

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA



Creep akrylátových lepidel

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.

Autor práce: Bc. Roman Krejzl

Praha 2012

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Akademický rok 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Roman Krejzl

obor Obchod a podnikání s technikou

Vedoucí katedry Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu ČZU v Praze
čl. 17 odst. 2 určuje tuto diplomovou práci.

Název práce: **Creep akrylátových lepidel**

Osnova diplomové práce:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Literární rešerše
4. Výsledky a jejich diskuse
5. Závěr
6. Seznam literatury
7. Přílohy



Rozsah hlavní textové části: 40 - 60 stran

Doporučené zdroje:

1. Betten, J.: Creep mechanics, Berlin: Springer, 2002, 327 s., ISBN 3-540-42981-6
2. Brockmann, W.: Adhesive bonding: materials, applications and technology, Weinheim: Wiley-VCH, 2009, 414 s., ISBN 978-3-527-31898-8
3. Ebnesajjad, S.: Adhesives technology handbook, Norwich, 2008, 363 s., ISBN 978-0-8155-1533-3
4. Elias, H. G.: Macromolecules Vol. 2: Industrial polymers and synthesis, Weinheim: Wiley-VCH, 2007, 635 s., ISBN 978-3-527-31173-6
5. Grellmann, W., Seidler, S.: Deformation and fracture behaviour of polymers, Berlin: Springer, 2001, 597 s., ISBN 3-540-41247-6
6. Halley, P. J., Greame, A. G.: Chemorheology of polymers: from fundamental principles to reactive processing, Cambridge : Cambridge University Press, 2009, 443 s., ISBN 978-0-521-80719-7
7. časopisy: Polymer, Journal of applied polymer science, Polymer engineering and science, Journal of materials science aj.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.**

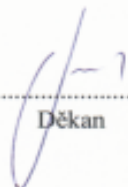
Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání diplomové práce: duben 2011

L.S.


.....
Vedoucí katedry




.....
Děkan

V Praze dne: 30.11.2009

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Rostislava Chotěborského, Ph.D. a použil jen pramenů citovaných v přiložené bibliografii.

V Praze dne 16. dubna 2012

podpis

Poděkování

Děkuji Ing. Rostislavu Chotěborskému, Ph.D. za poskytnutí odborné pomoci a konzultaci, které mě směřovaly k úspěšnému zpracování diplomové práce. Dále děkuji své rodině za poskytnutou podporu a zázemí ve studiu.

Creep akrylátových lepidel

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá creepovými vlastnostmi akrylátů, které jsou vystaveny dlouhodobému zatěžování. Byly provedeny třibodové ohybové zkoušky akrylátového lepidla UHU PLUS ACRYLIT pro různé hodnoty zatížení (napětí $\sigma = 1; 2; 5; 7.5$ a 10 MPa) při konstantní teplotě. Při experimentu byla zaznamenávána deformace. Z naměřených hodnot byla vypočítána rychlost deformace a vykresleny závislosti rychlost deformace na čase (creepové křivky) a rychlost deformace na napětí (isochronní křivky). Výsledky ukazují, že čím vyšší byla hodnota zatížení vzorku, tím vyšší byla počáteční rychlost deformace a také pokles této rychlosti. Dále je patrný značný vliv velikosti zatěžovacího napětí na rychlost deformace především v počátku experimentu (tj. v intervalu od 0 do 1000 s). Při delším zatěžování už hodnota napětí rychlost deformace tolik neovlivňuje.

Klíčová slova: Akrylát, creep, lepidlo, třibodová zkouška.

Creep of acrylic adhesives

Summary:

This thesis deals with creep properties of acrylates, which are loaded for a long time. Three-point bending tests at constant temperature were performed with acrylic adhesive UHU PLUS ACRYLIT for different values of load (stress $\sigma = 1; 2; 5; 7.5$ a 10 MPa). The deformation was recorded during the experiments and the deformation rate was computed from obtained data. Deformation rate – time and deformation rate – stress curves were constructed. It was concluded that the higher was the load of the sample, the higher was the deformation rate and also the decrease of this rate. The results showed that the load of the samples influences the deformations rate only on the beginning of the experiments. If the sample is loaded for a longer time the deformation rate is not affected by the load.

Key words: Acrylate, creep, adhesive, three-point bending test.

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíl práce a metodika	2
3. Literární rešerše	3
3.1. Historie lepidel	3
3.2. Základní pojmy	4
3.3. Výhody a nevýhody lepení.....	6
3.4. Rozdělení lepidel.....	7
3.4.1. Dělení dle způsobu aplikace	7
3.4.2. Fyzikálně založená akrylátová lepidla.....	8
3.4.3. Chemicky založená akrylátová lepidla (reaktivní akryláty)	9
3.4.4. Dvousložková lepidla	10
3.4.5. Jednosložková lepidla	11
3.4.6. Anaerobní akrylátová lepidla.....	11
3.4.7. UV akrylátová lepidla.....	12
3.5. Viskoelastická materiálu	12
3.5.1. Elastický materiál	13
3.5.2. Viskózní materiál.....	13
3.5.3. Viskoelastický materiál.....	14
3.6. Relaxace	15
3.7. Creep	16
3.8. Mechanické zkoušky.....	17
3.8.1. Zkouška lepidla.....	17
3.8.2. Tahová zkouška	18
3.8.3. Kompresní zkoušky	18
3.8.4. Tříbodová ohybová zkouška.....	18
3.8.5. Zkoušky lepených spojů	19
3.8.6. Smykové zkoušky	19
3.8.7. Odtrhovací zkoušky	19
3.9. Reologické viskoelastické modely.....	20
3.9.1. Maxwellův model	20

3.9.2.	Voightův model	21
3.9.3.	Weichertův model.....	21
3.9.4.	Zenerův model	22
4.	Vlastní část	23
4.1.	Použité materiály.....	23
4.2.	Použité pomůcky a zkušební zařízení	24
4.3.	Postup zkoušky.....	28
4.3.1.	Kondicionování a prostředí pro zkoušení	28
4.3.2.	Měření rozměrů zkušebního tělesa	29
4.3.3.	Uchycení zkušebních těles.....	29
4.3.4.	Výběr hodnoty napětí.....	30
4.3.5.	Postup zatěžování	30
4.3.6.	Vyjádření výsledků	34
4.3.7.	Zaznamenávání hodnot a grafické znázornění výsledků	35
5.	Závěr a diskuze výsledků	40
6.	Seznam literatury	42
7.	Seznam obrázků.....	44
8.	Seznam tabulek.....	45
9.	Seznam grafů	46
10.	Seznam příloh	47

1. Úvod

Akrylátová lepidla jsou materiály s vysokou pevností, které dokážou přenést zatížení bez ztráty integrity. V porovnání s jinými metodami spojování, jako je např. svařování a šroubová spojení, poskytuje lepení pomocí akrylátových lepidel výhody, jako je rovnoměrné rozložení zatížení na velkou plochu (tím dojde k redukci koncentrátů napětí), spojování rozdílných materiálů, snížení hmotnosti spoje a finanční náklady.

Akrylátová lepidla jsou přirozeně viskoelastické materiály a vykazují časově závislé chování. To vede k velkému zájmu při posuzování jejich dlouhodobých nosných vlastností, hlavně kvůli nedostatku základních znalostí o tom, jak creep ovlivňuje pevnost lepeného spoje. Značné úsilí je třeba vyvinout ve vytváření mechanických modelů, které by předpovídaly dlouhodobé chování lepidel za různých podmínek. Creep může být závažným problémem, zejména pokud je lepený spoj vystaven velkému zatížení po dlouhou dobu. Tato práce zkoumá creepové chování akrylátových lepidel.

2. Cíl práce a metodika

Hlavním cílem této práce je stanovit creepové vlastnosti kompozitu na bázi akrylátového lepidla.

Metodika této práce spočívá ve vytvoření vzorků z akrylátového lepidla, následného kondicionování (vytvrzení) v testovaném prostředí a zatížení tohoto vzorku v úchylkoměrech. Zde docházelo k dlouhodobému zatížení a následnému creepu daného akrylátového lepidla. Tímto má být potvrzena či vyvrácena vhodnost tohoto lepidla v různých technických odvětvích.

3. Literární rešerše

3.1. Historie lepidel

Lidé používají lepidla už po tisíce let. První lidé používali lepidlo už v době kamenné, kdy bylo použito pro výrobu věder ze smůly z březové kůry, kterou nanášeli roztavenou na lepené části pomocí nahřátého kamenného klínu na způsob dnešního pájení.

„Staří Egyptané například používali k lepení prvních rakví lepidla živočišného původu, která byla vyrobena ze směsi křídly a kliču.

První zmínka o užívání lepidla pochází z doby asi 4000 př. n. l. Archeologové, kteří studovali pohřebiště pravěkých kmenů, našli na pohřebních místech rozbitou keramiku, která byla opravena pryskyřicí. Při archeologických vykopávkách byly také nalezeny sošky z babylonských chrámů, které měly přilepené oči do očních důlků lepidlem, které vydrželo přes 6000 let“ [1].

Lepidla již v minulosti neplnila pouze funkci spojovací, ale také těsnící a z dnešního pohledu tak plnila funkci tmelů. Mezi národy, které jako první používaly smůlu a bitumen pro utěsnění lodí, patřili Babyloňané. Ve starověku byl oblíbeným lepidlem albumin, získávaný ze zvířecí kůže, a také například dextrin vyráběný ze zbytků kostí. Kolem roku 50 Řekové a Římané vyvinuli techniku dýchování, která spočívá v lepení vrstev dřeva na sebe. Římané byli také první, kdo použil včelí vosk a tér k utěsnění lodí. Ty samé národy byly průkopníky v používání vaječného bílku jako lepidla, které spojovalo zlaté fólie s papírem. Vaječný bílek byl ostatně zjištěn také v lepidle, kterým byly přilepeny staré římské mince ve víku dubové skříně nalezené roku 1886 ve Wroclawi.

Kolem roku 1700 došlo k většímu rozšíření používání a výroby lepidel. Z toho důvodu byly v Nizozemí založeny první plantáže, které zajišťovaly dostatek surovin pro výrobu kliču. Ve stejném časovém období byl v Anglii udělen první patent na výrobu lepidla. Roku 1823 bylo patentováno první kaučukové lepidlo.

„Dalším mezníkem ve vývoji lepidel a lepení samotného byl objev nitrace celulózy v letech 1845 až 1846. Roku 1872 vznikla v Americe první továrna na celuloid, ale teprve roku 1912 byl na obuvnické výstavě v Budyšíně předveden na svou dobu převratný výrobní postup lepené obuvi, zahrnující i speciální stroje pro nanášení lepidla“ [2].

Po objevení a uvedení bakelitu v roce 1910 následovalo představení mnoha nových druhů plastů, které jsou neodmyslitelně s lepidlem spjaty. Prakticky až do druhé světové

války byly lepeny pouze materiály, které byly schopny lepidlo vsáknout (papír, dřevo). „Nesporným mezníkem v historii techniky lepení je objev fenolformaldehydové pryskyřice, modifikované polyvinylformalem, která pod názvem Redux umožnila u společnosti de Havilland ve Velké Británii roku 1943 sériovou výrobu letounu typu DH-103 Hornet. Byl to letoun smíšené konstrukce ze dřeva a kovu, kde bylo dosaženo snížení množství dřeva na sklápěcích křídlech lepením duralu na překližku“ [3]. Asi kolem roku 1965 přecházejí na techniku lepení i ostatní výrobci letadel a začíná se ve větší míře uplatňovat i v ostatních odvětvích průmyslu.

Technologii lepení můžeme v současnosti nalézt například ve stavebnictví, letectví nebo zdravotnictví a v neposlední řadě také v automobilovém průmyslu, kde jsou lepidla používána nejen k lepení části karoserie, ale i k těsnění a tlumení vibrací. V současnosti jsou lepidla vyráběna přesně podle požadavků odběratele a jen těžko bychom hledali obor, kde by se nepoužívala. Navzdory jejich rozsáhlé historii nám mají stále co nabídnout a mají vysokou perspektivu do budoucna.

3.2. Základní pojmy

Adheze – vzájemné přitahování dvou povrchů adhezními silami. Adheze je výsledkem působení chemických vazeb, mezimolekulárních vazeb a fyzikálních sil. Někdy je adheze nazývána přilnavost.

Substrát – materiál spojovaný adhezivem

Koheze – jedná se o souhrn sil, které drží částice adheziva působením mezimolekulárních a valenčních sil pohromadě. Velikost koheze udává tzv. kohezní energie, což je velikost energie potřebná k odtržení jedné částičky lepidla od ostatních. Někdy nazýváme kohezi soudržnost, nebo tzv. vnitřní adhezi.

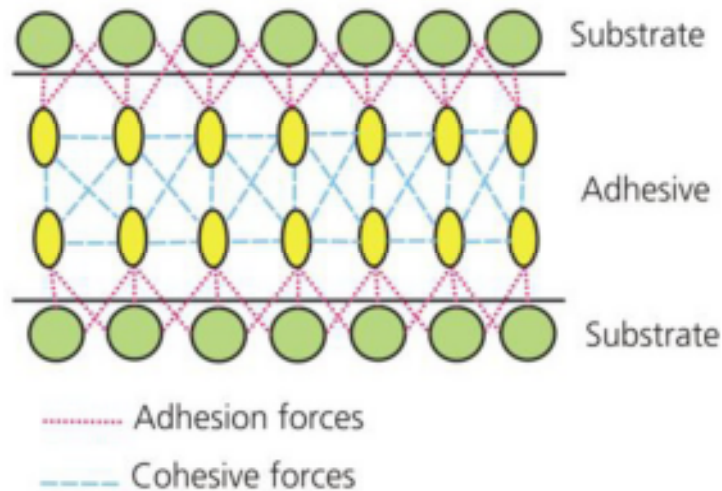
Adherend – spojovaný materiál, na který je nanášeno lepidlo, a který musí být před lepením vhodně upraven.

Lepený spoj – soustava dvou nebo více adherendů spojených adhezivem.

Adhezní lom – destrukce spoje, při které nastane oddělení adheziva od adherendu.

