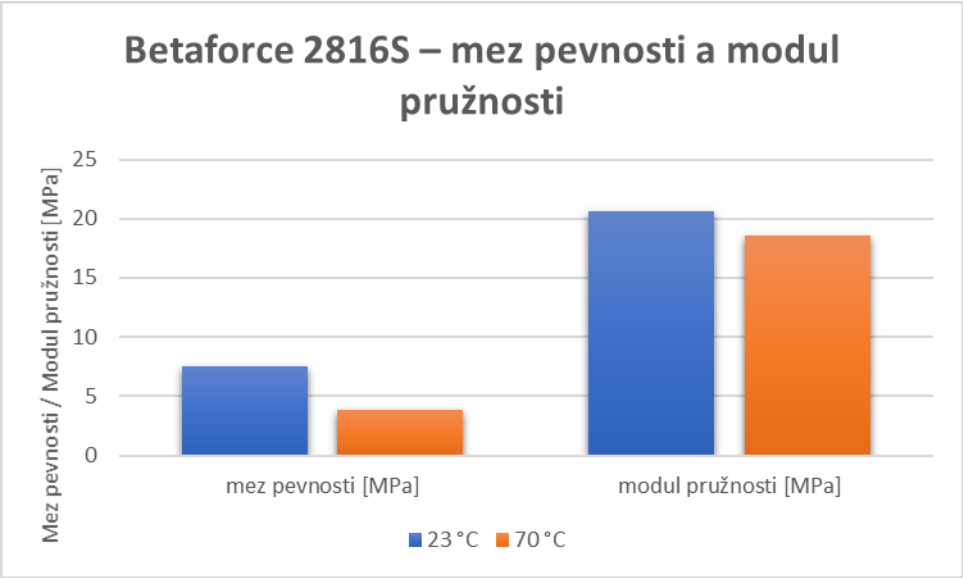
Změna vlastností je zde podobná, jako je tomu u lepidla Betamate 2810 MV. Opět se zvýšením teploty došlo k poklesu meze pevnosti, zvýšení modulu pružnosti. Tažnost opět poklesla zhruba na poloviční hodnotu.

3.2.3 **Betaforce 2816S**

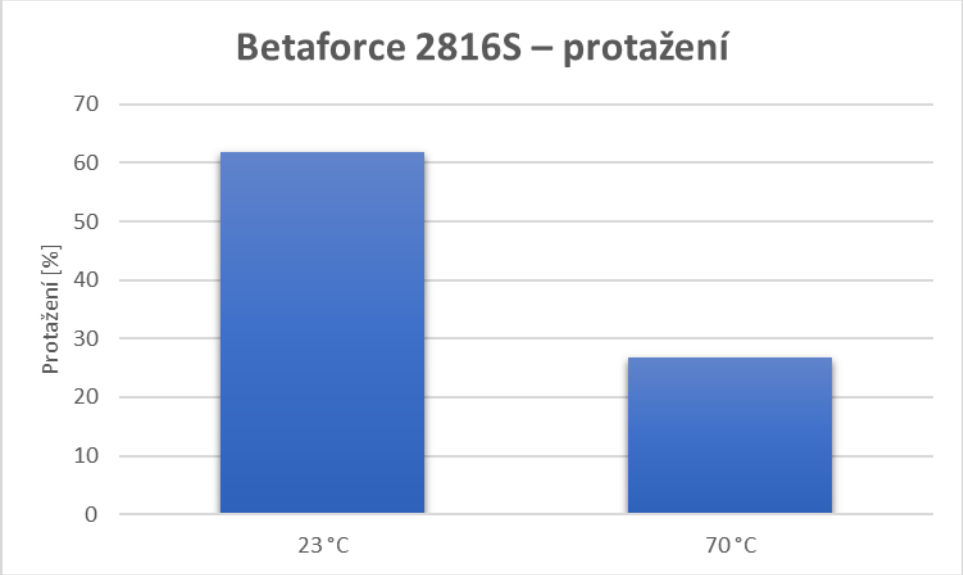
Naměřené hodnoty pro lepidlo Betaforce 2816S jsou uvedeny v tabulce 19 a grafech 24 a 25.

Tabulka 19 Betaforce 2816S – pevnost v tahu

Teplota	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Protažení [%]	Modul pružnosti [MPa]
23 °C	88,24 ± 14,69	7,55 ± 0,26	61,78 ± 2	20,65 ± 1,92
70 °C	45,87 ± 3,38	3,88 ± 0,29	26,78 ± 2,03	18,59 ± 1,08



Graf 24 Betaforce 2816S – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu



Graf 25 Betaforce 2816S – protažení

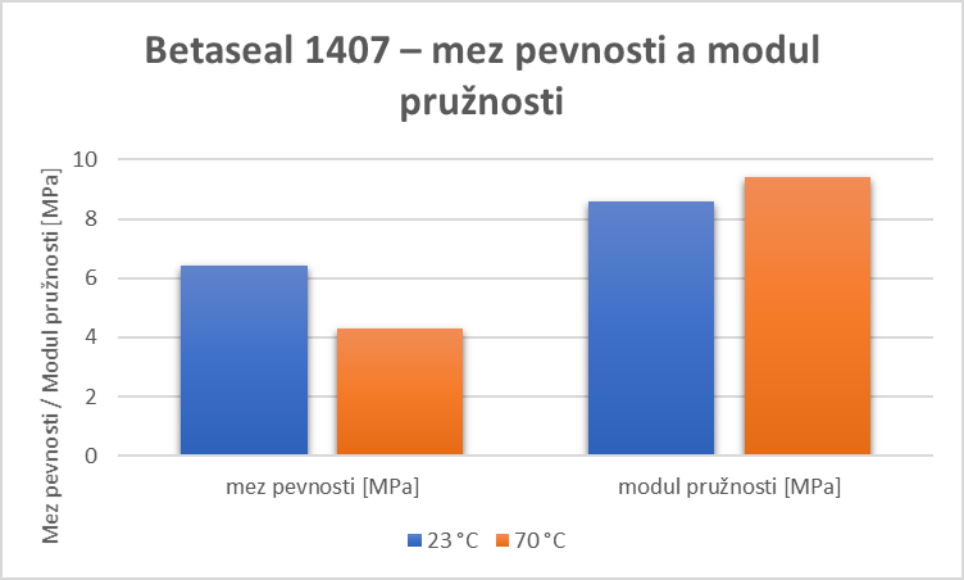
U lepidla Betaforce 2816S došlo se zvýšením teploty opět k poklesu meze pevnosti. Modul pružnosti zde velmi mírně poklesl. Protažení pokleslo o více než polovinu.

3.2.4 Betaseal 1407

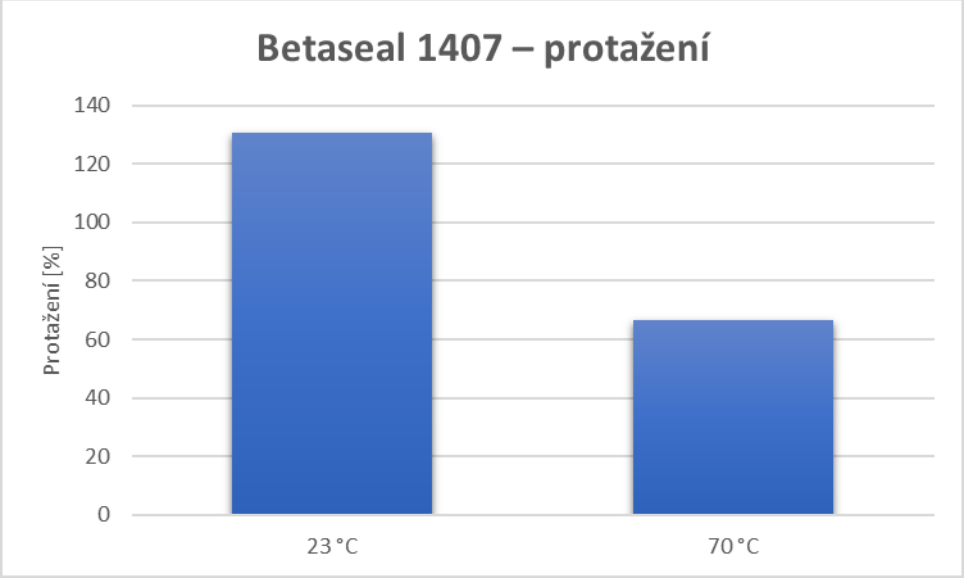
Naměřené hodnoty lepidla Betaseal 1407 jsou uvedeny v tabulce 20 a grafech 26 a 27.

Tabulka 20 Betaseal 1407 – pevnost v tahu

Teplota	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Protažení [%]	Modul pružnosti [MPa]
23 °C	64,6 ± 3,22	6,41 ± 0,48	130,81 ± 10,46	8,6 ± 0,66
70 °C	51,05 ± 7,45	4,29 ± 0,61	66,48 ± 11,66	9,43 ± 0,89



Graf 26 Betaseal 1407 – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu



Graf 27 Betaseal 1407 – protažení

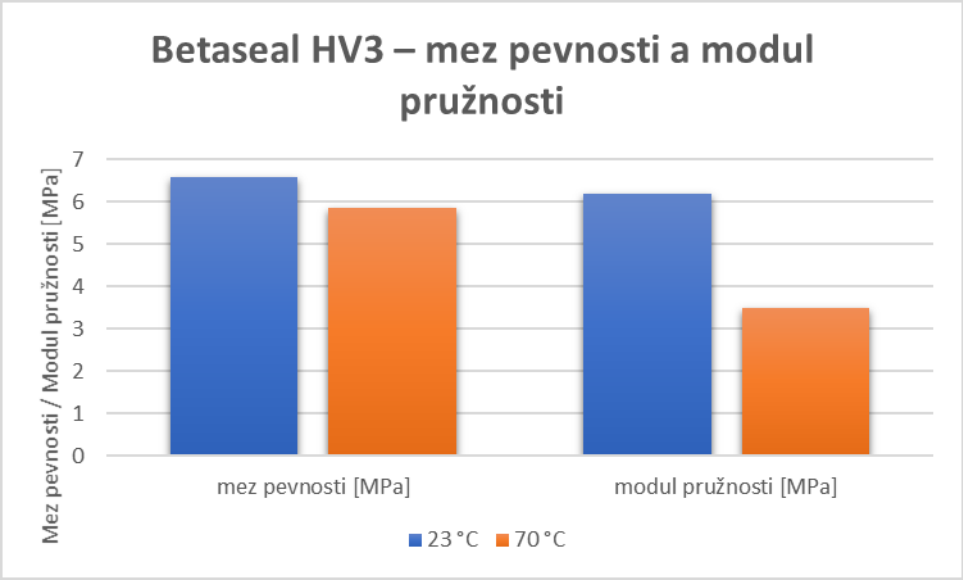
Z tabulky a grafů je patrný pokles meze pevnosti, mírný vzrůst modulu pružnost. Protažení při zvýšení teploty pokleslo zhruba o polovinu.