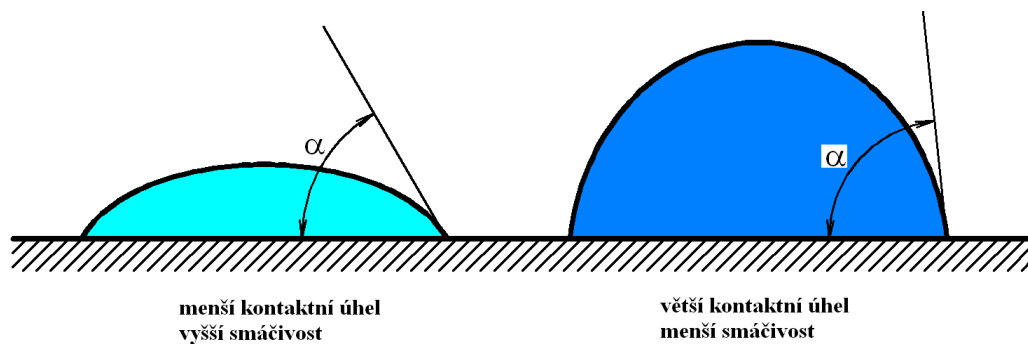
Kohezní lom – destrukce spoje, při které trhлина probíhá materiálem lepidla. Znamená to, že adheze mezi lepidlem a adherendem je větší než koheze lepidla.

Smíšený lom – je kombinace předchozích případů porušení. Pro lepší popis bývá výskyt jednotlivých typů lomů vyjádřen procentuelně.



Obr. 1: Síly v lepeném spoji. Zdroj [4]

Smáčivost – charakterizuje povrchové napětí lepidla. Povrchové napětí lepidla by mělo být nižší, než je hodnota povrchového napětí spojovaného materiálu. Toto je jeden ze základních předpokladů pro vytvoření kvalitního lepeného spoje o námi předpokládané pevnosti. Smáčivost může být měřena pomocí kontaktního úhlu α . Tento úhel je měřen mezi zkoušeným povrchem a povrchem kapaliny, která je na tento povrch nanesena. Čím je povrch smáčivější, povrchové napětí adherendu větší, tím je menší kontaktní úhel α .



Obr. 2: Závislost kontaktního úhlu na smáčivosti.

3.3. Výhody a nevýhody lepení

Jako materiál, který je schopen spojovat různé povrchy, lepidla mají své výhody a nevýhody. Dobré lepidlo by mělo mít tyto základní vlastnosti [5]:

- Vysoký stupeň lepivosti
- Dlouhodobá trvanlivost lepeného spoje
- Po zaschnutí vykazuje spoj vysokou pevnost

Výhody lepení:

- K vytvoření pevného spoje není potřeba vysoké teploty.
- Lepidlo může být aplikováno prakticky na jakýkoliv povrch: kov, sklo, plasty, keramika, ...
- Lepidla mají snadný postup aplikace.
- Lepidla jsou korozivzdorná.
- Lepené spoje jsou nepropustné pro plyny a kapaliny.
- Lepidla jsou elektrické a teplotní izolanty.
- Lepidla vykazují vynikající odolnost vůči únavě (cyklickému namáhání).
- Lepidla zvyšují a brání galvanické korozi při spojení kovů (např. spoj železo – měď).
- Vazba mezi povrchy se vytvoří rychle a snadno.
- Lepidla nabízejí atraktivní poměr mezi hmotností a pevností spoje.
- Pomocí lepení lze dosáhnout hladkých kontur spoje.

Nevýhody lepení:

- Lepení nemůže být použito při zvýšených teplotách. Pevnost spoje rapidně klesá se zvyšující se teplotou.
- Pevnost lepidel je obecně nižší a spoj nemá takovou trvanlivost jako například mechanické spojení.
- Neexistuje jediné univerzální spojení, které lze použít pro libovolné povrchy. Pro konkrétní aplikaci je nutné speciální lepidlo.
- Lepidla mohou být nanášena pouze na hladký a čistý povrch.
- Lepený spoj je citlivý na zvýšenou vlhkost.

- Plná pevnost spoje není dosažena ihned po aplikaci lepidla. Lepidla vyžadují čas k fixaci a dosažení výsledné pevnosti.
- Kontrola lepených spojů je komplikovaná.
- Musíme brát v úvahu ekologická, zdravotní a bezpečnostní rizika.
- K lepení je často potřeba speciálních přípravků.
- Trvanlivost spoje závisí na prostředí.

3.4. Rozdělení lepidel

Tato diplomová práce se zabývá mechanickými vlastnostmi akrylátových lepidel, a proto na tomto místě je uveden stručný přehled lepidel obecně a větší pozornost bude věnována právě rozdělení akrylátových lepidel.

3.4.1. Dělení dle způsobu aplikace

1) *Teplem vytvrzovaná lepidla*

Všechna lepidla, která musí být ohřáta na určitou teplotu, aby došlo k vytvrzení.

2) *Přidržovací lepidla*

Jde o lepidla, která jsou používána pro dočasné spojení dvou dílů dohromady. Pevnost nebývá příliš vysoká. Typickým příkladem je lepicí páska.

3) *Teplem tavitelná lepidla*

Tato lepidla jsou aplikována v roztaveném stavu a po následném vychladnutí ztvrdnou. Typickým příkladem je tavná tyčka.

4) *Vteřinová, minutová lepidla*

Všechna lepidla, která vytvrzují během několika vteřin až minut.

5) *Pojišťovací lepidla*

Pojišťovací lepidla nebo tmely jsou používány pro zajištění šroubových spojů proti případnému povolání.

6) *Tlakově citlivá lepidla*

Toto lepidlo je aktivováno tlakem. Tlakově citlivé lepidlo je používáno na samolepicích obálkách a oboustranných páskách.

7) *Zajišťovací lepidla*

Používají se jako ochrana proti prokluzování a smýkání nezávitových dílů. Velmi podobná pojišťovacím lepidlům, ale jsou používána na nezávitové spoje.

8) Těsnící lepidla

Těsnící lepidlo je používáno jako prevence proti únikům vzduchu, vody, oleje a mezi dvěma povrchy. Typický příklad je těsnící tmel pro lepení oken.

9) Strukturální lepidla

Strukturální lepidla jsou schopna přenášet značné zatížení. Termín „značné zatížení“ nebyl dosud definován, ale znamená to schopnost lepidla přenést značné napětí. V praxi to znamená vznik trvalého spojení dvou materiálů s neomezenou životností (v případě absence neúměrného vnějšího zatížení) [6].

10) UV lepidla

Všechna lepidla vytvrditelná pomocí působení UV světla.

Akrylátová lepidla lze dělit do dvou základních kategorií podle principu, na kterém jsou založena. Jedná se o lepidla fyzikálně a chemicky založená.

3.4.2. Fyzikálně založená akrylátová lepidla

Lepidla obsahující rozpouštědlo

Jako základní lepidla v této kategorii jsou používána termoplastické metyl metakryláty rozpuštěné v běžném organickém rozpouštědle. Tato lepidla dosahují své finální pevnosti až po vypaření nebo migraci rozpouštědla do substrátu. Jsou používána především pro lepení papíru, papírové lepenky a pro difuzní spojování termoplastických materiálů, jako je například PVC [7].

Disperzní akryláty

V době, kdy začal vznikat větší zájem a používání materiálů šetrnějších k životnímu prostředí, lepidla obsahující malé nebo žádné množství rozpouštědla se velmi rychle rozvíjela. Disperzní akrylátová lepidla se ve velké míře uplatňují při spojování neopracovaných materiálů [7]. Jsou velice časově stálá a je u nich snížena tendence ke žloutnutí během životnosti. Používají se na lepicích páskách a jako permanentní lepidla na dlaždice, podlahové krytiny a k lepení materiálů pro pokrytí zdí.

Akrylátová kontaktní lepidla

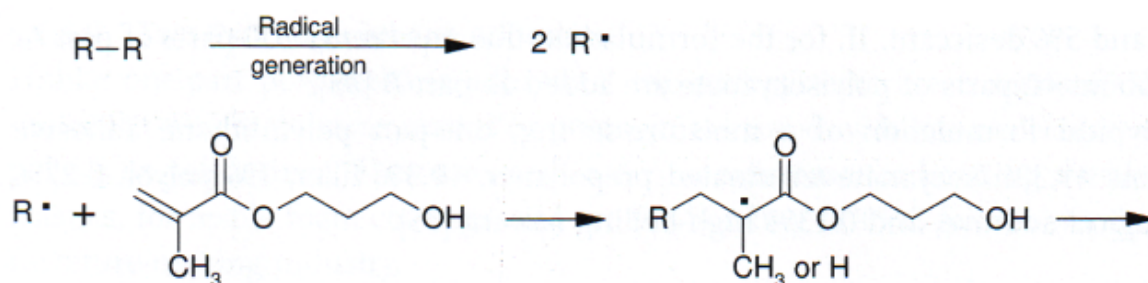
Tato lepidla nabízejí vytvoření velmi pevného spoje v poměrně krátkém čase po aplikaci lepidla. Tato lepidla lze komerčně koupit jako typ obsahující rozpouštědlo nebo

jako disperzní lepidla. Jsou velmi poddajná, ale mají poměrně malou pevnost ve smyku. Používají se k lepení podlahových krytin, v automobilovém průmyslu a při výrobě obuvi.

3.4.3. Chemicky založená akrylátová lepidla (reaktivní akryláty)

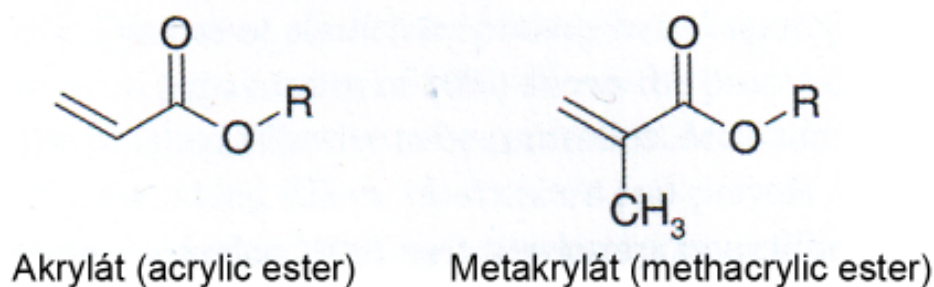
Reaktivní akrylátová a metakrylátová lepidla neobsahují rozpouštědla a řadíme mezi ně jednosložková, dvousložková, anaerobní (vytvrzování se spouští nedostatkem kyslíku) a UV lepidla. Od lepidel založených na fyzikálním principu se liší mechanismem vytvrzování, i když často mají podobné složení.

Akryláty a metakryláty jsou monomery s vinylovou skupinou obsahující dvojitě vazby: tyto vazby jsou atakovány volnými radikály a startují tak polymerizační reakci (obr. 3).



Obr. 3: Polymerizace akrylátu/metakrylátu volnými radikály. Zdroj [7]

Ve své chemické podstatě se metakryláty liší od akrylátů pouze přítomností metylové skupiny. Chemický vzorec akrylátu a metakrylátu je znázorněn na obrázku 4. Rozdílné fyzikální vlastnosti metakrylátů a akrylátů jsou uvedeny v tab. 1.



Obr. 4: Chemický vzorec akrylátu a metakrylátu. Zdroj [7]

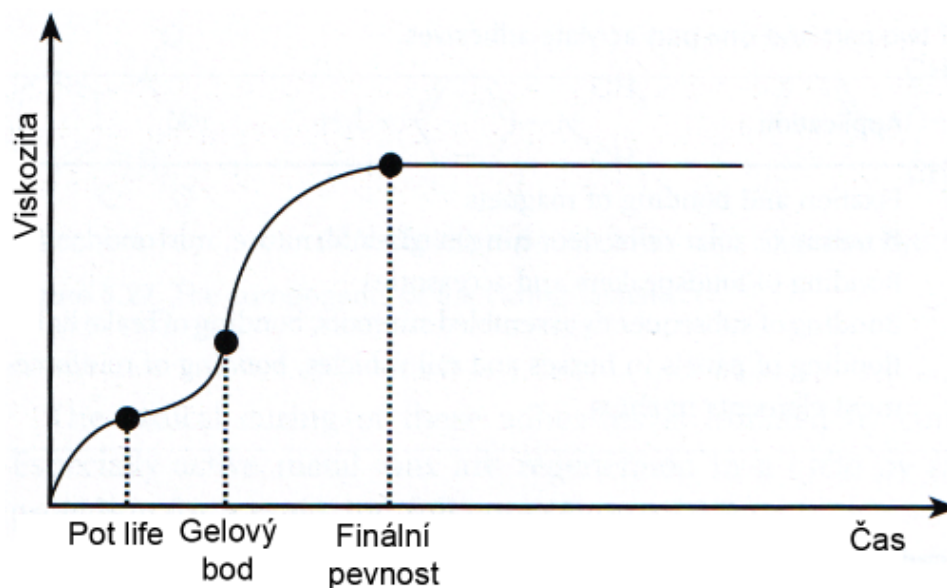
Tab. 1: Porovnání fyzikálních vlastností akrylátových a metakrylátových lepidel. Zdroj [7]

Fyzikální vlastnost	Akrylátová lepidla	Metakrylátová lepidla
Rychlost reakce	Vysoká	Nízká
Pevnost	Vysoká	Velmi vysoká
Chemická odolnost	Dobrá	Velmi dobrá
Flexibilita	Dobrá	Střední

3.4.4. Dvousložková lepidla

Typickým základním monomerem v těchto lepidlech je metyl metakrylát. Velice dobře se chovají ve vlhkém prostředí, snadno lepí plasty, kovy a sklo. Tato lepidla mají velice dobré mechanické vlastnosti a trvanlivost spoje. Mají dobrou odolnost proti stříhu, odlupu a výbornou odolnost proti rázům [8]. Jejich nevýhodou je však poměrně vysoká křehkost. Ke snížení křehkosti se do těchto lepidel přidává akrylonitril-butadien a tekutý isopren [9].

Tato lepidla jsou komerčně k dostání v poměru 1:1 nebo 10:1 ve dvoukomorovém aplikátoru, připravena k okamžitému použití. Při vytlačování lepidla z aplikátoru se zároveň obě složky mísí a nanášejí se již ve stavu jako jedna složka. Jejich „pot life“ (doba, po kterou lepidlo zůstává dostatečně tekuté k aplikaci) je poměrně nízký – to znamená, že tato lepidla je nutné nanášet co nejrychleji po smíšení složek (obr. 5).



Obr. 5: „Pot life“ akrylátového lepidla a závislost viskozity na čase. Nanášení lepidla musí probíhat během. Zdroj [7].

Dvousložková lepidla jsou také dostupná ve formě, kdy se obě složky nanášejí zvlášť. Každá složka je nanášena na jeden povrch lepeného spoje. Po spojení se složky smísí a nastartuje se proces tuhnutí. Výhoda těchto systémů spočívá v neuplatnění se „pot life“, avšak perfektní spojení lze docílit pouze u tenkých spojů.

Typické použití dvousložkových lepidel je uvedeno v tabulce 2.

3.4.5. Jednosložková lepidla

U jednosložkových akrylátů/metakrylátů dochází k podobné vytvrzovací reakci jako u lepidel dvousložkových. Rozdílem je, že k iniciaci reakce nedochází smícháním složek, ale za působení teploty. Za účelem stability při skladování a převozu je u těchto lepidel vytvrzovací teplota 120°C a více. Čím je tato teplota nižší, tím větší je nebezpečí, že se lepidlo začne vytvrzovat při skladování (převozu). Tato lepidla mají prakticky stejné použití, jako lepidla dvousložková, viz tab. 2.

Tab. 2: Typické použití jednosložkových a dvousložkových lepidel. Zdroj [7]

Odvětví průmyslu	Aplikace
Elektrické motory	Fixace a lepení magnetů
Sklo	Lepení solárních panelů, skleněný nábytek, zrcadla
Audio	Lepení reproduktorů a příslušenství
Automobily	Lepení světel, stahovací střechy
Dopravní prostředky	Lepení panelů v autobusech a vlacích, lepení vyztužovacích prvků lodí

3.4.6. Anaerobní akrylátová lepidla

Anaerobní lepidla se komerčně prodávají od roku 1953. První anaerobní lepidlo vyvinul v tomto roce Vernon Krieble v USA a prodávalo se pod značkou Loctite [10]. Započal tak velký rozvoj této společnosti, která je dnes jedním z předních výrobců akrylátových lepidel.

„Anaerobní“ je termín převzatý z biologie, kdy lepidlo zůstává tekuté, pokud je v kontaktu se vzduchem a začne se vytvrzovat ve chvíli, kdy vzduch nemá k lepidlu přístup. Taková situace nastává například ve spoji kov-kov.

Typické aplikace jsou pojišťování šroubů a matic, lepení ložisek a již zmíněných spojů kov-kov. Anaerobní lepidla se schopností odolávat vyšším teplotám a oleji se často používají k lepení spojů v motorech. Jsou to jednosložkové systémy, které se lehce a ekonomicky nanášejí. K tuhnutí dochází ve spoji, a tak se lehce odstraňují zbytky neztuhlého lepidla. Díky malé aktivační energii vytvrzovacího procesu lepidlo tuhne za pokojové teploty.

3.4.7. UV akrylátová lepidla

Na rozdíl od jiných lepidel se UV lepidla velice rychle vytvrzují, řádově sekundy až milisekundy [10],[11]. Tato lepidla se proto často používají k precizní a rychlé výrobě, kdy se produkuje velké množství výrobků v krátkém čase. V dnešní době spočívá hlavní využití v elektrotechnickém průmyslu.

3.5. Viskoelastická materiálu

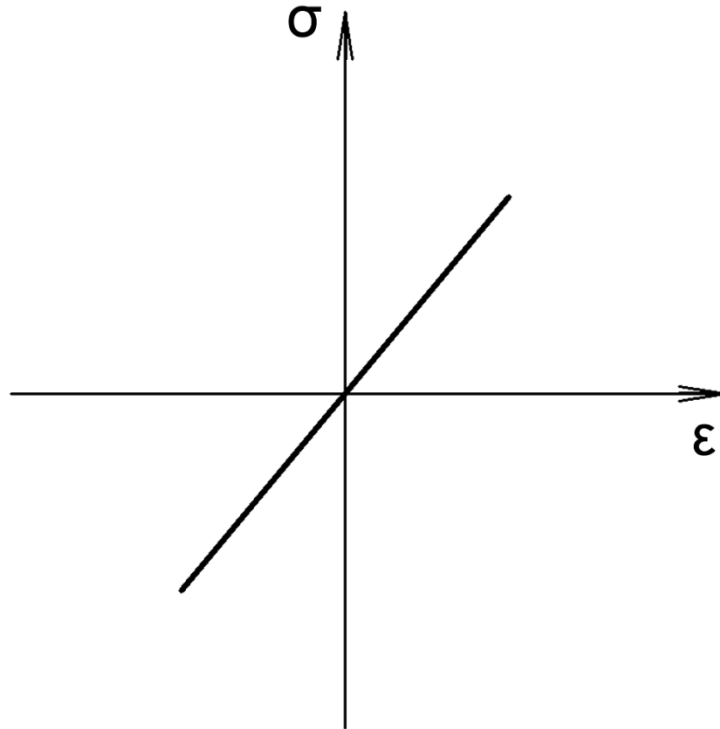
Viskoelastická látka (polymerní materiál) se pod vlivem mechanického namáhání chová současně jako pružná hookovská látka a viskózní newtonská kapalina [12],[13]. Viskoelastická materiálu souvisí se schopností materiálu tlumit mechanické vibrace. Uvažujme harmonické dynamické namáhání (tzn. střídavě v tahu a tlaku) materiálu v oblasti elastických deformací. Při takovém namáhání se napětí i poměrná deformace vše obecně mění s časem. Poměrná deformace $\varepsilon(t)$ má přitom určité fázové zpoždění vůči působícímu napětí $\sigma(t)$. Je to způsobeno strukturálním tlumením materiálu, při kterém dochází k částečné přeměně vložené mechanické energie v teplo. V tomto případě se jedná o vnitřní tlumení materiálu. Množství disipované energie je měřítkem strukturálního tlumení [14]. Z hlediska disipace energie při dynamickém namáhání se rozdělují materiály na elastické, viskoelastické a viskózní.

3.5.1. Elastický materiál

Ideálně elastický materiál je takový druh materiálu, u kterého veškerá energie akumulovaná v materiálovém vzorku při jeho zatížení je zpětně využita při odlehčení tohoto vzorku. Nedochozí tedy k žádné disipaci vložené mechanické energie v teplo[14]. To znamená, že po zatížení elastického materiálu (napětí σ) se jako odezva okamžitě objeví deformace (ε). Pokud je zatížení neměnné, deformace zůstává také neměnná. Po úplném odlehčení ($\sigma = 0$ MPa) deformace také vymizí. Elastická deformace je tedy vratnou deformací. U elastických materiálů platí Hookův zákon (viz. obr. 6), při kterém je lineární závislost mezi napětím a poměrnou deformací:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

kde E je konstanta úměrnosti, tzv. Youngův modul pružnosti v tahu.



Obr. 6: Grafická závislost napětí na poměrné deformaci pro elastický materiál (Hookův zákon).

3.5.2. Viskózní materiál

Ideálně viskózní materiály se chovají úplně naopak při harmonickém namáhání ve srovnání s čistě elastickými materiály. Veškerá energie vložená v materiálovém vzorku při jeho zatížení se disipuje v teplo. Nedochozí tedy k žádnému zpětnému využití vložené

mechanické energie při odlehčení tohoto vzorku. Viskózní materiál teče (cpeepuje) při konstantním zatížení konstantní rychlostí deformace:

$$\dot{\epsilon}_v = \frac{\sigma}{\eta}, \quad (2)$$

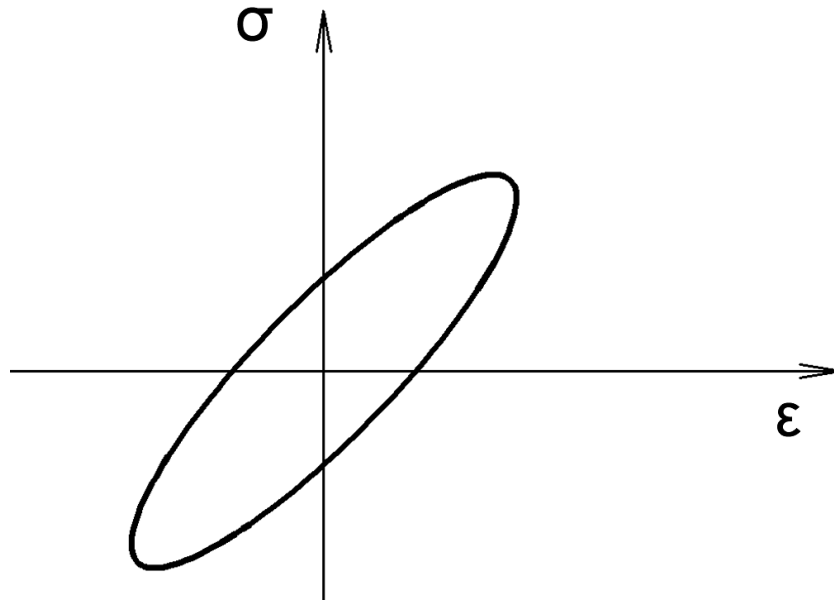
kde $\dot{\epsilon}_v$ je rychlost deformace viskózního materiálu, η je Newtonova viskozita, kterou můžeme definovat:

$$\eta = \tau \cdot E_0. \quad (3)$$

τ představuje časovou konstantu materiálu a E_0 počáteční modul materiálu. Akumulovaná viskózní deformace není při odlehčení vratná.

3.5.3. Viskoelastický materiál

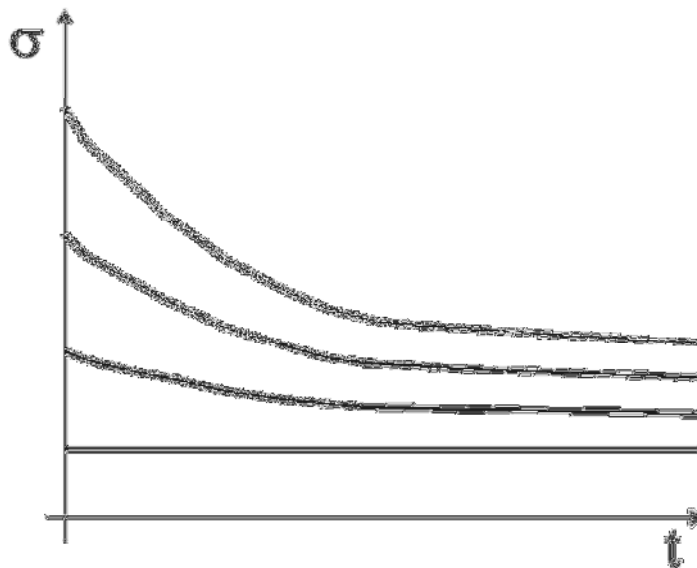
Viskoelastické materiály jsou přechodovou oblastí mezi ideálně elastickými a viskózními materiály. Většina reálných látek je při namáhání charakterizována jak viskózním, tak i elastickým chováním. Jedná se především o přírodní a technické materiály (např. polymery a mnoho typů biologických materiálů apod.). Část vložené mechanické energie při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů se zpětně využije při následném odlehčení. Zbytek energie se disipuje (přemění se v tepelnou energii). Tento proces je nevratný. Množství přeměněné mechanické energie v tepelnou energii je úměrné ploše hysterezní křivky (viz obr. 7), která udává závislost mezi napětím a poměrnou deformací v průběhu jednoho cyklu při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů [15]. Protože závislost mezi napětím a poměrnou deformací je nelineární, neplatí Hookův zákon u viskoelastických materiálů. Při konstantní teplotě lze viskoelastické chování polymerů studovat dvěma typy experimentů: relaxace a creep (tečení).



Obr. 7: Grafická závislost napětí na poměrné deformaci při cyklickém zatížení viskoelastického materiálu – hysterezní křivka.

3.6. Relaxace

Relaxace je jedním ze základních projevů viskoelasticity. Pokud je udržována konstantní deformace, napětí se s časem zmenšuje. Při počátečním zatížení vzorku σ_0 dojde k počáteční deformaci ϵ_0 . Pokud budeme tuto deformaci udržovat konstantní, materiál bude mít odezvu znázorněnou na obrázku 8. Napětí bude tedy s časem klesat [16].

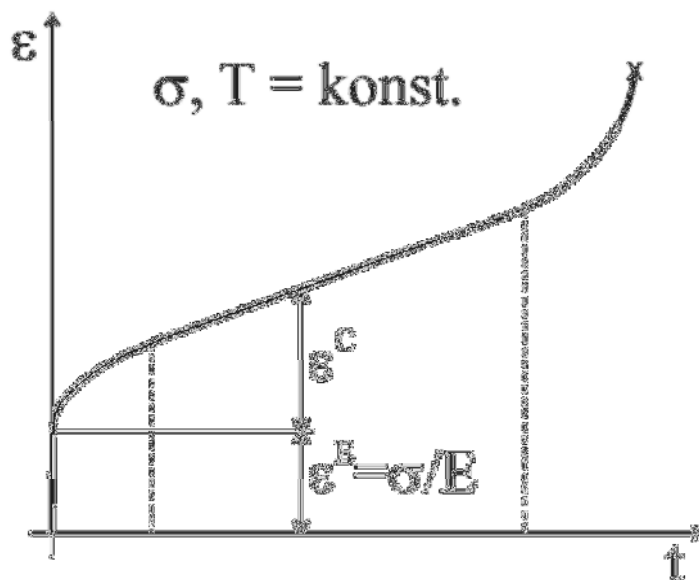


Obrázek 8: Relaxační křivky.

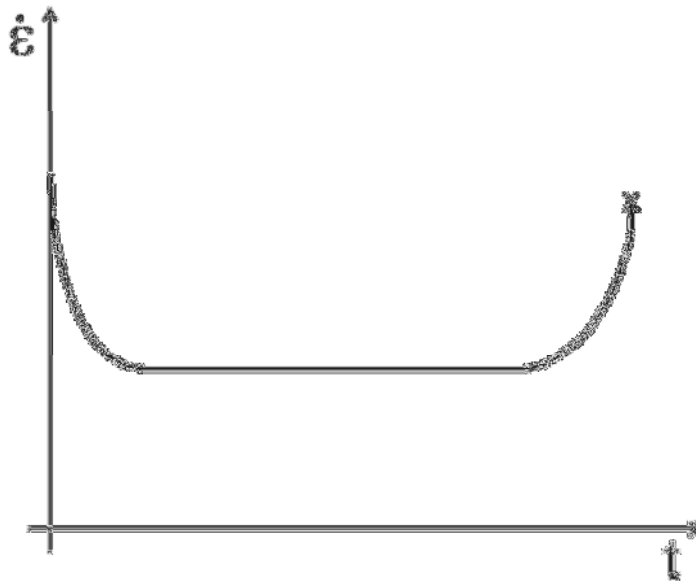
3.7. Creep

Creep (tečení) materiálu nastává, pokud je materiál vystaven konstantnímu zatížení (σ). Deformace se poté zvyšuje v závislosti na teplotě, vlhkosti a času. Polymerní materiály (jako jsou lepidla) podléhají creepovému chování i za pokojových teplot [17]. Typická křivka deformace - čas pro případ jednoosého zatížení zkušební vzorku konstantní silou při konstantní teplotě je na obrázku 9, odpovídající závislost rychlost deformace - čas potom na obrázku 10. V okamžiku aplikace napětí se okamžitě objeví počáteční deformace odpovídající elastické nebo elastoplastické deformaci podle velikosti zatížení. S rostoucím časem rychlost deformace klesá. Potom se ustálí na konstantní hodnotě. Po určité době začne rychlost deformace opět narůstat a dochází k nestabilnímu chování, jež vede k lomu. Creepovou křivku tedy můžeme rozdělit na tři stádia:

- *primární (tranzitní)* - Na počátku je rychlost deformace vysoká, s rostoucím časem však dochází k jejímu poklesu. Tato fáze je relativně krátká.
- *sekundární (stacionární)* - Charakterizováno konstantní rychlostí deformace. Rozhodující z hlediska životnosti konstrukce za podmínek creepu.
- *terciální* - Dochází k nárůstu rychlosti deformace zapříčiněné poškozováním materiálu a tedy oslabováním nosného průřezu vzorku. Končí lomem.