3.2.5 **Betaseal HV 3**

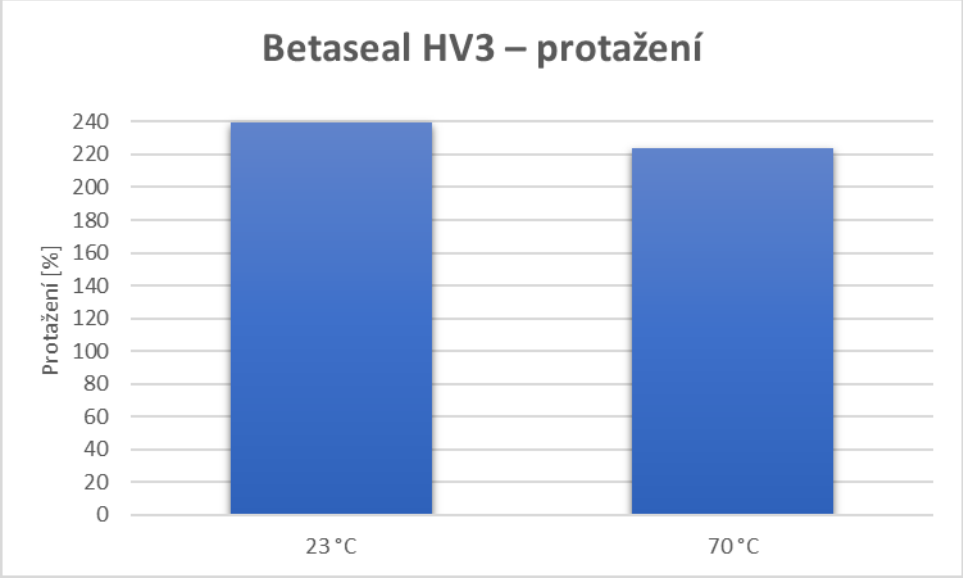
Naměřené hodnoty lepidla Betaseal HV 3 jsou uvedeny v tabulce 21 a grafech 28 a 29.

Tabulka 21 Betaseal HV 3 – pevnost v tahu

Teplota	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Protažení [%]	Modul pružnosti [MPa]
23 °C	61,07 ± 7,16	6,58 ± 0,78	239,8 ± 31,44	6,17 ± 0,35
70 °C	53,04 ± 3,08	5,84 ± 0,49	224,1 ± 7,35	3,49 ± 0,47



Graf 28 Betaseal HV 3 – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu



Graf 29 Betaseal HV 3 – protažení

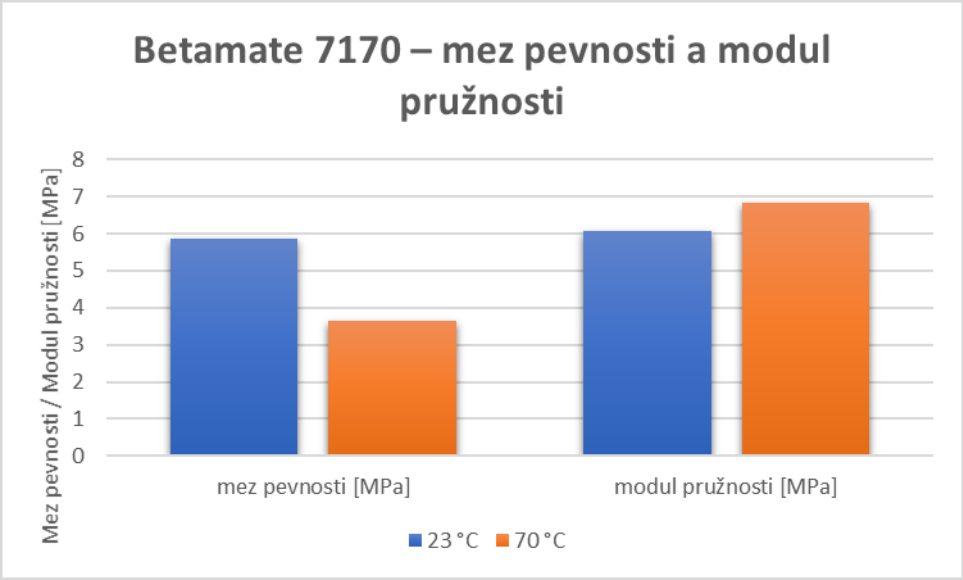
Z grafů a tabulky je patrný mírný pokles meze pevnosti, avšak modul pružnosti zde při zvýšení teploty klesl mnohem markantněji, téměř o polovinu. Došlo jen k mírnému poklesu protažení.

3.2.6 **Betamate 7170**

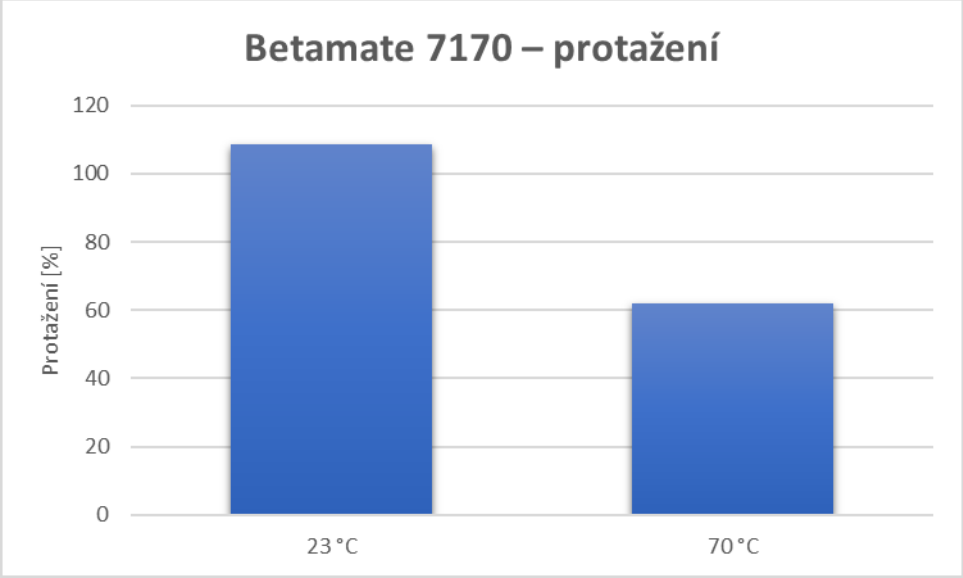
Naměřené hodnoty lepidla Betamate 7170 jsou zobrazeny v tabulce 22 a grafech 30 a 31.

Tabulka 22 Betamate 7170 – pevnost v tahu

Teplota	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Protažení [%]	Modul pružnosti [MPa]
23 °C	56,6 ± 6,54	5,87 ± 0,76	108,43 ± 20,11	6,07 ± 0,32
70 °C	31,3 ± 2,43	3,64 ± 0,37	61,91 ± 5,97	6,84 ± 1,16



Graf 30 Betamate 7170 – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu



Graf 31 Betamate 7170 – protažení

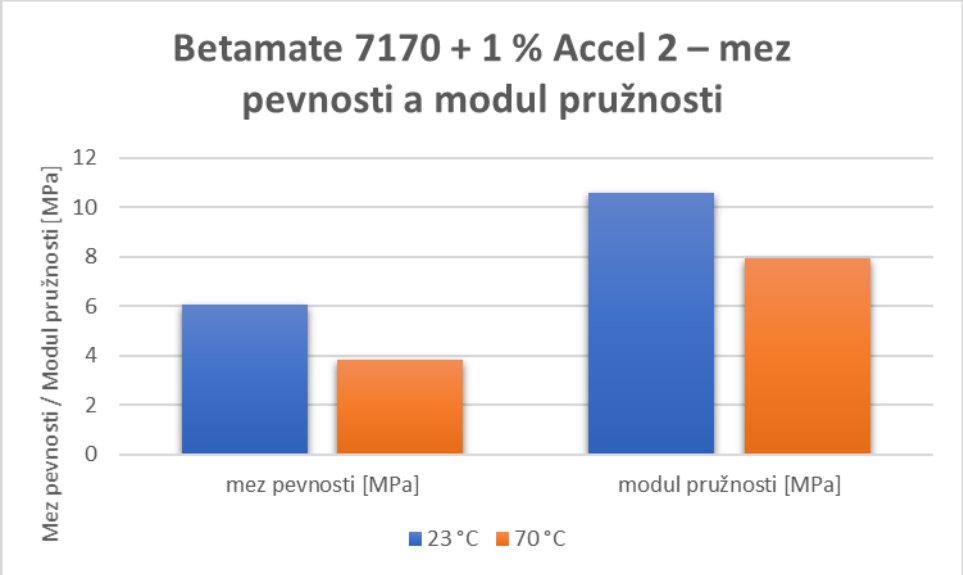
U lepidla Betamate 7170 došlo se zvýšením teploty k poměrně výraznému poklesu meze pevnosti. Modul pružnosti velmi mírně vzrostl a protažení pokleslo téměř o polovinu.

3.2.7 **Betamate 7170 + 1 % Accel 2**

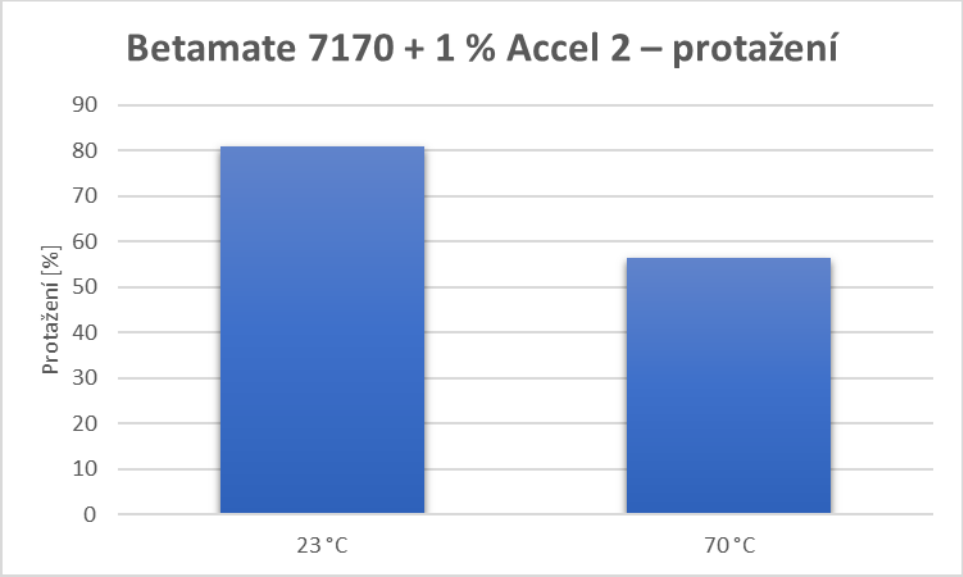
Naměřené hodnoty pro lepící systém Betamate 7170 + 1 % Accel 2 jsou uvedeny v tabulce 23 a grafech 32 a 33.

Tabulka 23 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – pevnost v tahu

Teplota	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Protažení [%]	Modul pružnosti [MPa]
23 °C	55,53 ± 7,94	6,07 ± 0,88	80,82 ± 15,24	10,56 ± 0,69
70 °C	35,13 ± 7,3	3,84 ± 0,51	56,54 ± 10,68	7,9 ± 1,24



Graf 32 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu



Graf 33 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – protažení

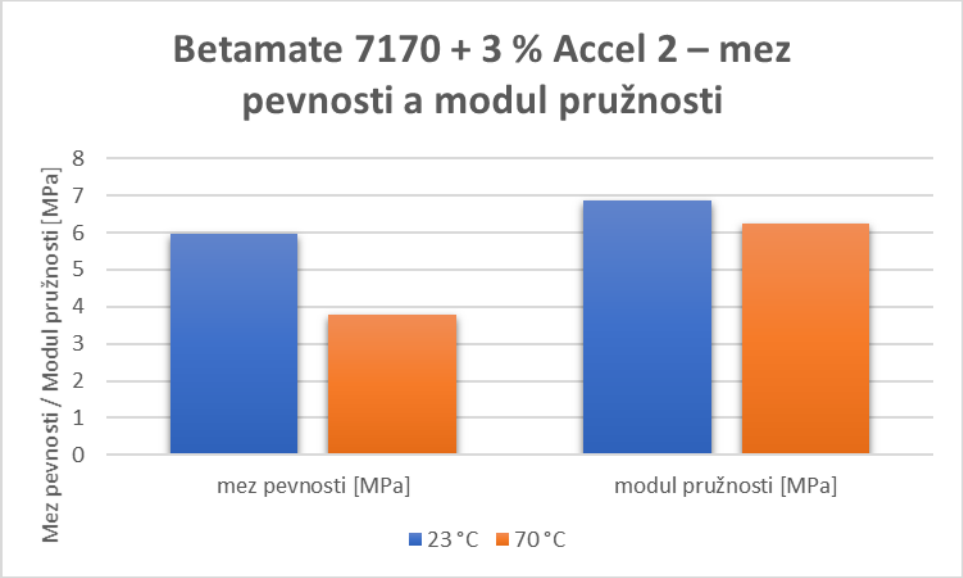
U tohoto lepícího systému došlo se zvýšením teploty jak k poklesu meze pevnosti, tak k poklesu modulu pružnosti. Protažení pokleslo zhruba o třetinu.

3.2.8 **Betamate 7170 + 3 % Accel 2**

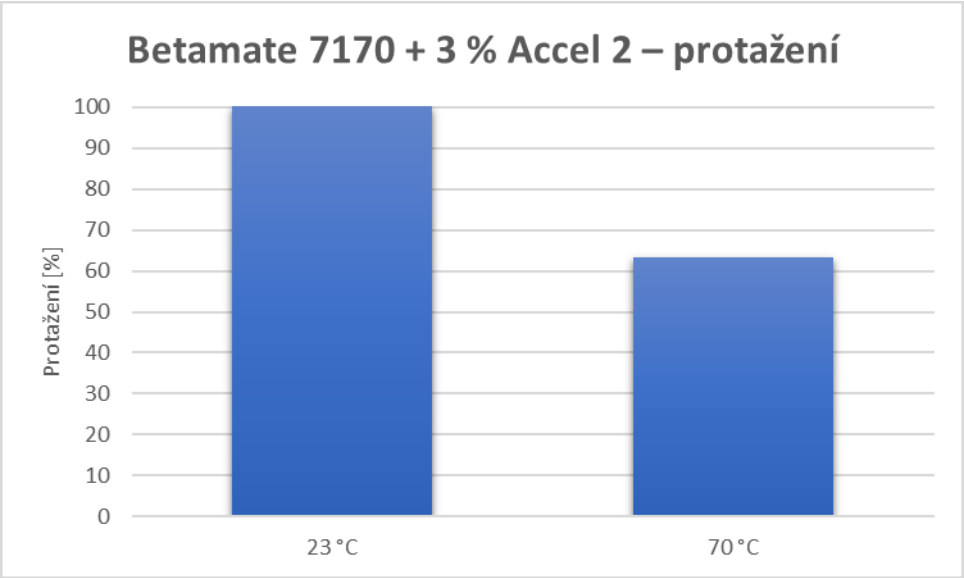
Výsledky lepícího systému Betamate 7170 + 3 % Accel 2 jsou uvedeny v tabulce 24 a grafech 34 a 35.

Tabulka 24 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – pevnost v tahu

Teplota	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Protažení [%]	Modul pružnosti [MPa]
23 °C	61,2 ± 5,52	5,95 ± 1,15	100,3 ± 9,25	6,86 ± 1,11
70 °C	36,95 ± 5,08	3,79 ± 0,52	63,27 ± 11,69	6,23 ± 0,8



Graf 34 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu

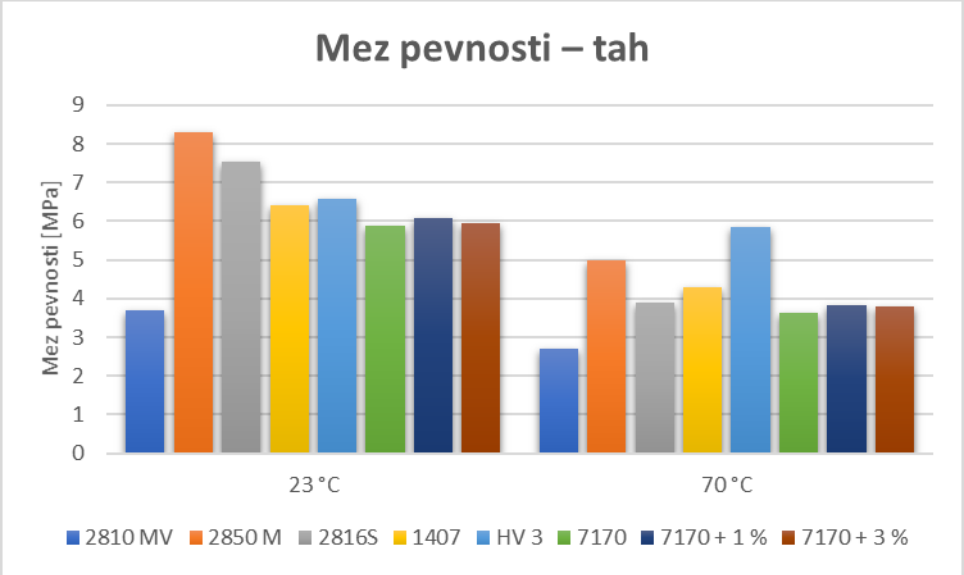


Graf 35 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – protažení

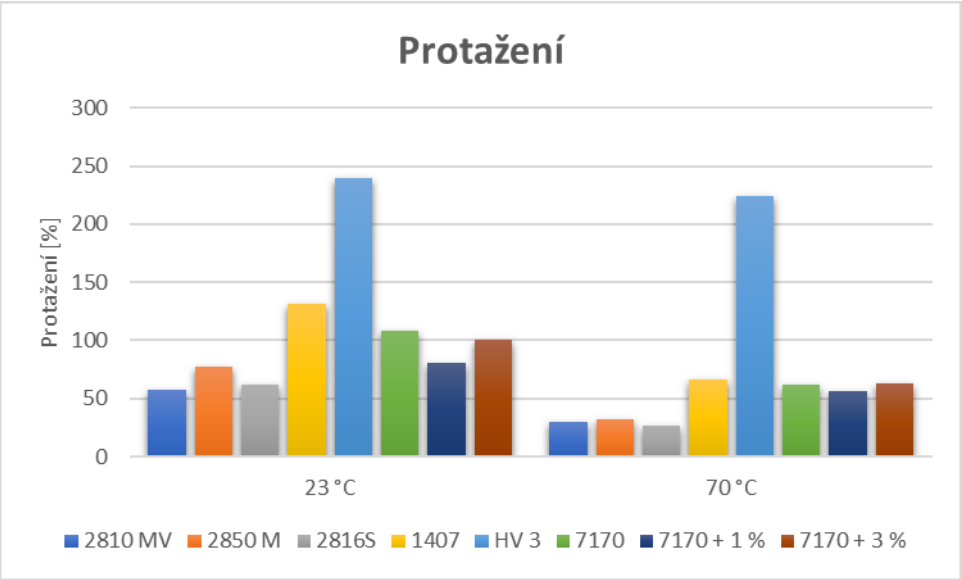
U lepícího systému Betamate 7170 + 3 % Accel 2 došlo se zvýšením teploty k poklesu meze pevnosti i modulu pružnosti. Protažení pokleslo zhruba o třetinu.