Obr. 9: Creepová křivka za konstantní teploty. Zdroj [15]



Obr. 10: Creepová křivka závislosti rychlosti deformace na čase. Zdroj [15]

3.8. Mechanické zkoušky

U všech materiálů jsou nejdůležitější jejich mechanické vlastnosti, na základě těchto vlastností dochází k dimenzování součástí a k ovlivňování jejich doby funkčnosti. Ve své podstatě vyjadřují to, jak se bude materiál chovat za určité teploty při působení vnějšího namáhání. Pro určování mechanických vlastností jsou zavedeny konvenční zkoušky, které se dělí podle časového průběhu působící síly a které umožňují stanovit základy pevnostní a tvárné charakteristiky materiálu. Způsoby zkoušení jsou totožné se zkouškami klasických konstrukčních materiálů, jež lze nalézt v učebnicích či příručkách vlastností těchto materiálů, a tudíž zde nebudou podrobně rozebírány.

Dle povahy působících sil rozlišujeme zkoušky:

- statické,
- dynamické,
- zjišťování odolnosti proti křehkému porušení.

3.8.1. Zkouška lepidla

V tomto typu experimentu se zjišťují mechanické vlastnosti pouze lepidla (nejsou vyhodnocovány vlastnosti adherentů). Nejčastěji to jsou jednoosé tahové a tlakové experimenty, dále testy na ohyb a krut. Deformace vzorků je při těchto zkouškách poměrně

velká a není problém ji měřit standardními extenzometry. Nejobtížnější fází je příprava vzorků bez defektů (např. porozita).

3.8.2. Tahová zkouška

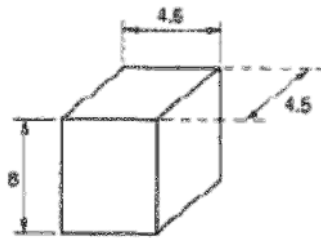
U tohoto testu se používá typická geometrie vzorku, tzv. „Dog bone“ (obr. 11). Z výsledné závislosti napětí-deformace může být vyhodnocen: modul pružnosti, Poissonovo číslo, mez úměrnosti a pevnostní charakteristiky lepidla.



Obr. 11: Typický tvar vzorků pro tahovou zkoušku.

3.8.3. Kompresní zkoušky

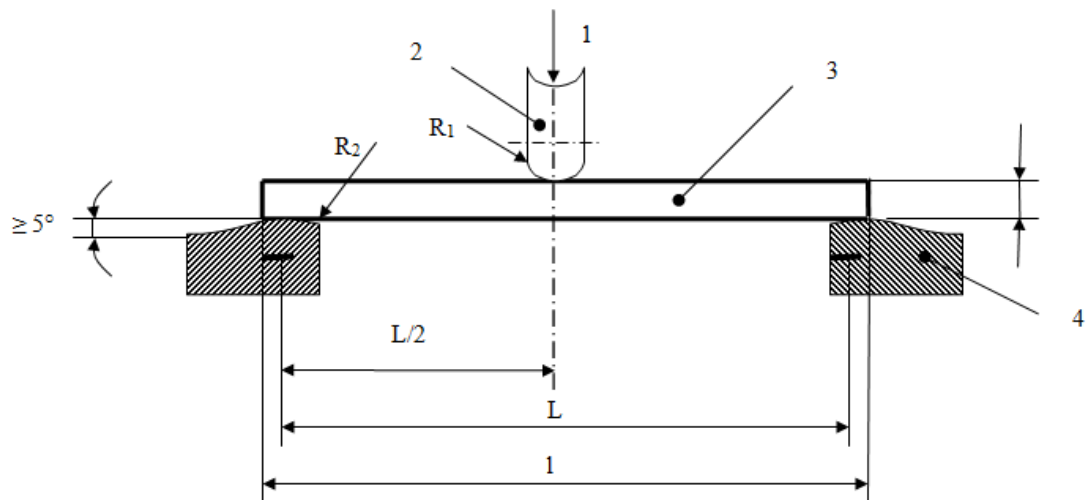
Vzorky pro tento druh zkoušek mají nejčastěji tvar válce a hranolu, používají se také tubulární vzorky. Výstupem tohoto testu jsou pevnostní charakteristiky materiálu.



Obr. 12: Příklad typického vzorku pro kompresní zkoušku.

3.8.4. Tříbodová ohybová zkouška

Účelem tříbodové ohybové zkoušky je charakterizace pevnostních vlastností zejména křehkých materiálů (např. kompozity s křehkou maticí). Tato zkouška se velmi často využívá při zjišťování viskoelastických vlastností materiálů. Proto byla zvolena k testování akrylátového lepidla v této diplomové práci. Schéma zkoušky je znázorněno na obr. 13.



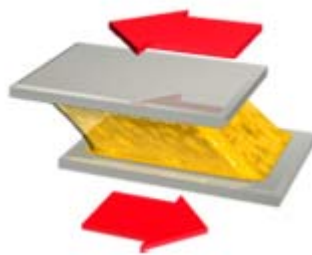
Obr. 13: Charakteristiky zkušebního zařízení pro hodnocení creepu v ohybu [18]

3.8.5. Zkoušky lepených spojů

V těchto testech se nezkoumají vlastnosti jen lepidla jako v předchozích případech, ale lepeného spoje jako celku. Záleží tedy i na vlastnostech adherentu.

3.8.6. Smykové zkoušky

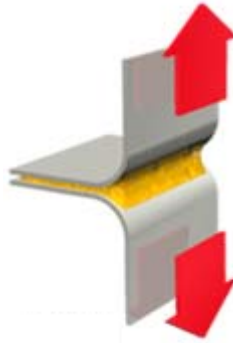
Tyto testy lepených spojů se často využívají ke zjištění pevnosti spoje ve smyku za různých podmínek a při spojování různých materiálů. Schéma smykového testu je uvedeno na obr. 14.



Obr. 14: Schéma smykové zkoušky. Zdroj [19]

3.8.7. Odrhovací zkoušky

Z důvodů náchylnosti lepidel na odtržení jsou tyto druhy testů velice důležité. Vzorčky spojené lepidlem jsou nejčastěji odlupovány pod úhlem 90° nebo 180° . Schéma odtrhovacího testu pod úhlem 180° je znázorněno na obr. 15.



Obr. 15: Schéma odtrhovacího testu pod úhlem 180°. Zdroj [19]

3.9. Reologické viskoelastické modely

Vlastnosti jednoduchých viskoelastických materiálů můžeme reprezentovat pomocí jednoduchých mechanických reologických modelů, které jsou založeny na kombinaci pružin (elastických prvků) a tlumičů (viskózních prvků). Konstitutivní vztahy těchto modelů jsou dobře známy. Jedná se o diferenciální rovnice, jež dávají do vztahu síly působící na model s jeho deformací. V případě creepu, kdy je model zatížen skokově v nějakém počátečním čase konstantní silou (napětím), lze odvodit vývoj deformace v čase.

V tomto vztahu potom vystupují materiálové koeficienty, představující vlastnosti pružin a tlumičů (elastické a viskózní moduly) [20].

Níže uvedené materiálové modely představují přijatelnou aproximaci experimentálně pozorovaného chování materiálů vykazujících viskózní chování [16]. Běžnými experimenty pro určení materiálových dat jsou:

- Creepový test = Je udržováno konstantní napětí a měřena zvětšující se deformace.
- Relaxační test = Je udržována konstantní deformace a měřeno napětí nutné k udržení této deformace.

3.9.1. Maxwellův model

Maxwellův model je nejobecnější forma lineárního modelu pro viskoelasticitu. Model je tvořen tlumičem (čistě viskózní chování) a pružinou (čistě elastické chování), obrázek 16. Po deformačním cyklu zůstává lineární polymer částečně zdeformován. Míra navrácení do původního, nedeformovaného stavu závisí na elastické části, zatímco nevratná deformace

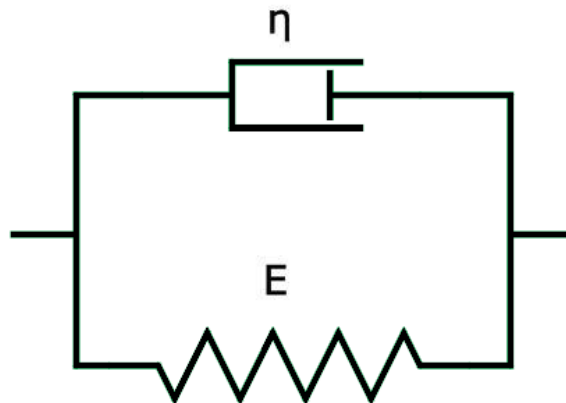
je úměrná viskózní části viskoelastického materiálu. Nevýhodou tohoto modelu je neschopnost popsat creep materiálu.



Obr. 16: Schéma Maxwellova modelu.

3.9.2. Voightův model

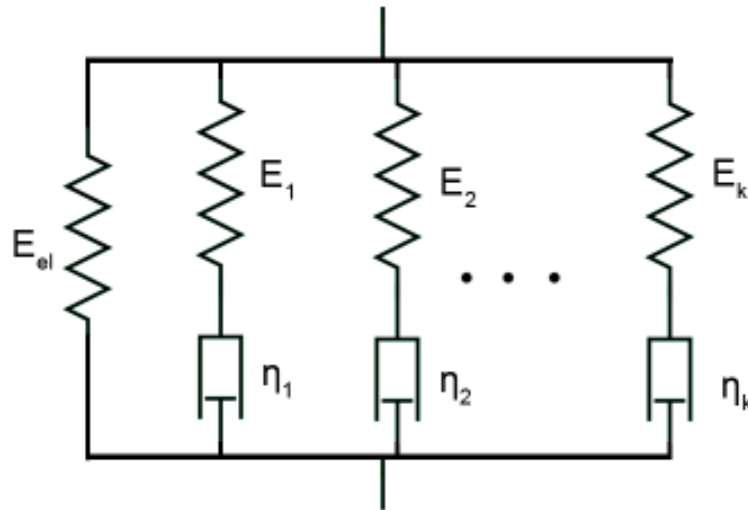
Tento model je obdobou Maxwellova modelu. Rozdíl je v zapojení tlumiče a pružiny, kde v Maxwellově modelu jsou spojeny sériově, kdežto ve Voightově modelu jsou zapojeny paralelně, obr... Tento model dokáže popsat creep, avšak nedokáže vysvětlit relaxaci materiálu.



Obr. 17: Schéma Voightova modelu.

3.9.3. Weichertův model

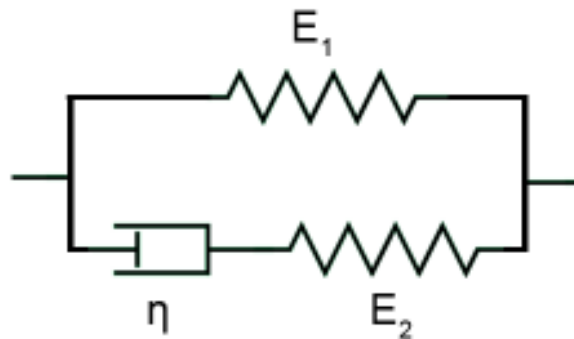
Tříprvkový model chování materiálu. Reálný polymer nerelaxuje v jeden relaxační čas, jako u výše uvedených modelů. Řetězce polymeru o různých délkách přispívají k relaxaci rozdílným způsobem. Kratší segmenty relaxují rychleji než ty delší [21]. Weichertův model (obr. 18) je proto složen z několika jednotek Maxwellova modelu, aby byl schopen efektivněji popsat chování reálného polymeru.



Obr 18: Schéma Weichertova modelu.

3.9.4. Zenerův model

Jedná se o tříprvkový model popisující viskoelastické vlastnosti. Jeho výhoda spočívá ve schopnosti popsat jak creep, tak relaxaci materiálu (na rozdíl od Maxwellova a resp. Voghtova modelu) [21].



Obr. 19: Schéma Zenerova modelu.

4. Vlastní část

4.1. Použité materiály

V první řadě byla nejdůležitější správná volba akrylátového lepidla. Výběr vhodného lepidla nebyl vůbec snadný. Ve volném prodeji je široká škála akrylátových tmelů (které však pro tuto práci nejsou vhodné), ale již ne lepidel. Také ceny akrylátových lepidel jsou poměrně vysoké. Nakonec bylo zvolené akrylátové lepidlo UHU PLUS ACRYLIT od firmy UHU ALLESKLEBER. Jedná se o dvousložkové lepidlo na akrylátové bázi. Je určeno k lepení plastů, dřeva, skla, keramiky, kovů a to jak mezi sebou, tak i navzájem s ostatními materiály. Není vhodné na pěnový polystyren[22].



Obr. 20: Testované akrylátové lepidlo. Zdroj: [22]

Postup přípravy a použití akrylátového lepidla je následující. Podklad musí být suchý, čistý a odmaštěný. K odměření prášku a k promíchání se užije přiložená plastová lžička a špachtlička, které jsou součástí balení. Lepidlo se nanese rovnoměrně do vaničky. Do lepidla se v polovině vaničky nasype 1 malá lžička prášku (v případě plné vaničky se nasype 1 velká lžička) a špachtličkou se důkladně promíchá. Lepidlo se nanáší na obě lepené plochy v tenké vrstvě. Díly se k sobě přitisknou a nechají se 15 minut tuhnout.

Doba zpracování lepidla je 7-10 minut při pokojové teplotě 20-23°C, po 15 minutách dochází k úplnému ztuhnutí[22].

Balení obsahuje dvě základní složky a to tvrdidlo (dibenzoylperoxid 20% v CaSO₄) a pojidlo (methyl-methakrylát, n,n-bis-2-hydroxiethyl-m-toluidin).

Tab. 3: Obsah balení akrylátového lepidla

Název produktu:	Kat. č.Z - TRADE:	Kat. č. UHU:	Obsah balení:	Počet ks v balení:
UHU plus acrylit	5299	48315	30 g	10

Zdroj: [22]

4.2. Použité pomůcky a zkušební zařízení

Pro odlévání vzorků byly použity formičky odlité z LUKOPREN N. Jedná se o silikonový dvousložkový kaučuk kondenzačního typu. Po smíchání pasty s katalyzátorem dochází k vulkanizaci v celé hmotě během několika hodin za tvorby silikonové pryže, která nemá adhezi k podkladu. Výhoda tohoto materiálu spočívá v tom, že lepidla k sobě nepřilnou, navíc jsou formičky pružné a ohebné, tudíž lze vzorky z formiček po vytvrzení bez sebemenších problémů vypreparovat.



Obr. 21: Formičky z LUKOPRENU pro odlévání creepových vzorků

Příprava směsi probíhala za pokojové teploty, kdy se do vaničky vlilo akrylátové lepidlo, přidal se prášek, který se za plynulého míchání s lepidlem smísil. Takto vzniklá směs se nasávala do injekční stříkačky. Proces nasávání musel být prováděn velice pečlivě, aby nedocházelo k nadměrnému tvoření bublin v lepidle, které by měly následně špatný vliv na připravované vzorky. Tento proces musel být proveden ve velmi krátkém časovém intervalu, jelikož lepidlo v krátkém čase rosolovatělo, a již nešlo z injekční stříkačky vytlačit do předem připravených formiček.

Jednotlivé odlitky zkušebních vzorků obsahovaly stejný objem prášku i akrylátového lepidla. Vzorky se pokaždé nechávaly vytvrdit minimálně 24 hodin v pryžových formičkách a následně po vyjmutí byly ponechány v laboratoři o pokojové teplotě sedm dní, aby došlo k opravdu dobrému vytvrzení směsi. Ne všechny vzorky byly bez vad. Pokud na vzorku byly povrchové vady nebo bubliny, které by ohrozily či jakýmkoliv způsobem narušily měření, nebylo s těmito vzorky dále pracováno. Pro měření byly vybrány jen vzorky bez bublin a porušení. U vzorků byly zadány určité rozměry, které musely být dodrženy. Při odlévání vzorků se na povrchu tvoří převýšení, které je za potřeby broušením odstranit. Na obroušení byly použity smirkové papíry o různých rozměrech zrn. Pro odstranění velkých přesahů byl použit papír s hrubými zrny, a pro následné získání přesných rozměrů byl použit jemnozrný papír, aby se dosáhlo požadovaných rozměrů. Pro jednoduché nastavení stojanu byl vzorek zbroušen na 3 mm. Takto zpracované vzorky již byly připraveny pro creep ve stojanu.

Formy mohou být plněny několika způsoby, avšak většina z těchto způsobů přináší velké množství problémů. Mezi prvotní problémy patří nadměrné tvoření bublin a také dlouhá doba plnění forem. Ty musely být plněny co nejrychleji, protože směs přibližně po deseti minutách začala rosolovatět a manipulace s lepidlem byla velmi obtížná. Proto jako nejlepší způsob plnění byl zvolen postup s injekční stříkačkou. Samotný postup s injekční stříkačkou byl zprvu trochu komplikovanější, hlavně ve smyslu tvorby bublin při odlévání vzorků. Připravená směs v nádobce byla nasávána spodem (podtlakem), a tím došlo k odstranění převážné většiny bublin vzniklých při míchání lepidla s tvrdidlem. Zbylé bubliny expandovaly do vrchní části válce injekční stříkačky a to utěsněním kónusu a následným částečným vysunutím pístu, kdy se veškeré bubliny přesunuly do vrchní části a bylo tak možné vytlačení lepidla do forem bez vzniklých bublin.

I malé množství bublin má pak negativní vliv na pevnost a creepové vlastnosti měřených vzorků. To se dá poté odhalit u naměřených hodnot, kde jsou poměrně velké „skoky“, respektive vysoké rozdíly hodnot[6].



Obr. 22: Výroba zkušebních vzorků – plnění forem.

Jelikož rozměry vzorku byly předem stanoveny (hlavně tedy tloušťka), bylo nutné ji změřit. K těmto účelům posloužilo mikrometrické měřidlo s přesností odečtu na setiny milimetru.

Dále také posuvné měřítko pro stanovení vzdálenosti mezi podpěrami, měřící s přesností na 0,02-0,1mm této vzdálenosti. Samotné měřící zařízení pro odečítání hodnot se nazývá úchylkoměr se stupnicí členěnou po setinách milimetru. Každý z těchto úchylkoměrů se nastavoval sám na libovolnou výchozí hodnotu a to tím způsobem, že hrot měřáku se nepatrně přitlačí ke vzorku, nastaví se hodnota a jistící matka se dotáhne.



Obr. 23: Zkušební stojany pro měření creepu akrylátových lepidel

Zkušební stojan je složený z pevného rámu s dvěma podpěrami, které se nacházejí na obou stranách zkušebního tělesa. Vzdálenost je nastavená na (16 ± 1) násobek tloušťky pro normální zkušební tělesa, nebo na více než sedmnáctinásobek tloušťky zkušebního tělesa, anebo na pevnou vzdálenost (tj. 100 mm) pro tuhá, jednosměrně vlákny vyztužená zkušební tělesa. Stojan musí být ve vodorovné poloze a pod zkušebním tělesem (creepovou jednotkou) musí být dostatečný prostor pro jeho průhyb uprostřed jeho podepřené délky i při nejvyšším zatížení[18].

Jako zkušební tělesa byly použity vzorky stejných tvarů a rozměrů přesně tak, jak je předepsáno v normě pro stanovení ohybových vlastností (viz ISO 178[25]). Vzhledem k tomu, že byl zadán jen jeden postup přípravy vzorků, tak všechny vzorky byly připravovány naprosto stejným postupem.

Dalším důležitým krokem byla příprava závaží, které se použilo pro zatížení jednotlivých vzorků. Celkem bylo 10 vzorků a vždy na 2 vzorky bylo nastaveno podobné závaží dle výpočtu ze vzorce (4). Byl použit vzorec, ze kterého jsme po úpravě vypočítali F (zatěžovací sílu), pro jednotlivá σ_1 - σ_5 jsme počítali s předem zadanou hodnotou.

$$F = \frac{\sigma \cdot 2 \cdot b \cdot h^2}{3 \cdot l} \quad (4)$$

Když byly stanoveny veškeré hodnoty, mohl být použit vzorec (5) pro výpočet hmotnosti m .

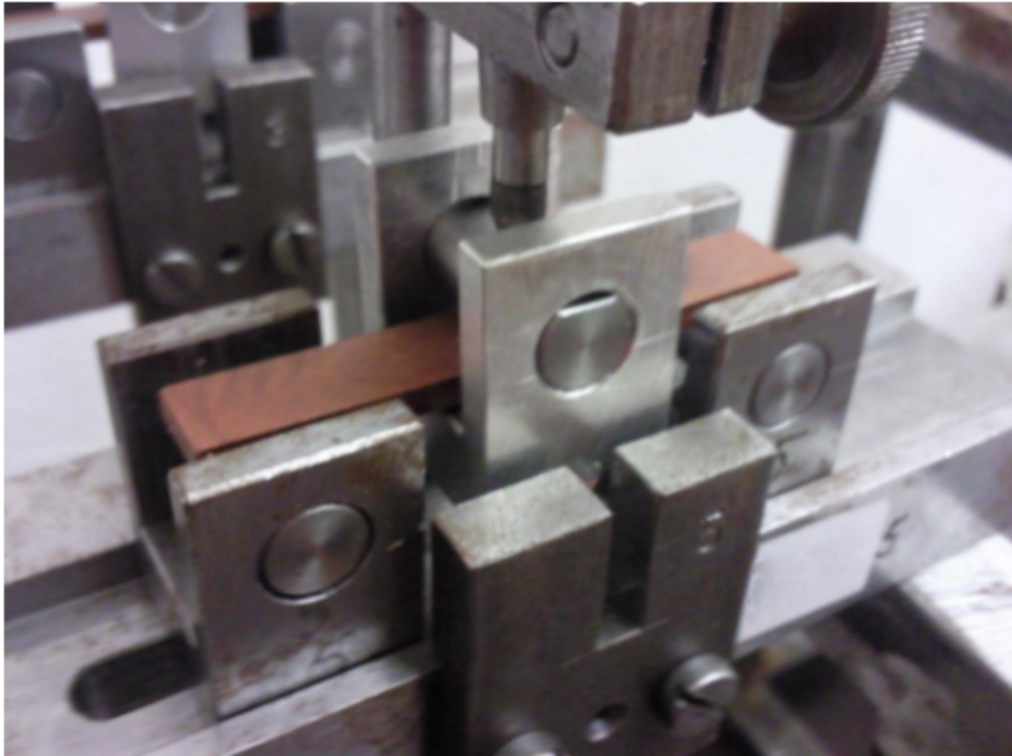
$$m = \frac{F}{g} \quad (5)$$

Hodnota F (síla) byla vypočítána v předchozím kroku, za g (gravitační zrychlení) byla dosazena hodnota 9,81 m/s². V poslední fázi stačilo od vypočítané (hmotnosti) m odečíst 100 g (hodinky, střed) k získání přesné hmotnosti potřebné pro navážku a následné zatížení daných vzorků.

4.3. Postup zkoušky

4.3.1. Kondicionování a prostředí pro zkoušení

Zkušební tělesa se kondicionují podle instrukcí v normě na zkoušený materiál (viz ISO 291 [23]). Pokud tyto informace ohledně kondicionování nejsou k dispozici, použije se nejvhodnější prostředí pro kondicionování. Creepové chování je ovlivněno nejen tepelnou historií zkušebního tělesa (vzorku), ale také teplotou a (pokud je použita) i vlhkostí, které jsou použité při kondicionování. Dle normy ISO 62 je doporučena doba při kondicionování $\geq t_{90}$ (viz ISO 62 [24]). Zkouší se ve stejném prostředí použitým ke kondicionování, pokud není dohodnuto jinak mezi smluvními stranami, např. u zkoušek při zvýšené nebo nízké teplotě. Teplota musí být během zkoušky v tolerancích ± 2 °C[25].



Obr. 18: Detailní záběr podpěrné plochy pro uchycení vzorku

4.3.4. Výběr hodnoty napětí

Vhodná hodnota napětí se volí dle předpokládaného použití zkoušeného materiálu a pomocí rovnice uvedené pro zatížení, které bude použito pro etalon, který bude měřen. Zvolí se takové napětí, aby průhyb nebyl v žádném okamžiku zkoušky větší než 0,1 mm vzdálenosti mezi podpěrami[18].

4.3.5. Postup zatěžování

Předběžné zatížení

Pakliže je nutné zkoušený etalon před zvýšením zatížení na zkušební hodnotu předběžně zatížit, musí být zajištěno, aby toto předběžné zatížení nemělo vliv na výsledky zkoušky. Nesmí být zatěžován, dokud teplota a vlhkost zkoušeného vzorku (uchyceného v přístroji) neodpovídají podmínkám zkoušky. Po aplikaci předběžného zatížení se přístroj k měření průhybu nastaví na nulu; předběžné zatížení se udržuje během celé doby zkoušky[18].

Zatěžování

Zatěžování zkušebního etanolu probíhá progresivně tak, aby k plnému zatížení došlo 1 s až 5 s po začátku zatěžování. V každé sérii zkoušení jednoho materiálu je použita stejná rychlost zatěžování. Celkové zatížení (včetně předběžného) je bráno jako zkušební zatížení [18].



Obr. 19: Zatěžování creepového etanolu

Časový rozvrh měření průhybu

Časový okamžik, kdy je zatěžovaný etanol plně zatížen, je označen jako $t=0$. Pokud se průhyb nezaznamenává automaticky nebo kontinuálně, musí se určit doby ke stanovení jednotlivých měřených hodnot podle průběhu creepové křivky zkoušeného materiálu. Je vhodné použít následující měřicí časový rozvrh:

1 min, 3 min, 6 min, 12 min a 30 min;

1 h, 2 h, 5 h, 10 h, 20 h, 50 h, 100 h, 500 h, 1 000 h, atd.

Pakliže se předpokládá nebo bylo nastaveno, že se v časovém průběhu křivky „poměrné prodloužení při creepu v ohybu – čas“ vyskytují určité nepravidelnosti, hodnoty se odečítají častěji, než je poukázáno v hodnotách uvedených výše [18].

Měření času creepu

Jedná se o celkový čas, který uplyne od každého jednotlivého bodu měření creepu, je měřen s přesností $\pm 0,1$ % nebo ± 2 s (dle toho, která tolerance je mírnější)[18].

Kontrola teploty a vlhkosti

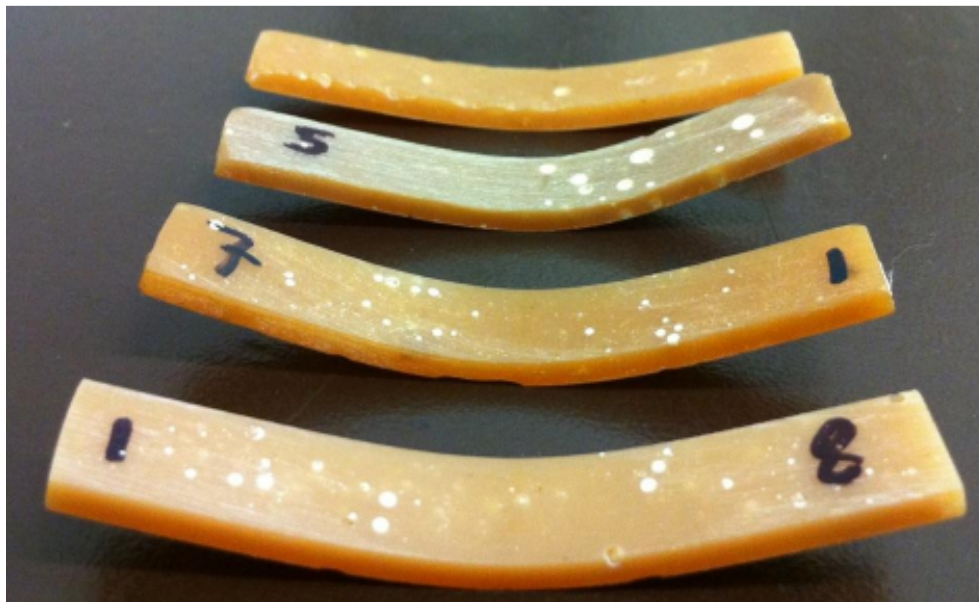
Pakliže hodnoty teploty a vlhkosti nejsou zaznamenávány automaticky, je třeba je zapisovat na začátku zkoušky a následně nejméně třikrát denně. Pokud je jisté, že podmínky jsou stabilizovány v rámci předepsaných limitů, je možné kontrolované parametry omezit (ale aspoň jednou denně)[18].