3.2.9 Vzájemné srovnání mechanických vlastností v tahu

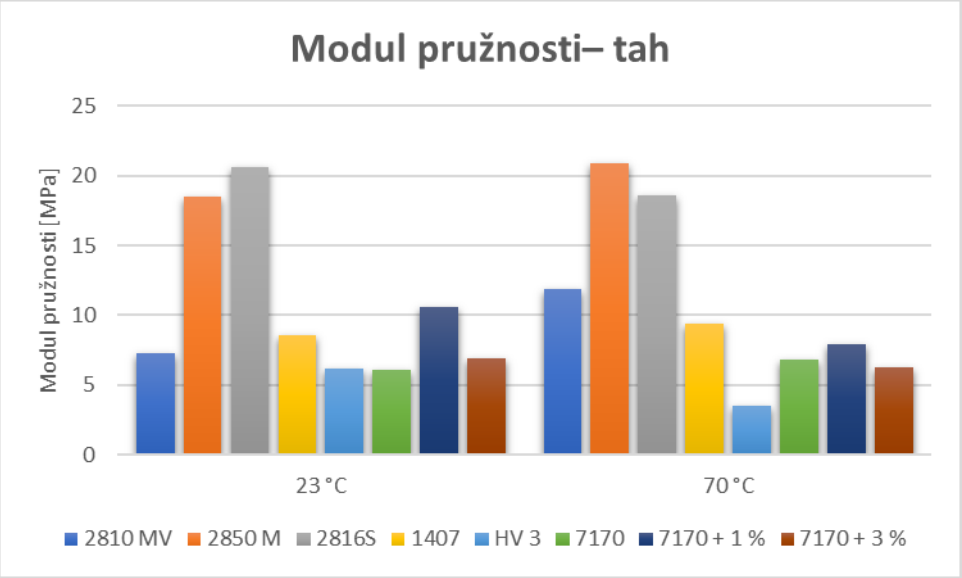
V následujících grafech 36, 37 a 38 jsou srovnány naměřené hodnoty všech lepicích systémů.



Graf 36 Srovnání všech lepidel – mez pevnosti v tahu



Graf 37 Srovnání všech lepidel – protažení



Graf 38 Srovnání všech lepidel – modul pružnosti v tahu

Za laboratorní teploty dosahovala největší pevnosti lepidla 2850 M a 2816S třídy Betaforce. Při zvýšení teploty však jejich pevnost poklesla a předčilo je lepidlo Betaseal HV 3. U všech lepidel došlo se zvýšením teploty k poklesu meze pevnosti, u některých byl tento pokles velmi výrazný (Betaforce 2850 M), u některých došlo pouze k poklesu mírnému (Betaseal HV 3).

Při zvýšení teploty pokleslo u všech lepidel i protažení. Zdaleka nejvyšších hodnot dosahovalo lepidlo Betaseal HV 3, a to za obou teplotních režimů, u tohoto lepidla navíc nebyl pokles protažení tak výrazný. Lepidlo Betaseal HV 3 se vzhledem k naměřeným hodnotám jeví jako nejlepší pro použití při aplikacích za vyšších teplot.

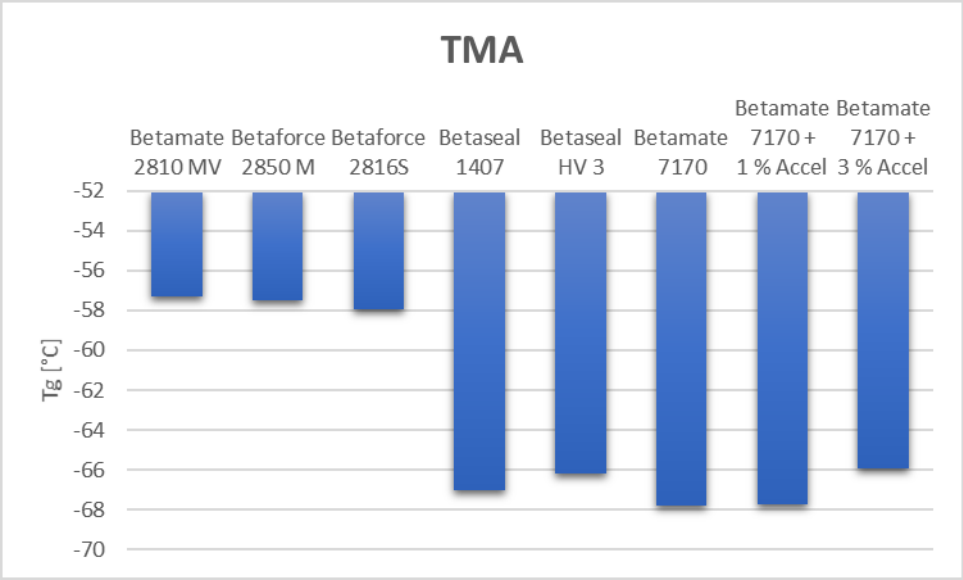
Na zvýšení teploty reagoval modul pružnosti lepidel různě. U některých lepidel modul vzrostl, u některých došlo k poklesu, ale nebyly to většinou změny výrazné.

3.3 Výsledky měření TMA

Výsledky měření teploty skelného přechodu pomocí metody TMA jsou zobrazeny v tabulce 25 a grafu 39.

Tabulka 25 Měření TMA

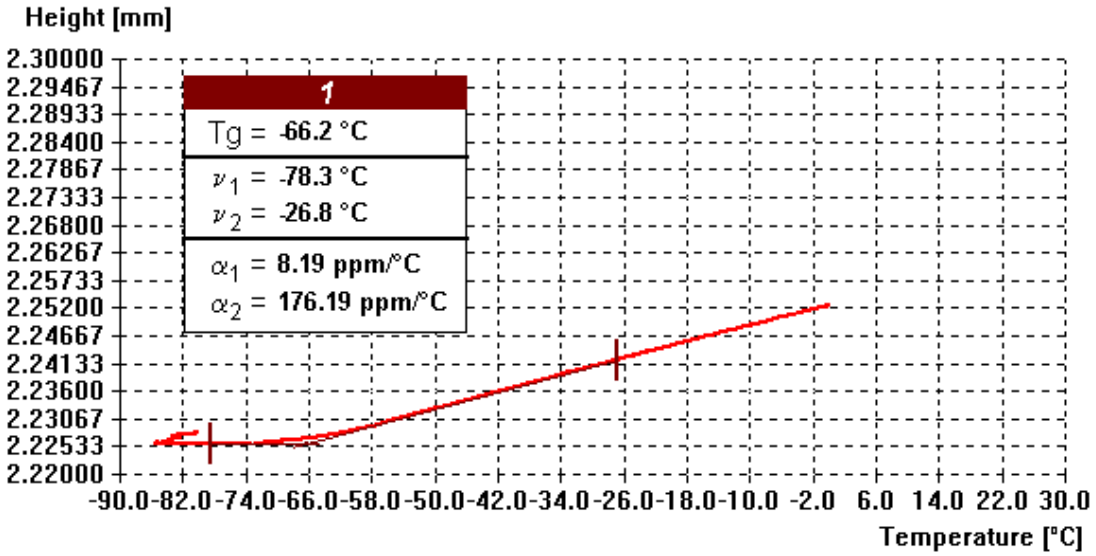
Lepidlo	T_g [°C]
Betamate 2810 MV	−57,3
Betaforce 2850 M	−57,5
Betaforce 2816 S	−57,95
Betaseal 1407	−67
Betaseal HV 3	−66,2
Betamate 7170	−67,8
Betamate 7170 + 1 % Accel 2	−67,7
Betamate 7170 + 3 % Accel 2	−65,9



Graf 39 Měření TMA

Z tabulky a grafu vyplývá, že se všechny zkoumané lepící systémy nacházejí za laboratorní teploty v kaučukovitém stavu, neboť jejich teplota skelného přechodu se nachází hluboko pod

touto teplotou. Nejnižší teplotu skelného přechodu vykazovalo lepidlo Betamate 7170. Přídavek akcelerátoru Accel 2 u tohoto lepidla způsobil změnu teploty skelného přechodu až při vyšší koncentraci (3 %). Lepidla Betamate 2810 MV, Betaforce 2850 M a Betaforce 2816S měla teploty skelného přechodu zhruba o 10 °C vyšší než ostatní lepidla. Příklad vyhodnocení teploty skelného přechodu pomocí metody TMA je zobrazen na obrázku 58.



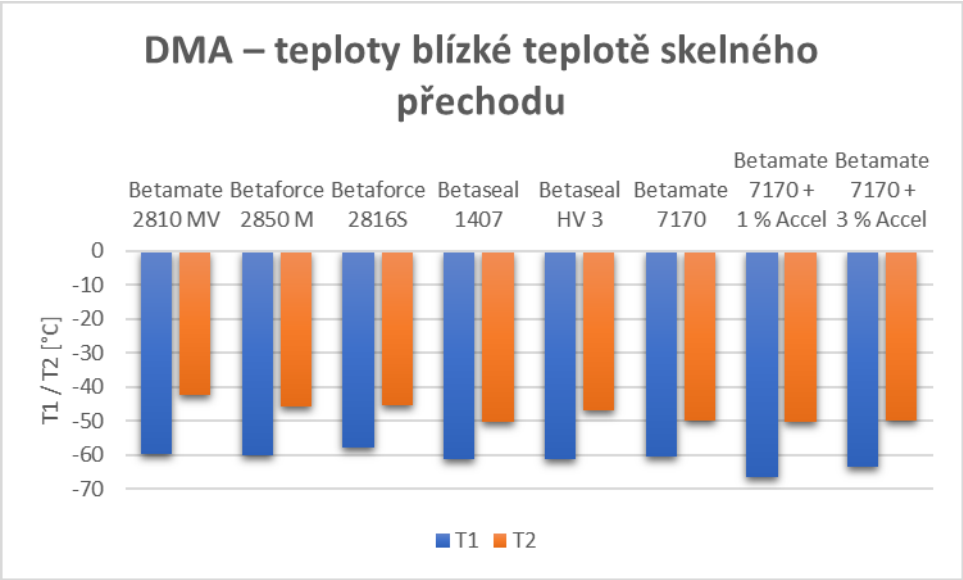
Obrázek 58 TMA – vyhodnocení (Betaseal HV 3)

3.4 Výsledky měření DMA

Výsledky měření teplot blízkých teplotě skelného přechodu jsou uvedeny v tabulce 26 a grafu 40.

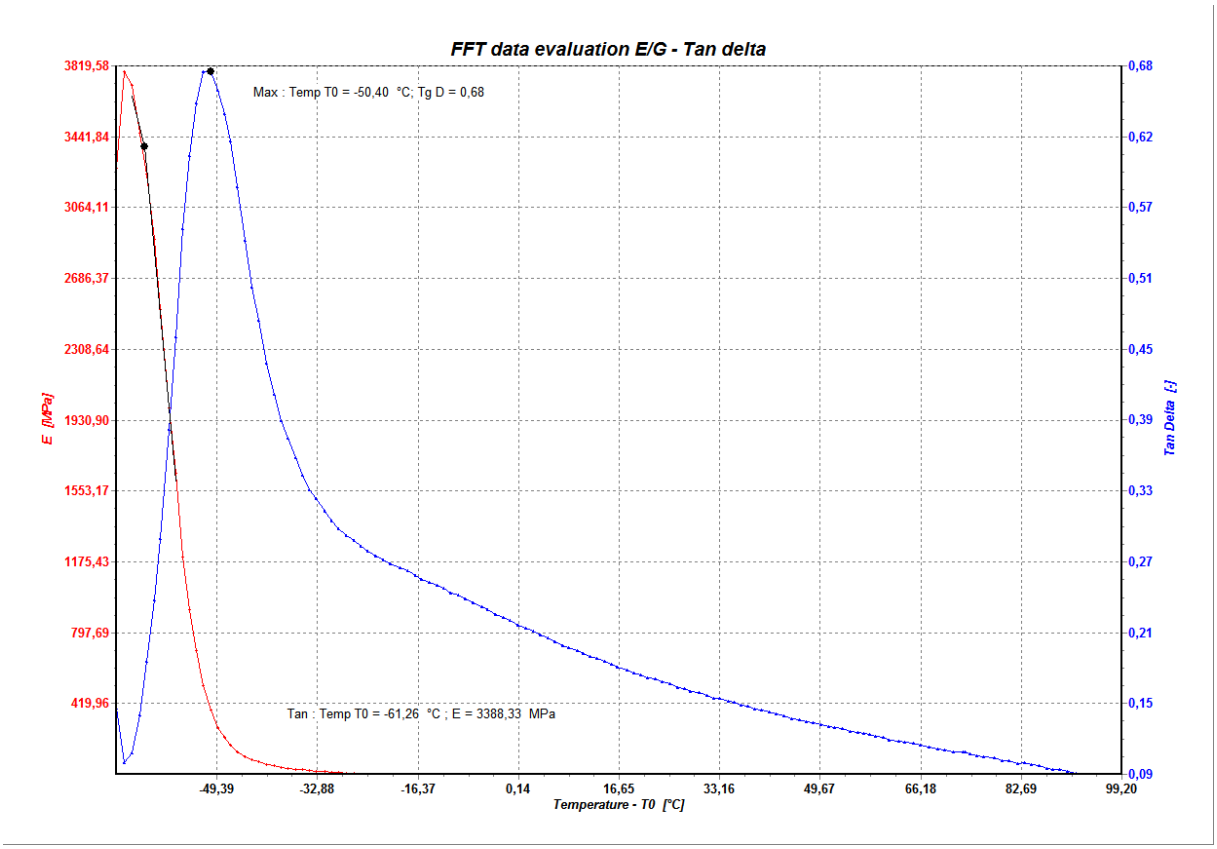
Tabulka 26 Měření DMA – teploty blízké teplotě skelného přechodu

Lepidlo	T_1 [°C]	T_2 [°C]
Betamate 2810 MV	−59,67	−42,5
Betaforce 2850 M	−60,36	−45,8
Betaforce 2816 S	−57,95	−45,3
Betaseal 1407	−61,26	−50,4
Betaseal HV 3	−61,3	−47,1
Betamate 7170	−60,75	−49,9
Betamate 7170 + 1 % Accel 2	−66,44	−50,2
Betamate 7170 + 3 % Accel 2	−63,71	−49,8



Graf 40 Měření DMA – teploty blízké teplotě skelného přechodu

Příklad vyhodnocení teplot blízkých teplotě skelného přechodu pomocí metody DMA je zobrazen na obrázku 59. Nejnižší hodnotu T_1 vykázal lepicí systém Betamate 7170 + 1 % Accel 2, nejnižší hodnotu T_2 lepidlo Betaseal 1407. Naměřené hodnoty si jsou však velmi podobné.

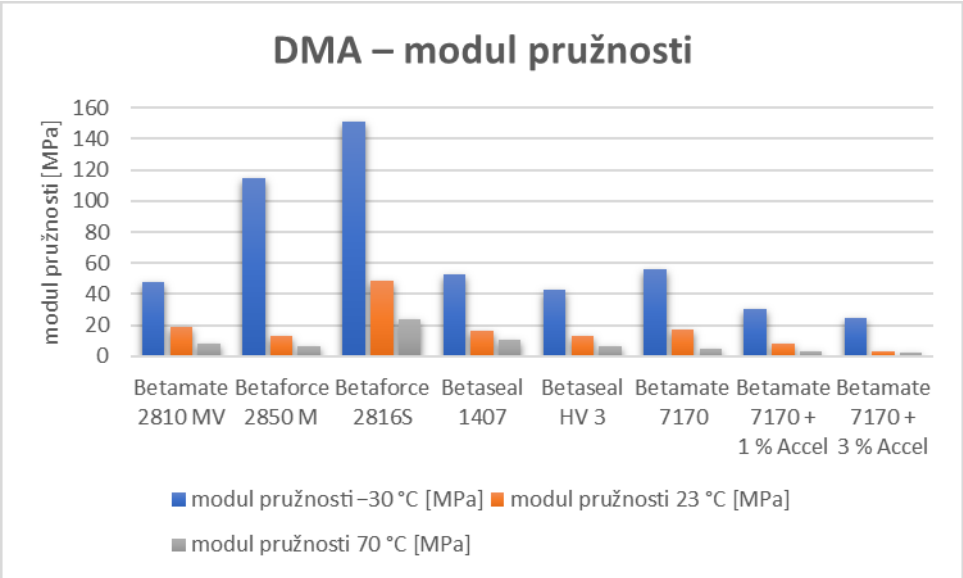


Obrázek 59 DMA – vyhodnocení (Betaseal 1407)

Naměřené moduly pružnosti jsou uvedeny v tabulce 27 a grafu 41.

Tabulka 27 DMA – modul pružnosti

Lepidlo	Modul pružnosti při −30 °C [MPa]	Modul pružnosti při 23 °C [MPa]	Modul pružnosti při 70 °C [MPa]
Betamate 2810 MV	48,08	19,32	7,82
Betaforce 2850 M	114,31	13,49	6,77
Betaforce 2816 S	150,75	48,31	24,2
Betaseal 1407	52,61	16,24	11,05
Betaseal HV 3	43,1	12,75	6,68
Betamate 7170	56,25	17,63	4,76
Betamate 7170 + 1 % Accel 2	30,52	8,54	3,04
Betamate 7170 + 3 % Accel 2	24,9	3,19	2,23



Graf 41 DMA – modul pružnosti

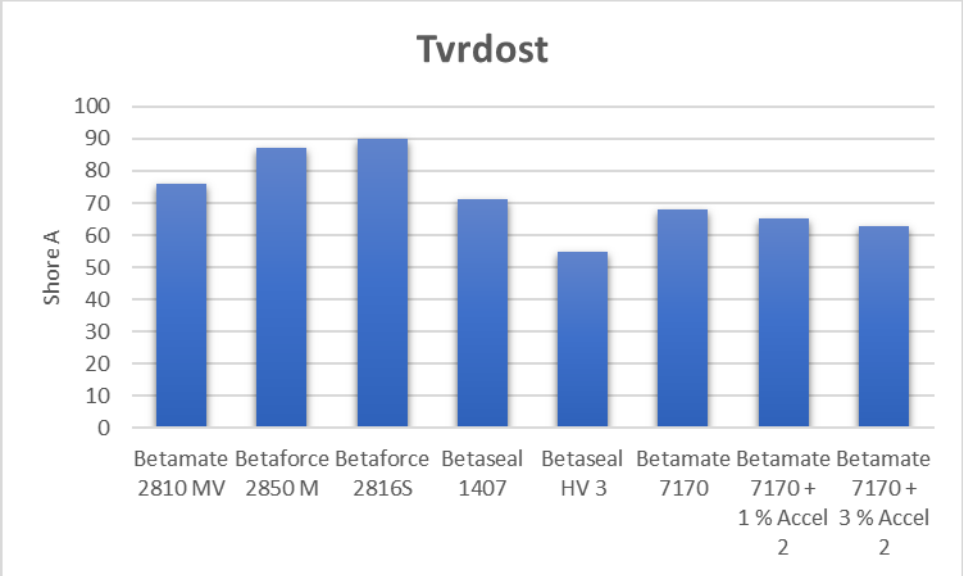
Z tabulky a grafu je patrný pokles modulu pružnosti s rostoucí teplotou. Tento pokles je nejvýraznější u lepidel třídy Betaforce, konkrétně lepidel 2850 M a 2816S. U lepidla Betaforce 2850 M došlo při změně teploty z −30 °C na 23°C k poklesu téměř na desetinu. Změna modulu pružnosti při ohřátí na 70 °C již nebyla tolik markantní a lze předpokládat, že i při dalším ohřívání by k dalším zásadním změnám nedocházelo. U lepícího systému Betamate 7170 + Accel 2 byl modul pružnosti nepřímo úměrný koncentraci boosteru.