Obr. 20: Digitální teploměr

Měření rychlosti zotavení (nezávazné)

Po ukončení nedestruktivních zkoušek se tělesa rychle odtíží a měří se rychlost zotavení například ve stejném časovém režimu jako při měření creepu[18]. A však toto nebylo předmětem práce.



Obr. 21: Testované vzorky po mechanické zkoušce.



Obr. 22: Testované vzorky po mechanické zkoušce.

4.3.6. Vyjádření výsledků

Metoda výpočtu

- *Creepový modul v ohybu, E_t*

Creepový modul E_t v megapascalch se v každém zvoleném časovém okamžiku zkoušky vypočte podle následující rovnice (6):

$$E_t = \frac{L^3 \cdot F}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot S_t} \quad (6)$$

kde

L je vzdálenost mezi podpěrami zkušebního tělesa, [mm];

F použitá síla, [N];

b šířka zkušebního tělesa, [mm];

h tloušťka (výška) zkušebního tělesa, [mm];

S_t průhyb střední části v čase t, [mm][18].

- *Napětí v ohybu, σ*

Napětí v ohybu σ , v megapascalch, se vypočítá podle následující rovnice (7):

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (7)$$

kde

L je vzdálenost mezi podpěrami zkušebního tělesa, [mm];

F použitá síla, [N];

b šířka zkušebního tělesa, [mm];

h tloušťka (výška) zkušebního tělesa, [mm][18].

- Poměrné prodloužení při creepu v ohybu, ε_t

Poměrné prodloužení při creepu v ohybu ε_t se vypočítá podle následující rovnice (8):

$$\varepsilon_t = \frac{6 \cdot S_t \cdot h}{L^2} \quad (8)$$

kde

s_t průhyb střední části v čase t , [mm];

h je tloušťka, respektive výška zkušební tělesa, [mm];

L je vzdálenost mezi podpěrami zkušební tělesa, [mm][18].

4.3.7. Zaznamenávání hodnot a grafické znázornění výsledků

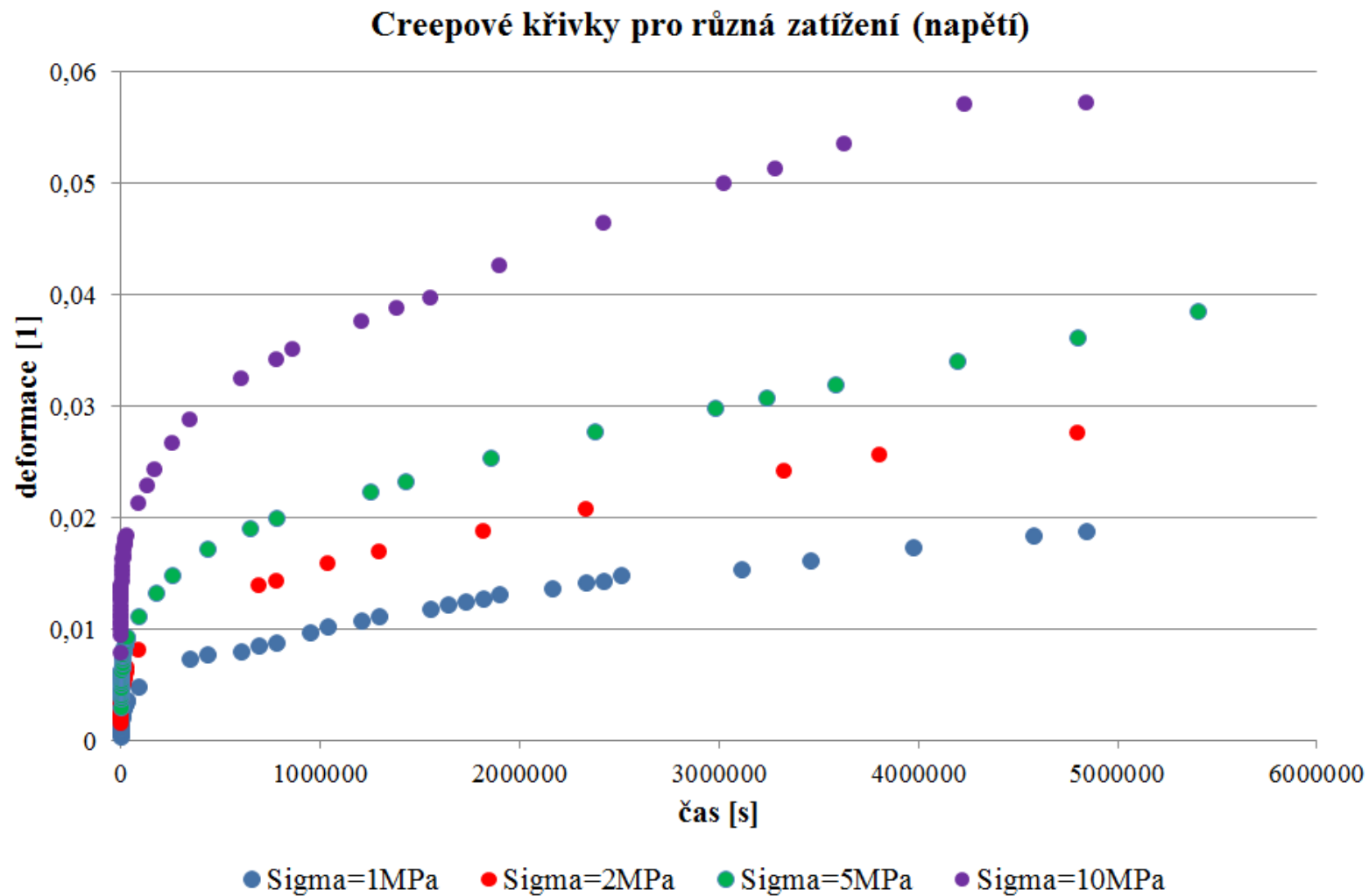
Následné zpracování výsledků probíhalo v několika fázích, při kterých bylo zapotřebí použít programy pro jednodušší zpracování. V první řadě byl použit program pro nejjednodušší zobrazení creepového chování a to Microsoft Excel, který umožňuje okamžité sledování chování creepové jednotky a dostatečně informuje o možných vadách a vnitřních poruchách. Do programu Microsoft Excel byly taktéž zaznamenávány veškeré údaje o vzorcích v průběhu měření. Jako první hodnoty se zaznamenávaly míry vzorků, což byla délka, šířka a tloušťka vzorku a na základě těchto údajů byla vypočítána potřebná zatěžující síla a velikost závaží působícího při samotném zkoušení na etanol. Dalšími důležitými hodnotami bylo požadované napětí na creep, které bylo rozdílné a bylo vždy použito dvakrát na dva testované vzorky z celkových deseti vzorků. Požadované napětí bylo zadáno 1; 2; 5; 7,5 a 10 MPa. Délka podpěr a zatížení hodiněk měřené v gramech.

Do samotné tabulky měření creepu, která byla předem připravena, se zapisoval přesný čas odečtením hodnoty, naměřená hodnota a výpočet času, který uplynul od počátku měření. Ten se posléze převedl na co nejmenší jednotky, v tomto případě sekundy. Požadovaný celkový čas pro měření creepového chování je v průměru cca čtyři a půl miliónu sekund, které po přepočtu dají zhruba padesát dní. Systém odečítání hodnot byl nastaven dle státní technické normy.

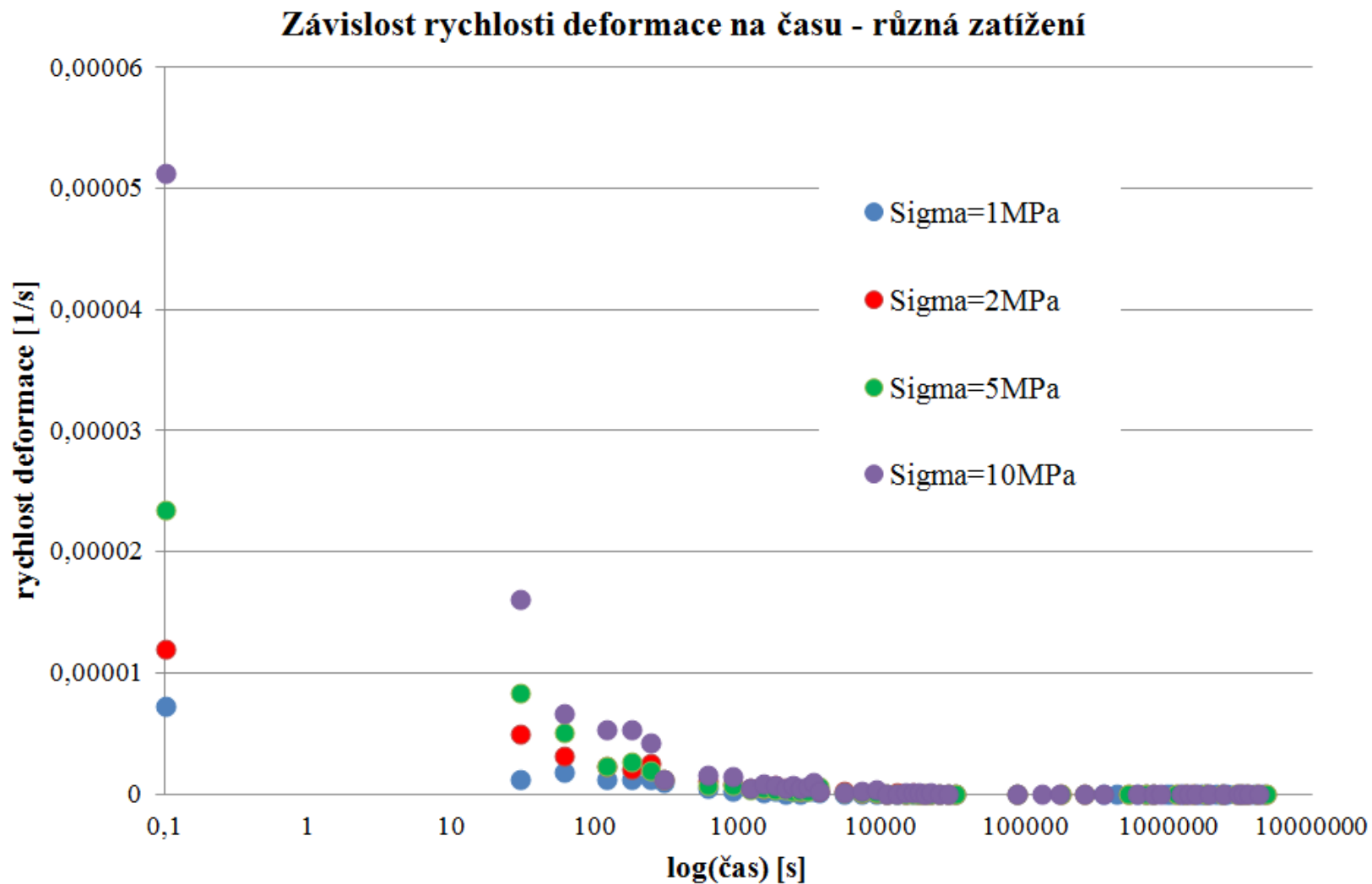
Postup celkového měření vypadal tak, že se nastavila počáteční hodnota na hodinkách úchylkoměru a potom se vzorek velmi pomalu a dynamicky zatížil. Obě tyto hodnoty se zapsaly a první minutu zatížení vzorku se měřené hodnoty zaznamenávaly po třiceti

sekundách. Následných pět minut, byly hodnoty zaznamenávány po minutových intervalech a pak se interval zaznamenávání hodnot zvýšil na pět minut, po určité době se interval opět navýšil a to na třicet minut a posléze na celou hodinu. Tento cyklus platil vždy jen pro první den. Ostatní dny se odečítaly hodnoty dvakrát denně v případě prvního týdne, následující týden jedenkrát denně a zbytek doby do čtyřech a půl miliónu sekund se hodnoty zaznamenávali pouze jednou týdně.

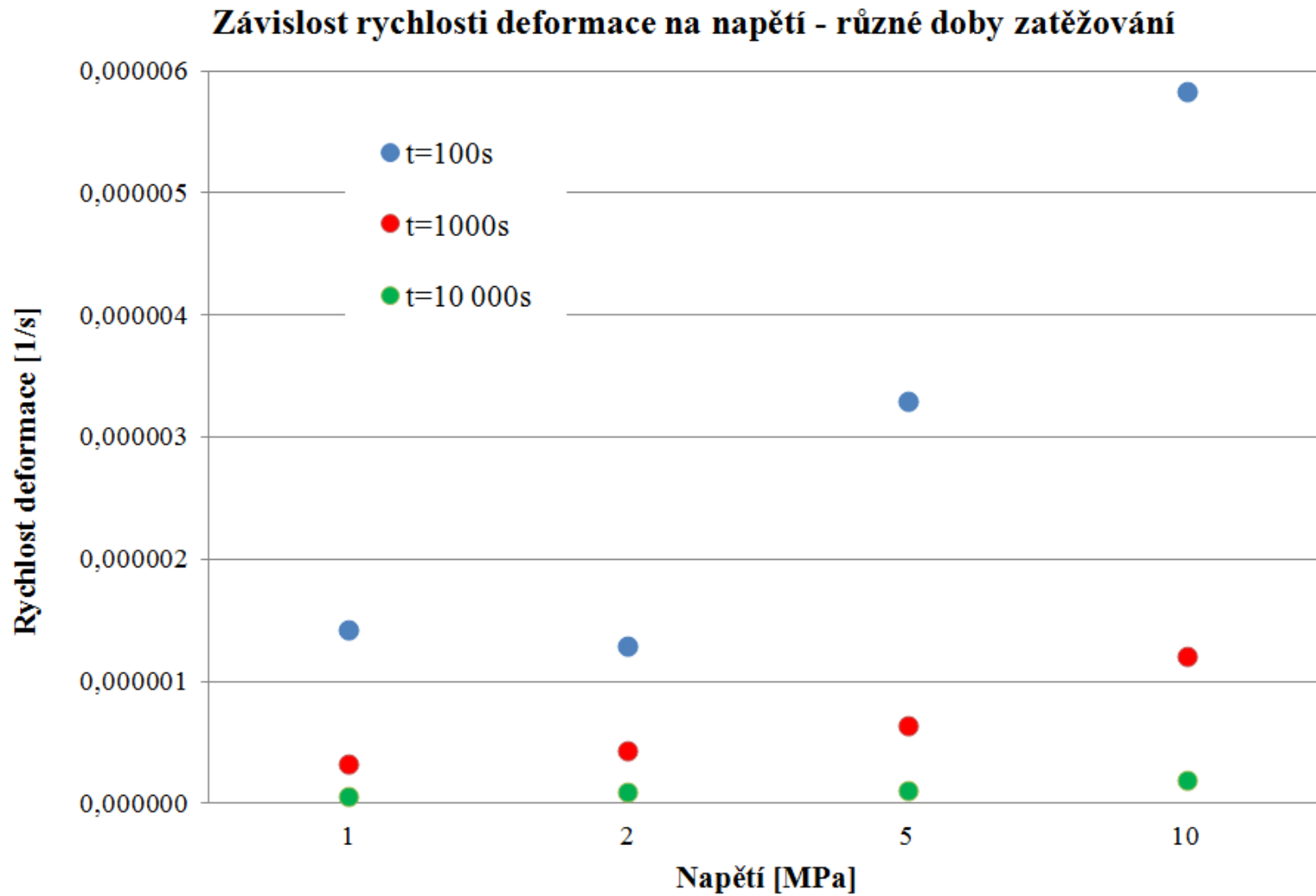
Z naměřených hodnot byly sestrojeny creepové křivky (závislost deformace ϵ_t na čase t), graf 2. Dále byla vypočítána hodnota rychlosti deformace a sestrojeny závislosti: rychlost deformace – čas (pro různé hodnoty nastaveného napětí), graf 3 a rychlost deformace – napětí (pro pevně zvolenou hodnotu času), graf 4.