3.5 Výsledky měření tvrdosti Shore

Výsledky měření pevnosti Shore jsou uvedeny v tabulce 28 a grafu 42.

Tabulka 28 Měření tvrdosti Shore

Lepidlo	Shore A
Betamate 2810 MV	76
Betaforce 2850 M	87
Betaforce 2816 S	90
Betaseal 1407	71
Betaseal HV 3	55
Betamate 7170	68
Betamate 7170 + 1 % Accel 2	65
Betamate 7170 + 3 % Accel 2	63



Graf 42 Tvrdost Shore

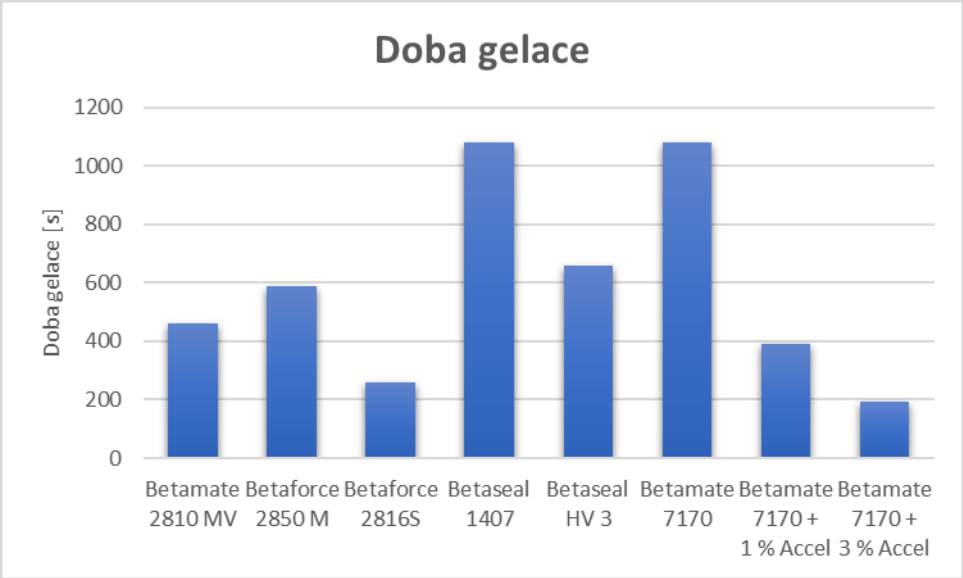
Z tabulky a grafu vyplývá, že nejvyšší tvrdosti Shore dosahovaly lepidla třídy Betaforce, a to konkrétně lepidlo 2816S, následované lepidlem 2850 M. Nejnižší tvrdosti naopak dosahovalo lepidlo Betaseal HV 3.

3.6 Výsledky měření doby gelace

Výsledky měření doby gelace jsou uvedeny v tabulce 29 a grafu 43.

Tabulka 29 Měření doby gelace

Lepidlo	Doba gelace [min:s]
Betamate 2810 MV	7:40
Betaforce 2850 M	9:50
Betaforce 2816 S	4:20
Betaseal 1407	18:00
Betaseal HV 3	13:00
Betamate 7170	18:00
Betamate 7170 + 1 % Accel 2	6:30
Betamate 7170 + 3 % Accel 2	3:15



Graf 43 Měření doby gelace

Naměřené hodnoty u většiny lepidel korespondovaly s otevřeným časem. Z grafu a tabulky je jinak patrná silná závislost mezi koncentrací boosteru Accel 2 a otevřeného času u lepícího systému Betamate 7170 + Accel 2. Nejdelší čas měla lepidla Betaseal 1407 a Betamate 7170, naopak nejkratší čas doby gelace byl naměřen u lepicího systému Betamate 7170 + 3 % Accel 2.

Závěr

Cílem této diplomové práce byla rešeršní studie polyurethanů a jejich využití, hlavně jako lepidel a tmelů. V úvodní částí jsou popsány suroviny pro výrobu polyurethanů a samotný proces výroby. V další části jsou popsány aplikační využití polyurethanů jako lepidel, tmelů, ale také jako pěn a nátěrů. Další část je věnována technologii a teorii lepení a povrchovým úpravám lepených spojů.

V experimentální části bylo použito celkem osm polyurethanových lepicích systémů pro vytvoření lepených spojů na třech druzích adherendů. U těchto lepených spojů byly následně zkoumány mechanické vlastnosti ve smyku. Dále byly vytvořeny vzorky pro měření pevnosti v tahu, vzorky pro měření teploty skelného přechodu T_g pomocí metody TMA a teplot blízkých teplotě skelného přechodu T_1 a T_2 pomocí metody DMA a vzorky pro měření tvrdosti Shore. U všech lepicích systémů byla též orientačně měřena doba gelace.

Z měření mechanických vlastností ve smyku vyplývá závislost použitého adherendu na těchto vlastnostech. Jako nejlepší adherend se jevil polykarbonát, jenž dosahoval u šesti z celkem osmi lepicích systémů nejvyšších mezí pevnosti. U polykarbonátových adherendů navíc docházelo ke koheznímu porušení lepeného spoje, tudíž lze předpokládat, že zde bylo dosaženo nejlepší možné adheze. Veličiny tažnost a modul pružnosti ve smyku se jevily relativně nezávislé na typu adherendu, neboť zde k velkým změnám nedocházelo, ačkoliv zde byla srovnávána pouze ocel a hliník.

Měření mechanických vlastností v tahu se provádělo při teplotě 23 °C a 70 °C a byla primárně zkoumána závislost změny teploty na tyto mechanické vlastnosti. Při zvýšení teploty došlo u všech lepicích systémů k poklesu meze pevnosti i protažení. Modul pružnosti však na zvýšení teploty reagoval různě; u některých lepidel (Betamate 2810 MV, Betaforce 2850 M, Betaseal 1407, Betamate 7170) došlo ke vzrůstu, u některých (Betaforce 2816S, Betaseal HV 3, Betamate 7170 + 1 % Accel 2, Betamate 7170 + 3 % Accel 2) došlo k poklesu. Změny však nebyly příliš výrazné a u většiny lepidel byly v rámci chyby měření.

Z měření TMA vyplynulo, že za laboratorní teploty se všechny zkoumané lepicí systémy nacházejí v kaučukovitém stavu, neboť jejich teploty skelného přechodu T_g se nacházejí hluboko pod laboratorní teplotou. Lepidla Bemate 2810 MV, Betaforce 2850 M a Betaforce 2816S měla teploty skelného přechodu okolo −57 °C, ostatní lepidla zhruba o 10 °C nižší.

Měření DMA studovalo teploty blízké teplotě skelného přechodu T_1 a T_2 a změnu modulu pružnosti v závislosti na teplotě. Modul pružnosti byl odečítán při teplotě −30 °C, 23 °C a 70 °C.

U všech lepicích systémů došlo k markantní změně modulu pružnosti mezi teplotami −30 °C a 23 °C, po zvýšení teploty na 70 °C již tato změna nebyla tak výrazná. Vůbec nejvyššího modulu pružnosti za všech teplot dosahovalo lepidlo Betaforce 2816S. Naopak nejnižší moduly pružnosti vykazoval lepicí systém Betamate 7170 + Accel 2. Modul pružnosti byl u tohoto lepicího systému nepřímo úměrný koncentraci boosteru Accel 2.

Tvrdost Shore byla nejvyšší u lepidel třídy Betaforce (2850 M a 2816S), naopak nejnižší tvrdost vykázalo lepidlo Betaseal HV 3.

Doba gelace u většiny lepidel zhruba odpovídala otevřenému času. Nejvyšší byla u lepidel Betamate 7170 a Betaseal 1407. U lepicího systému Betamate 7170 + Accel 2 byla tato doba dle předpokladů silně závislá na koncentraci akcelerátoru Accel 2.

Obecně nelze určit nejlepší lepicí systém, neboť hlavním aspektem, který se při výběru bere v potaz, je vždy daná aplikace a z ní vyplývající požadavky na konkrétní mechanické vlastnosti. Do těchto aspektů je však nutno také zahrnout typ lepeného materiálu a další náležitosti, popsané v kapitole technologie lepení.

Použitá literatura

[1] V. DUCHÁČEK, Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Praha: VŠCHT Praha, 2006, s. 96-97. ISBN 80-7080-617-6.

[2] J.K. FINK. Reactive Polymers – Fundamentals and Applications – A Concise Guide to Industrial Polymers. 3. vydání. Leoben: Elsevier, 2018, s. 71-77. ISBN 978-0-12-814509-8.

[3] N. KARAK. Vegetable Oil-Based Polymers – Properties, Processing and Applications. Woodhead Publishing, 2012, s. 155-161. ISBN 978-0-85709-710-1.