Graf 2: Závislost deformace na čase pro různé hodnoty napětí (zatížení) – creepové křivky.



Graf 3: Závislost rychlosti deformace na čase pro různé hodnoty napětí (zatížení).

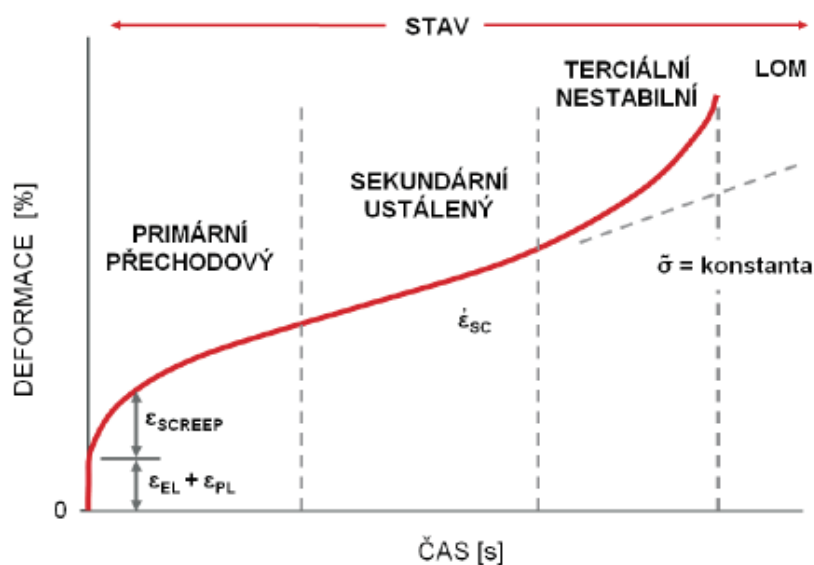


Graf 4: Závislost rychlosti deformace na zatížení (napětí) pro různé doby zatěžování.

5. Závěr a diskuze výsledků

Cílem této práce bylo vyhodnocení creepových vlastností akrylátového lepidla UHU PLUS ACRYLIT. Třibodová ohybová zkouška byla provedena pro pět různých hodnot zatížení (napětí 1; 2; 5; 7,5; 10 MPa), byla odečítána hodnota deformace a také průběh teploty. Celá zkouška trvala přibližně čtyři a půl miliónu sekund. Z naměřených hodnot byla vypočtena rychlost deformace. Typické creepové křivky (závislost deformace na čase) pro různé hodnoty zatížení ukazuje grafu 2. Výsledná závislost rychlosti deformace na čase je znázorněna na grafu 3. Výsledky získané pro zatížení $\sigma=5$ MPa nebyly signifikantní, a proto zde nejsou uvedeny. Z grafu 3 je patrné, že čím vyšší byla hodnota zatížení vzorku, tím vyšší byla počáteční rychlost deformace a také pokles této rychlosti.

V první fázi (0 - cca 150 s) byla závislost nelineární, po uplynutí tohoto času se průběh jeví lineárně. V čase cca 10.000 s dochází k ustálení hodnot rychlostí deformace pro všechna zatížení na stejné hodnotě. Asymptotou průběhů rychlostí deformace pro $t \rightarrow \infty$ je $\dot{\epsilon} = 0$. Z toho je patrné, že experiment probíhal do sekundární oblasti creepu (ustálený stav), viz. obr. 23.



Obr. 23: Obecná creepová křivka, zdroj [26].
 primární stav: rychlost deformace se zmenšuje
 sekundární stav: konstantní růst deformace
 terciální stav: rychlost deformace se nestabilně zvyšuje

Z creepových křivek lze sestavit tak zvané isochronní křivky (ČSN EN ISO 11403-1), což jsou křivky závislosti rychlosti deformace na napětí při creepu odpovídající

dlouhodobému zatížení. Isochronní křivky umožňují stanovit, jakou lze předpokládat po určité době rychlost deformace (resp. deformaci), bude-li na polymer působeno určitým napětím a naopak. Rovněž umožní určit creepový modul pružnosti, důležitý pro navrhování životnosti výrobku.

Z hodnot zaznamenaných v grafu 3 byly sestrojeny isochronní křivky pro pevně stanovené hodnoty času ($t = 100, 1000, 10.000$ s), graf 4. Z grafu 4 je patrný značný vliv velikosti zatěžovacího napětí na rychlost deformace především v počátku experimentu (tj. v intervalu od 0 do 1000 s). Při delším zatěžování už hodnota napětí rychlost deformace tolik neovlivňuje.

Creepové vlastnosti materiálu silně závisí na teplotě měřeného vzorku. Při provedených experimentech byla teplota okolí udržována stacionární klimatizací na přibližně konstantní hodnotě 22°C . Z důvodu konstrukce použité klimatizace docházelo během experimentu k mírnému kolísání teploty prostředí, viz. graf 1. Pro lepší pochopení creepového chování akrylátového lepidla, bude vhodné navrhnout další experimenty, které budou probíhat za různých teplot.

6. Seznam literatury

- [1] *Wikipedie – Otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2011-03-25]. Lepidlo. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Lepidlo>>.
- [2] CATCHPOLE, E. J.: *Appl. Polymer Symposia No. 3*, 203, 1966.
- [3] PETERKA, J. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1980. 792 s.
- [4] ADHESIVES.ORG [online]. 2010 [cit. 2010-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.adhesives.org/>>.
- [5] CHDHARMAWAN, M. M.: *Civil and Environmental Engineering*, Master's Thesis 2007:110
- [6] PETERKA, J. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1980. ISBN 80-89041-88-4.
- [7] BROCKMANN, W., GEISS, P. L., KLINGEN, J., SCHRODER, B. *Adhesive bonding*. Wiley. 2009. 414s. ISBN 978-3-527-32014-1.
- [8] KALCIK, K. *Epoxy 1200 známé – neznámé*. [online]. [cit. 2011-03-25]. Dostupné z WWW: <http://www.mo-na-ko.net/clanky3/123_Epoxyd/clanek.htm>.
- [9] BOEDER, C.W. *Adhesives, Coatings and Sealers Division*, 3M, St. Paul, MN, USA.
- [10] ONUSSEIT, H. PUR-Schmelzklebstoffe. *Bindereport*, 1997, no. 11, s. 36.
- [11] ONUSSEIT, H. Klebebinden mit mehrschichtigem Klebstoffauftrag. *Bindereport*, 2000, no. 11, s. 38-39.
- [12] WARD, I. M.: *The Mechanical Properties of Solid Polymers*. Wiley. 1983. 492s., ISBN 978-0471900115.
- [13] FERRY, J. D. : *Viscoelastic Properties of Polymers*, Wiley. 1980. 641s., ISBN 978-0471048947.
- [14] Viskoelasticita materiálů [online]. [cit. 2011-03-25]. Viskoelasticita materiálů. Dostupné z WWW: <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_06.pdf>.
- [15] Viskoelasticita [online]. [cit. 2011-03-25]. Viskoelasticita. Dostupné z WWW: <<http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/PC/Viskoelasticita.pdf>>.
- [16] DUNNE, F., PETRINIC, N. *Introduction to Computational Plasticity*. Oxford University Press. 2005. 241s., ISBN 9780198568261.
- [17] DHARMAWAN, M. M. *Civil and Environmental Engineering*, Master's Thesis 2007:110

- [18] ČSN EN ISO 988 - 2. *Plasty - Stanovení kríповého chování - Část 2: Kríp v ohybu při třibodovém zatížení*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004. 20 s.
- [19] Adhesivtest.com [online]. [cit. 2011-03-25]. Dostupné z WWW:
<http://www.adhesivtest.com/intro_at.htm>.
- [20] Modelování v biomechanice [online]. [cit. 2011-03-25]. Modelování v biomechanice.
Dostupné z WWW:<<http://www.kme.zcu.cz/granty/biofrvs/experiment.html>>.
- [21] ROYLANCE, D. *Engineering Viscoelasticity.*, 2001., s. 14 – 15.
- [22] UHU - lepidla a tmely. [online]. 2008 [cit. 2012-01-13]. Dostupné z WWW:
<http://www.uhu.cz/dvouslozkova-lepidla_uhu-plus-acrylit>.
- [23] ČSN EN ISO 291. *Plasty - Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení*, Polymer Institute, spol.s.r.o, 1.1.2009. 12 s.
- [24] ČSN EN ISO 62. *Plasty - Stanovení nasákavosti ve vodě*, 1.8.2008. 32 s.
- [25] ČSN EN ISO 178 . *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. [s.l.] : Chemopetrol, a.s., 1.7.2003. 20 s.
- [26] Kríповé vlastnosti plastu [online]. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z WWW:
<<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/projekty/frvs2660/poster2.pdf>>.

7. Seznam obrázků

Obr. 1: Síly v lepeném spoji. Zdroj [4]

Obr. 2: Závislost kontaktního úhlu na smáčivosti.

Obr. 3: Polymerizace akrylátu/metakrylátu volnými radikály. Zdroj [7]

Obr. 4: Chemický vzorec akrylátu a metakrylátu. Zdroj [7]

Obr. 5: „Pot life“ akrylátového lepidla a závislost viskozity na čase. Nanášení lepidla musí probíhat během. Zdroj [7].

Obr. 6: Grafická závislost napětí na poměrné deformaci pro elastický materiál (Hookův zákon).

Obr. 7: Grafická závislost napětí na poměrné deformaci při cyklickém zatížení viskoelastického materiálu – hysterezní křivka.

Obr. 8: Relaxační křivky.

Obr. 9: Creepová křivka za konstantní teploty. Zdroj [15]

Obr. 10: Creepová křivka závislosti rychlosti deformace na čase. Zdroj [15]

Obr. 11: Typický tvar vzorků pro tahovou zkoušku.

Obr. 12: Příklad typického vzorku pro kompresní zkoušku.

Obr. 13: Charakteristiky zkušebního zařízení pro hodnocení creepu v ohybu [18]

Obr. 14: Schéma smykové zkoušky. Zdroj [19]

Obr. 15: Schéma odtrhovacího trestu pod úhlem 180°. Zdroj [19]

Obr. 16: Schéma Maxwellova modelu.

Obr. 17: Schéma Voightova modelu.

Obr. 18: Schéma Weichertova modelu.

Obr. 19: Schéma Zenerova modelu.

Obr. 21: Testované vzorky po mechanické zkoušce.

Obr. 22: Testované vzorky po mechanické zkoušce.

8. Seznam tabulek

Tab. 1: Porovnání fyzikálních vlastností akrylátových a metakrylátových lepidel. Zdroj [7]

Tab. 2: Typické použití jednosložkových a dvousložkových lepidel. Zdroj [7]

Tab. 3: Obsah balení akrylátového lepidla. Zdroj [22]

9. Seznam grafů

Graf 1: Průběh teploty během creepové zkoušky.

Graf 2: Závislost deformace na čase pro různé hodnoty napětí (zatížení) – creepové křivky.

Graf 3: Závislost rychlosti deformace na čase pro různé hodnoty napětí (zatížení).

Graf 4: Závislost rychlosti deformace na zatížení (napětí) pro různé doby zatěžování.

10. Seznam příloh

Příloha 1: Naměřené hodnoty creepu pro vzorek č. 1 a výpočty.

Příloha 2: Naměřené hodnoty creepu pro vzorek č. 2 a výpočty.

Příloha 3: Naměřené hodnoty creepu pro vzorek č. 3 a výpočty.

Příloha 4: Naměřené hodnoty creepu pro vzorek č. 5 a výpočty.

Příloha 5: Naměřené hodnoty creepu pro vzorek č. 7 a výpočty.

Příloha 6: Naměřené hodnoty creepu pro vzorek č. 8 a výpočty.