[4] R.Z. BOROS, T. KOÓS, C. WAFAA, K. NEHÉZ, L. FARKAS, B. VISKOLCZ a M. SZÖRI. A theoretical study on the phosgenation of methylene diphenyl diamine (MDA). Chemical Physics Letters. (706), 2018568-576. Dostupné z: doi: 10.1016/j.cplett.2018.06.024

[5] M. WIRTS, D. GRUNWALD, D. SCHULZE, E. UHDE a T. SALTHAMMER. Time course of isocyanate emission from curing polyurethane adhesives. Atmospheric Environment. 2003, (37), 5467–5475. Dostupné z: doi: 10.1016/j.atmosenv.2003.09.023

[6] a, ed. R. SUNDERMANN, H. J. SCHOLL, B. CORNILS a W. A. HERRMANN. Applied Homogeneous Catalysis with Organometallic Compounds. 2. Weinheim, Německo: Wiley, 1996, s. 1072-1080. ISBN 9783527328970.

[7] S. CENINI a F. RAGAINI. Catalytic Reductive Carbonylation of Organic Nitro Compounds. Dordrecht: Kluwer, 1997.

[8] C. SIX a F. RICHTER. Isocyanates, Organic. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley, 2003, s. 63-82.

[9] S.L. COOPER a J. GUAN. Advances in Polyurethane Biomaterials. Elsevier, 2016, s. 362. ISBN 978-0-08-100614-6.

[10] J. MLEZIVA a J. ŠŇUPÁREK. Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. vydání. Praha: Sobotáles, 2000, s. 316-335. ISBN 80-85920-72-7.

[11] J. TROITZSCH. Plastics Flammability Handbook – Principles, Regulations, Testing, and Approval. 3. vydání. Hanser Publishers, 2004, s. 78-82. ISBN 978-1-56990-356-8.

[12] B.D. RATNER, A.S. HOFFMAN, F.J. SCHOEN a J.E. LEMONS. Biomaterials Science – An Introduction to Materials in Medicine. 3. vydání. Elsevier, 2013. ISBN 978-0-12-374626-9.

[13] X. ZHANG. Science and Principles of Biodegradable and Bioresorbable Medical Polymers – Materials and Properties. Elsevier, 2017, s. 190-195. ISBN 978-0-08-100372-5.

[14] Y. YAMPOLSKII a E. FINKELSHTEIN. Membrane Materials for Gas and Vapor Separation – Synthesis and Application of Silicon-Containing Polymers. John Wiley, 2017. ISBN 978-1-119-11271-6.

[15] A. MUÑOZ-BONILLA, C. MARÍA L. a M. FERNÁNDEZ-GARCÍA. Polymeric Materials with Antimicrobial Activity – From Synthesis to Applications. Royal Society of Chemistry, 2014, s. 230-232. ISBN 978-1-84973-807-1.

[16] H. DODIUK a S.H. GOODMAN. Handbook of Thermoset Plastics. 3. vydání. Elsevier, 2014, s. 263-266. ISBN 978-1-4557-3107-7.

[17] A. AL-AHMED. Current Application of Polymers and Nano Materials. Trans Tech Publications, 2010, s. 4. ISBN 978-0-87849-252-7.

[18] J.S. DICK, a C.P. RADER. Raw Materials Supply Chain for Rubber Products – Overview of the Global Use of Raw Materials, Polymers, Compounding Ingredients, and Chemical Intermediates. Hanser Publishers, 2014, s. 189-190. ISBN 978-1-56990-537-1.

[19] Engineering Design Handbook – Dielectric Embedding of Electrical or Electronic Components: (DARCOM-P 706-315). U.S. Army Materiel Command, 1979, 4-9–4-10. ISBN 978-1-62198-180-0.

[20] M. BIRON. Thermoplastics and Thermoplastic Composites. Elsevier, 2018, s. 852-853. ISBN 978-0-08-102501-7.

[21] Polyurethane car seats [online]. [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: http://www.polyurethaneapplications.com/en/polyurethane-car-seats/

[22] Bridgestone to Establish Polyurethane Foam for Automobile Seats Plant in Wuhan, China [online]. [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: https://bridgestone-mea.com/en/news/bridgestone-to-establish-polyurethane-foam-for-aut

[23] O. FARUK, J. TJONG a M. SAIN. Lightweight and Sustainable Materials for Automotive Applications. CRC Press, 2017. ISBN 978-1-4987-5687-7.

[24] P.A. CIULLO. Industrial Minerals and Their Uses – A Handbook and Formulary. William Andrew Publishing/Noyes, 1996. ISBN 978-0-8155-1408-4.

[25] J.V. KOLESKE. Paint and Coating Testing Manual. 14. vydání ASTM International, 1995, s. 736. ISBN 978-0-8031-2060-0.

[26] Transportation products. Sika Corporation (2003) [online]. [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: http://www.sikaindustry.com

[27] What Is A Polyurethane Sealant? Where And How To Use? Akfix [online]. [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: https://www.akfix.com/en/blog/what-is-a-polyurethane-sealant-where-and-how-to-use

[28] R. LAMBOURNE. a T.A. STRIVENS. Paint and Surface Coatings – Theory and Practice. 2. Woodhead Publishing, 1999, s. 72-77. ISBN 978-1-884207-73-0.

[29] C. CHANDRASEKARAN. Anticorrosive Rubber Lining – A Practical Guide for Plastics Engineers. Elsevier, 2017, s. 45-48. ISBN 978-0-32-344371-5.

[30] Uses for Polyurethane Coatings [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://www.performance-painting.com/blog/uses-for-polyurethane-coatings

[31] SOCIETY FOR THE ADVANCEMENT OF MATERIAL AND PROCESS ENGINEERING (SAMPE). CAMX 2019 - The Composites and Advanced Materials Expo – We Form the Future. Anaheim Convention Center, Anaheim, CA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), 2019, s. 357-360. ISBN 978-1-5231-2703-0.

[32] M.C. CHATURVEDI. Welding and Joining of Aerospace Materials. Woodhead Publishing, 2012, s. 241-242. ISBN 978-1-84569-532-3.

[33] P. COGNARD. Handbook of Adhesives and Sealants, Volume 1 - Basic Concepts and High Tech Bonding. Elsevier, 2005, s. 137. ISBN 978-0-08-044554-0.

[34] Technically speaking by Bob Beranek: Applying Urethane [online]. 4. červen 2015 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://beranek.agrrmag.com/2015/06/applying-urethane/

[35] S. G. KUMBAR, C.T. LAURENCIN a M. DENG. Natural and Synthetic Biomedical Polymers. Elsevier, 2014, s. 138. ISBN 978-0-12-396983-5.

[36] INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS. Guide to the Structural Use of Adhesives. Institution of Structural Engineers, 1999, s. 13-20. ISBN 978-1-874266-43-3.

[37] J. STRAKA. Lepení plechů a jejich testování. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.

[38] J.J. LICARI a D.W. SWANSON. Adhesives Technology for Electronic Applications – Materials, Processing, Reliability. 2. vydání. Elsevier, 2011, s. 128-129. ISBN 978-1-4377-7889-2.

[39] Konstrukční lepidla – Směrnice pro přípravu povrchů kovů a plastů před lepením: ČSN EN 13887. Český normalizační institut, 2004.

[40] A.V. POCIUS. Adhesion and Adhesives Technology – An Introduction. 3. vydání. Hanser Publishers, 2012, s. 181-195. ISBN 978-1-56990-511-1.

[41] DOW AUTOMOTIVE AG. Betamate 2810 MV: Technical data sheet.

[42] DUPONT DE NEMOURS, INC. Betaforce 2850 M: Technical data sheet.

[43] DOW CHEMICAL. Betaforce 2816S: Technical data sheet.

[44] DOW CHEMICAL. Betaseal 1407: Technical data sheet.

[45] DOW CHEMICAL. Betaseal HV 3: Technical data sheet.

[46] DOW CHEMICAL. Betamate 7170 + Accel 2: Technical data sheet.

[47] DOW CHEMICAL. Betaprime 1707: Technical data sheet.

[48] DOW CHEMICAL. Betaprime 5404: Technical data sheet.

[49] DOW CHEMICAL. Betaclean 3350: Technical data sheet.

[50] D. KOUBA. Polyurethanová lepidla. Pardubice, 2016. Středoškolská odborná činnost. Střední průmyslová škola chemická Pardubice. Vedoucí práce Ing. Luboš Prokůpek, Dr.

[51] M. SCHILLER. PVC Additives – Performance, Chemistry, Developments, and Sustainability. Hanser Publishers, 2015, s. 88-89. ISBN 978-1-56990-543-2.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Segmenty polyurethanu 18
Obrázek 2 Sedačka [21] 23
Obrázek 3 Vnitřek sedačky z polyurethanové pěny [22] 23
Obrázek 4 Ochrana kabelů za použití polyurethanových tmelů [26] 25
Obrázek 5 Aplikace polyurethanového tmelu [27] 25
Obrázek 6 Aplikace polyurethanového tmelu (2) [27] 25
Obrázek 7 Příklad aplikace polyurethanového nátěru [30] 27
Obrázek 8 Lepení autoskla [34] 28
Obrázek 9 Příklady dobře navržených lepených spojů [36] 31
Obrázek 10 Příklady špatně navržených lepených spojů [36] 31
Obrázek 11 Fotoelastický test "single lap" lepeného spoje [36] 31
Obrázek 12 "Úhlový" lepený spoj [36] 32
Obrázek 13 "T" spoj [36] 32
Obrázek 14 Porušení adherendu [37] 32
Obrázek 15 Delaminace [37] 32
Obrázek 16 Kohezní porušení lepeného spoje [37] 32
Obrázek 17 Adhezní porušení lepeného spoje [37] 32
Obrázek 18 Lepicí forma 39
Obrázek 19 Distanční vložka 39
Obrázek 20 Schéma lepení [50] 39
Obrázek 21 Upravené adherendy ve formě 40
Obrázek 22 Hotové lepené spoje ve formě 40
Obrázek 23 Trhací zařízení MTS – 4/M 41
Obrázek 24 Trhací zařízení SHIMANDZU – AGS-X 41
Obrázek 25 Měření pevnosti v tahu 42
Obrázek 26 Měření pevnosti v tahu za zvýšené teploty 42
Obrázek 27 Zařízení TMA CX04R 43
Obrázek 28 Měření TMA 43
Obrázek 29 Zařízení DMA DX04T 44
Obrázek 30 Měření DMA 44
Obrázek 31 Betamate 2810 MV – ocel 47
Obrázek 32 Betamate 2810 MV – hliník 47

Obrázek 33 Betamate 2810 MV – polykarbonát....47
Obrázek 34 Betaforce 2850 M – ocel....49
Obrázek 35 Betaforce 2850 M – hliník....49
Obrázek 36 Betaforce 2850 M – polykarbonát....49
Obrázek 37 Betaforce 2816S – ocel....51
Obrázek 38 Betaforce 2816S – hliník....51
Obrázek 39 Betaforce 2816S – polykarbonát....51
Obrázek 40 Betaseal 1407 – ocel....53
Obrázek 41 Betaseal 1407 – hliník....53
Obrázek 42 Betaseal 1407 – polykarbonát....53
Obrázek 43 Betaseal HV 3 – ocel....55
Obrázek 44 Betaseal HV 3 – hliník....55
Obrázek 45 Betaseal HV 3 – polykarbonát....55
Obrázek 46 Betamate 7170 – ocel (adhezně-kohezní porušení)....57
Obrázek 47 Betamate 7170 – ocel (adhezní porušení)....57
Obrázek 48 Betamate 7170 – hliník (adhezně-kohezní porušení)....57
Obrázek 49 Betamate 7170 – hliník (adhezní porušení)....57
Obrázek 50 Betamate 7170 – polykarbonát....57
Obrázek 51 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – ocel....59
Obrázek 52 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – hliník....59
Obrázek 53 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – polykarbonát....59
Obrázek 54 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – ocel....61
Obrázek 55 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – hliník....61
Obrázek 56 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – polykarbonát....61
Obrázek 57 Původní a přetržený vzorek – měření pevnosti v tahu....65
Obrázek 58 TMA – vyhodnocení (Betaseal HV 3)....76
Obrázek 59 DMA – vyhodnocení (Betaseal 1407)....77

Seznam tabulek

Tabulka 1 Vlastnosti lepidla Betamate 2810 MV 34
Tabulka 2 Vlastnosti lepidla Betaforce 2850 M 35
Tabulka 3 Vlastnosti lepidla Betaforce 2816S 35
Tabulka 4 Vlastnosti lepidla Betaseal 1407 36
Tabulka 5 Vlastnosti lepidla Betaseal HV 3 36
Tabulka 6 Vlastnosti lepidla Betamate 7170 a boosteru Accel 2 37
Tabulka 7 Vlastnosti primeru Betaprime 1707 37
Tabulka 8 Vlastnosti primeru Betaprime 5404 38
Tabulka 9 Betamate 2810 MV – pevnost ve smyku 45
Tabulka 10 Betaforce 2850 M – pevnost ve smyku 47
Tabulka 11 Betaforce 2816S – pevnost ve smyku 49
Tabulka 12 Betaseal 1407 – pevnost ve smyku 51
Tabulka 13 Betaseal HV 3 – pevnost ve smyku 53
Tabulka 14 Betamate 7170 – pevnost ve smyku 55
Tabulka 15 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – mez pevnosti ve smyku 58
Tabulka 16 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – pevnost ve smyku 60
Tabulka 17 Betamate 2810 MV – pevnost v tahu 64
Tabulka 18 Betaforce 2850 M – pevnost v tahu 65
Tabulka 19 Betaforce 2816S – pevnost v tahu 66
Tabulka 20 Betaseal 1407 – pevnost v tahu 68
Tabulka 21 Betaseal HV 3 – pevnost v tahu 69
Tabulka 22 Betamate 7170 – pevnost v tahu 70
Tabulka 23 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – pevnost v tahu 71
Tabulka 24 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – pevnost v tahu 72
Tabulka 25 Měření TMA 75
Tabulka 26 Měření DMA – teploty blízké teplotě skelného přechodu 76
Tabulka 27 DMA – modul pružnosti 78
Tabulka 28 Měření tvrdosti Shore 79
Tabulka 29 Měření doby gelace 80

Seznam grafů

Graf 1 Betamate 2810 MV – mez pevnosti ve smyku 46
Graf 2 Betamate 2810 MV – modul pružnosti ve smyku 46
Graf 3 Betaforce 2850 M – mez pevnosti ve smyku....48
Graf 4 Betaforce 2850 M – modul pružnosti ve smyku....48
Graf 5 Betaforce 2816S – mez pevnosti ve smyku....50
Graf 6 Betaforce 2816S – modul pružnosti ve smyku....50
Graf 7 Betaseal 1407 – mez pevnosti ve smyku....52
Graf 8 Betaseal 1407 – modul pružnosti ve smyku....52
Graf 9 Betaseal HV 3 – mez pevnosti ve smyku....54
Graf 10 Betaseal HV 3 – modul pružnosti ve smyku....54
Graf 11 Betamate 7170 – mez pevnosti ve smyku....56
Graf 12 Betamate 7170 – modul pružnosti ve smyku....56
Graf 13 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – mez pevnosti ve smyku....58
Graf 14 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – modul pružnosti ve smyku....58
Graf 15 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – mez pevnosti ve smyku....60
Graf 16 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – modul pružnosti ve smyku....60
Graf 17 Srovnání všech lepidel – mez pevnosti ve smyku....62
Graf 18 Srovnání všech lepidel – tažnost....62
Graf 19 Srovnání všech lepidel – modul pružnosti ve smyku....63
Graf 20 Betamate 2810 MV – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu....64
Graf 21 Betamate 2810 MV – protažení....64
Graf 22 Betaforce 2850 M – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu....65
Graf 23 Betaforce 2850 M – protažení....66
Graf 24 Betaforce 2816S – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu....67
Graf 25 Betaforce 2816S – protažení....67
Graf 26 Betaseal 1407 – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu....68
Graf 27 Betaseal 1407 – protažení....68
Graf 28 Betaseal HV 3 – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu....69
Graf 29 Betaseal HV 3 – protažení....69
Graf 30 Betamate 7170 – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu....70
Graf 31 Betamate 7170 – protažení....70
Graf 32 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu....71

Graf 33 Betamate 7170 + 1 % Accel 2 – protažení 71
Graf 34 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – mez pevnosti a modul pružnosti v tahu 72
Graf 35 Betamate 7170 + 3 % Accel 2 – protažení 73
Graf 36 Srovnání všech lepidel – mez pevnosti v tahu 73
Graf 37 Srovnání všech lepidel – protažení 74
Graf 38 Srovnání všech lepidel – modul pružnosti v tahu 74
Graf 39 Měření TMA 75
Graf 40 Měření DMA – teploty blízké teplotě skelného přechodu 77
Graf 41 DMA – modul pružnosti 78
Graf 42 Tvrdost Shore 79
Graf 43 Měření doby gelace 80

Seznam vzorců

Vzorec 1 Hexan-1,6-diamin 10
Vzorec 2 Hexan-1,6-diisokyanát 10
Vzorec 3 Difenylmethan-4,4´-diisokyanát 11
Vzorec 4 Naftalen-1,5-diisokyanát 11
Vzorec 5 Trifosgen 13

Seznam rovnic

Rovnice 1 Výroba diisokyanátu 12
Rovnice 2 Vznik solí 12
Rovnice 3 Vznik močoviny z isokyanátu a aminu 12
Rovnice 4 Vznik močoviny z aminu a fosgenu 12
Rovnice 5 Příprava MDI 13
Rovnice 6 Redukční karbonylace nitrosloučenin 14
Rovnice 7 Dvoukroková bezfosgenová syntéza 14
Rovnice 8 Dehydrogenace formamidů 14
Rovnice 9 Oxidační karbonylace aminů 14
Rovnice 10 Syntéza MDI z nitrobenzenu 15
Rovnice 11 Reakce isokyanátu s alkoholem 17
Rovnice 12 Reakce isokyanátu s aminem 17
Rovnice 13 Reakce isokyanátu s vodou 18
Rovnice 14 Reakce isokyanátu s karboxylovou kyselinou 18
Rovnice 15 Reakce isokyanátu se substituovanou močovinou 18
Rovnice 16 Reakce isokyanátu s urethanovou skupinou 18
Rovnice 17 Vznik prepolymeru 19
Rovnice 18 Reakce prepolymeru s diolem 19
Rovnice 19 Zesítění polyurethanu pomocí vícefunkčních polyolů 20
Rovnice 20 Schéma katalýzy pomocí dibutylcíndilaurátu 20
Rovnice 21 Reakce isokyanátového prepolymeru s polyolem 21
Rovnice 22 Reakce isokyanátového prepolymeru s diaminem 21
Rovnice 23 Odblokování isokyanátové skupiny 26
Rovnice 24 Zesítění polyurethanů pomocí oxazolidinů 26

Seznam zkratek

1K	jednokomponentní
2K	dvoukomponentní
CFC	chlor-fluorované uhlovodíky (freony)
DABCO	1,4-diazobicyklooktan
DMA	dynamická mechanická analýza
HCFC	hydrochlorofluoro uhlovodíky
HDI	hexamethylendiisokyanát
IPDI	isoforondiisokyanát
MDA	4,4‘-methylendianilín
MDI	4,4‘-difenylmethandiisokyanát
MIT	methylentrifenyltriisokyanát
PMDI	polymerní MDI
T_1, T_2	teploty blízké teplotě skelného přechodu
TDI	toluendiisokyanát
TEA	terciální aminy
T_g	teplota skelného přechodu
TMA	termomechanická analýza