Příloha 1 Naměřené hodnoty creepu pro vzorek č. 1 a výpočty

vzorek č. 1 [mm]	čas [s]	St[mm]	ϵ_t (-)	E_t (MPa)
6,19	0	0,000	0,000000	0,000
6,13	0	0,060	0,000439	2218,531
6,10	30	0,090	0,000659	1479,021
6,10	60	0,095	0,000696	1401,178
6,08	120	0,110	0,000806	1210,108
6,07	180	0,120	0,000879	1109,266
6,06	240	0,130	0,000952	1023,938
6,05	300	0,140	0,001025	950,799
6,01	600	0,180	0,001318	739,510
5,99	900	0,200	0,001465	665,559
5,98	1200	0,210	0,001538	633,866
5,96	1500	0,230	0,001685	578,747
5,96	1800	0,235	0,001721	566,434
5,94	2100	0,248	0,001816	536,741
5,94	2400	0,250	0,001831	532,448
5,93	2700	0,260	0,001904	511,969
5,93	3000	0,262	0,001919	508,061
5,92	3300	0,275	0,002014	484,043
5,90	3600	0,286	0,002095	465,426
5,88	5400	0,315	0,002307	422,577
5,85	7200	0,340	0,002490	391,506
5,83	9000	0,362	0,002651	367,712
5,81	10800	0,380	0,002783	350,294
5,80	12600	0,390	0,002856	341,313
5,78	14400	0,410	0,003003	324,663
5,77	16200	0,420	0,003076	316,933
5,76	18000	0,430	0,003149	309,563
5,75	19800	0,439	0,003215	303,216
5,74	21600	0,450	0,003296	295,804
5,72	25200	0,469	0,003435	283,821
5,70	28800	0,490	0,003589	271,657
5,68	32400	0,509	0,003728	261,516
5,52	86400	0,670	0,004907	198,674
5,19	345600	1,002	0,007339	132,846
5,13	432000	1,058	0,007749	125,815
5,09	604800	1,103	0,008079	120,682
5,03	691200	1,159	0,008489	114,851
4,99	777600	1,198	0,008774	111,112
4,86	950400	1,332	0,009756	99,934

4,80	1036800	1,393	0,010203	95,558
4,72	1209600	1,471	0,010774	90,491
4,67	1296000	1,517	0,011111	87,747
4,58	1555200	1,614	0,011821	82,473
4,51	1641600	1,678	0,012290	79,328
4,49	1728000	1,701	0,012458	78,255
4,46	1814400	1,734	0,012700	76,766
4,39	1900800	1,799	0,013176	73,992
4,32	2160000	1,875	0,013733	70,993
4,25	2332800	1,940	0,014209	68,614
4,24	2419200	1,950	0,014282	68,263
4,16	2505600	2,031	0,014875	65,540
4,08	3110400	2,108	0,015439	63,146
3,98	3456000	2,206	0,016157	60,341
3,82	3974400	2,366	0,017329	56,260
3,68	4579200	2,512	0,018398	52,990
3,62	4838400	2,570	0,018823	51,795

Příloha 2 Naměřené hodnoty creepu pro vzorek č. 2 a výpočty

vzorek č. 2 [mm]	čas [s]	St[mm]	ϵ_t (-)	E_t (MPa)
0,895	0	0,000	0,000000	0,000
0,895	0	0,005	0,000036	27554,400
0,890	30	0,005	0,000036	27554,400
0,890	60	0,005	0,000036	27554,400
0,890	120	0,005	0,000036	27554,400
0,890	180	0,005	0,000036	27554,400
0,890	240	0,005	0,000036	27554,400
0,890	300	0,007	0,000051	19681,714
0,888	600	0,017	0,000123	8104,235
0,878	900	0,023	0,000167	5990,087
0,872	1200	0,028	0,000203	4920,428
0,867	1500	0,033	0,000239	4174,909
0,862	1800	0,037	0,000268	3723,568
0,858	2100	0,043	0,000312	3204,000
0,852	2400	0,050	0,000363	2755,440
0,845	2700	0,055	0,000399	2504,945
0,840	3600	0,065	0,000472	2119,569
0,830	5400	0,083	0,000602	1659,904
0,812	7200	0,095	0,000689	1450,232
0,800	9000	0,105	0,000762	1312,114
0,790	10800	0,110	0,000798	1252,473
0,785	12600	0,120	0,000871	1148,100
0,775	14400	0,125	0,000907	1102,176
0,770	16200	0,133	0,000965	1035,880
0,762	18000	0,136	0,000987	1013,029
0,759	19800	0,144	0,001045	956,750
0,751	21600	0,147	0,001067	937,224
0,748	25200	0,156	0,001132	883,154
0,739	28800	0,167	0,001212	824,982
0,728	32400	0,247	0,001792	557,781
0,648	86400	0,415	0,003011	331,981
0,480	345600	0,451	0,003273	305,481
0,444	432000	0,473	0,003432	291,273
0,422	604800	0,496	0,003599	277,766
0,399	691200	0,517	0,003751	266,484
0,378	777600	0,585	0,004245	235,508
0,310	950400	0,617	0,004477	223,293
0,278	1036800	0,655	0,004753	210,339
0,240	1209600	0,677	0,004912	203,504

0,218	1296000	0,730	0,005297	188,729
0,165	1555200	0,765	0,005551	180,094
0,130	1641600	0,783	0,005682	175,954
0,112	1728000	0,800	0,005805	172,215
0,095	1814400	0,835	0,006059	164,996
0,060	1900800	0,877	0,006364	157,095
0,018	2160000	0,905	0,006567	152,234
-0,010	2332800	0,905	0,006567	152,234
-0,025	2419200	0,920	0,006676	149,752
-0,072	2505600	0,967	0,007017	142,474
-0,115	3110400	1,010	0,007329	136,408
-0,172	3456000	1,067	0,007742	129,121
-0,255	3974400	1,150	0,008345	119,802
-0,323	4579200	1,218	0,008838	113,113
-0,360	4838400	1,255	0,009106	109,778

Příloha 3 Naměřené hodnoty creepu pro vzorek č. 3 a výpočty

vzorek č. 3 [mm]	čas [s]	St[mm]	ϵ_t (-)	E_t (MPa)
7,970	0	0,000	0,000000	0,000
7,760	0	0,210	0,001538	1300,401
7,700	30	0,270	0,001978	1011,423
7,682	60	0,288	0,002109	948,209
7,658	120	0,312	0,002285	875,270
7,650	180	0,320	0,002344	853,388
7,625	240	0,345	0,002527	791,548
7,615	300	0,355	0,002600	769,251
7,578	600	0,392	0,002871	696,643
7,555	900	0,415	0,003040	658,034
7,535	1200	0,435	0,003186	627,780
7,520	1500	0,450	0,003296	606,854
7,502	1800	0,468	0,003428	583,513
7,490	2100	0,480	0,003516	568,925
7,475	2400	0,495	0,003625	551,685
7,470	2700	0,500	0,003662	546,168
7,460	3000	0,510	0,003735	535,459
7,450	3300	0,520	0,003809	525,162
7,410	3600	0,560	0,004102	487,650
7,385	5400	0,585	0,004285	466,810
7,348	7200	0,622	0,004556	439,042
7,320	9000	0,650	0,004761	420,129
7,300	10800	0,670	0,004907	407,588
7,278	12600	0,692	0,005068	394,630
7,258	14400	0,712	0,005215	383,545
7,240	16200	0,730	0,005347	374,088
7,222	18000	0,748	0,005479	365,086
7,210	19800	0,760	0,005566	359,321
7,198	21600	0,772	0,005654	353,736
7,170	25200	0,800	0,005859	341,355
7,143	28800	0,827	0,006057	330,211
7,122	32400	0,848	0,006211	322,033
6,922	86400	1,048	0,007676	260,576
6,825	129600	1,145	0,008386	238,501
6,720	172800	1,250	0,009155	218,467
6,560	259200	1,410	0,010327	193,677
6,400	345600	1,570	0,011499	173,939
6,132	604800	1,838	0,013462	148,577
6,000	777600	1,970	0,014429	138,621

5,942	864000	2,028	0,014854	134,657
5,763	1209600	2,207	0,016165	123,735
5,687	1382400	2,283	0,016721	119,616
5,600	1555200	2,370	0,017358	115,225
5,420	1900800	2,550	0,018677	107,092
5,176	2419200	2,794	0,020464	97,739
4,962	3024000	3,008	0,022031	90,786
4,855	3283200	3,115	0,022815	87,667
4,740	3628800	3,230	0,023657	84,546
4,530	4233600	3,440	0,025195	79,385
4,325	4838400	3,645	0,026697	74,920
4,088	5444200	3,882	0,028433	70,346

Příloha 4 Naměřené hodnoty creepu pro vzorek č. 5 a výpočty

vzorek č. 5 [mm]	čas [s]	St[mm]	ϵ_t (-)	E_t (MPa)
6,870	0	0,000	0,000000	0,000
5,890	0	0,980	0,007920	946,639
5,700	30	1,170	0,009456	792,911
5,640	60	1,230	0,009941	754,232
5,590	120	1,280	0,010345	724,770
5,550	180	1,320	0,010668	702,808
5,510	240	1,360	0,010991	682,137
5,478	300	1,392	0,011250	666,455
5,430	600	1,440	0,011638	644,240
5,368	900	1,502	0,012139	617,647
5,312	1200	1,558	0,012592	595,447
5,290	1500	1,580	0,012769	587,156
5,258	1800	1,612	0,013028	575,500
5,228	2100	1,642	0,013270	564,985
5,207	2400	1,663	0,013440	557,851
5,180	2700	1,690	0,013658	548,938
5,162	3000	1,708	0,013804	543,153
5,139	3300	1,731	0,013990	535,936
5,103	3600	1,767	0,014281	525,018
5,035	5400	1,835	0,014830	505,562
4,990	7200	1,880	0,015194	493,461
4,930	9000	1,940	0,015679	478,199
4,850	10800	2,020	0,016325	459,260
4,838	12600	2,032	0,016422	456,548
4,813	14400	2,057	0,016624	450,999
4,762	16200	2,108	0,017037	440,088
4,720	18000	2,150	0,017376	431,491
4,690	19800	2,180	0,017619	425,553
4,678	21600	2,192	0,017716	423,224
4,621	25200	2,249	0,018176	412,497
4,596	28800	2,274	0,018378	407,962
4,238	86400	2,632	0,021272	352,472
4,030	129600	2,840	0,022953	326,657
3,862	172800	3,008	0,024310	308,413
3,568	259200	3,302	0,026686	280,953
3,300	345600	3,570	0,028852	259,862
2,852	604800	4,018	0,032473	230,887
2,642	777600	4,228	0,034170	219,420
2,520	864000	4,350	0,035156	213,266

2,216	1209600	4,654	0,037613	199,335
2,073	1382400	4,797	0,038769	193,393
1,950	1555200	4,920	0,039763	188,558
1,590	1900800	5,280	0,042672	175,702
1,124	2419200	5,746	0,046439	161,452
0,690	3024000	6,180	0,049946	150,114
0,517	3283200	6,353	0,051344	146,026
0,243	3628800	6,627	0,053559	139,989
-0,198	4233600	7,068	0,057123	131,254
-0,220	4838400	7,090	0,057301	130,847

Příloha 5 Naměřené hodnoty creepu pro vzorek č. 7 a výpočty

vzorek č. 7 [mm]	čas [s]	St[mm]	ϵ_t (-)	E_t (MPa)
5,360	0	0,000	0,000000	0,000
4,950	0	0,410	0,003100	644,392
4,850	30	0,510	0,003856	518,041
4,805	60	0,555	0,004196	476,038
4,780	120	0,580	0,004385	455,519
4,748	180	0,612	0,004627	431,701
4,721	240	0,639	0,004831	413,460
4,700	300	0,660	0,004990	400,304
4,650	600	0,710	0,005368	372,114
4,605	900	0,755	0,005708	349,935
4,570	1200	0,790	0,005973	334,431
4,550	1500	0,810	0,006124	326,174
4,530	1800	0,830	0,006275	318,314
4,500	2100	0,860	0,006502	307,210
4,480	2400	0,880	0,006653	300,228
4,460	2700	0,900	0,006804	293,557
4,446	3000	0,914	0,006910	289,060
4,428	3300	0,932	0,007046	283,477
4,400	3600	0,960	0,007258	275,209
4,326	5400	1,034	0,007818	255,513
4,260	7200	1,100	0,008317	240,183
4,212	9000	1,148	0,008679	230,140
4,160	10800	1,200	0,009073	220,167
4,135	12600	1,225	0,009262	215,674
4,100	14400	1,260	0,009526	209,683
4,080	16200	1,280	0,009677	206,407
4,040	18000	1,320	0,009980	200,152
4,018	19800	1,342	0,010146	196,871
4,000	21600	1,360	0,010282	194,265
3,950	25200	1,410	0,010660	187,377
3,900	28800	1,460	0,011038	180,959
3,875	32400	1,485	0,011227	177,913
3,600	86400	1,760	0,013306	150,114
3,224	178200	2,136	0,016149	123,690
2,934	259200	2,426	0,018342	108,904
2,403	518400	2,957	0,022356	89,348
2,178	691200	3,182	0,024057	83,030
2,130	777600	3,230	0,024420	81,796
1,750	1123200	3,610	0,027293	73,186

1,580	1296000	3,780	0,028579	69,894
1,450	1468800	3,910	0,029561	67,571
1,172	1814400	4,188	0,031663	63,085
0,720	2332800	4,640	0,035081	56,940
0,400	2937600	4,960	0,037500	53,266
0,189	3196800	5,171	0,039095	51,093
-0,080	3542400	5,440	0,041129	48,566
-0,400	4147200	5,760	0,043548	45,868
-0,732	4752000	6,092	0,046058	43,368
-1,160	5356800	6,520	0,049294	40,522

Příloha 6 Naměřené hodnoty creepu pro vzorek č. 8 a výpočty

vzorek č. 8 [mm]	čas [s]	St[mm]	ϵ_t (-)	E_t (MPa)
8,920	0	0,000	0,000000	0,000
8,300	0	0,620	0,004613	1083,315
8,170	30	0,750	0,005580	895,540
8,120	60	0,800	0,005952	839,569
8,060	120	0,860	0,006399	780,995
8,030	180	0,890	0,006622	754,669
8,010	240	0,910	0,006771	738,083
7,988	300	0,932	0,006935	720,660
7,922	600	0,998	0,007426	673,001
7,880	900	1,040	0,007738	645,822
7,840	1200	1,080	0,008036	621,903
7,820	1500	1,100	0,008185	610,596
7,796	1800	1,124	0,008363	597,558
7,772	2100	1,148	0,008542	585,066
7,750	2400	1,170	0,008705	574,064
7,734	2700	1,186	0,008824	566,320
7,716	3000	1,204	0,008958	557,853
7,690	3600	1,230	0,009152	546,061
7,611	5400	1,309	0,009740	513,106
7,560	7200	1,360	0,010119	493,864
7,510	9000	1,410	0,010491	476,351
7,478	10800	1,442	0,010729	465,780
7,450	12600	1,470	0,010938	456,908
7,420	14400	1,500	0,011161	447,770
7,400	16200	1,520	0,011310	441,879
7,378	18000	1,542	0,011473	435,574
7,350	19800	1,570	0,011682	427,806
7,320	21600	1,600	0,011905	419,785
7,299	25200	1,621	0,012061	414,346
7,270	28800	1,650	0,012277	407,064
7,245	32400	1,675	0,012463	400,988
6,959	86400	1,961	0,014591	342,507
6,593	178200	2,327	0,017314	288,636
6,299	259200	2,621	0,019501	256,259
5,822	518400	3,098	0,023051	216,803
5,590	691200	3,330	0,024777	201,698
5,500	777600	3,420	0,025446	196,390
5,209	1123200	3,711	0,027612	180,990
5,070	1296000	3,850	0,028646	174,456

4,920	1468800	4,000	0,029762	167,914
4,610	1814400	4,310	0,032068	155,837
4,222	2332800	4,698	0,034955	142,966
3,858	2937600	5,062	0,037664	132,686
3,702	3196800	5,218	0,038824	128,719
3,492	3542400	5,428	0,040387	123,739
3,150	4147200	5,770	0,042932	116,405
2,790	4752000	6,130	0,045610	109,569
2,390	5356800	6,530	0,048586	102,857