

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Katedra technických studií

**Únavové charakteristiky 3D tiskových
kovových materiálů**

bakalářská práce

Autor práce: Karolína Pešková

Vedoucí práce: Ing. Bc. Karel Dvořák, Ph.D.

Jihlava 2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce:	Karolína Pešková
Studijní program:	Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi
Obor:	Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi
Název práce:	Únavové charakteristiky 3D tiskových kovových materiálů
Cíl práce:	Cílem práce je výzkum únavové pevnosti a životnosti 3D tiskových kovových materiálů. Na zkušebních vzorcích z určeného kovového materiálu, vyrobených definovanou aditivní technologií, jsou experimentálními metodami testovány únavové charakteristiky v tahu a krutu. Na základě zpracování a vyhodnocení výsledků měření jsou navrženy příklady aplikací konstrukčních řešení s možností využití aditivních technologií při prototypové, nebo sériové výrobě strojírenských součástí, vystavených při své funkci cyklickému namáhání. U součástí je posouzena perspektiva nasazení aditivních technologií alternativně ke konvenčním výrobním technologiím.

Ing. Bc. Karel Dvořák, Ph.D.
vedoucí bakalářské práce

doc. Ing. Zdeněk Horák, Ph.D.
vedoucí katedry
Katedra technických studií

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o únavových charakteristikách 3D tiskových kovových materiálů, konkrétně je zaměřena na slitinu hliníku AlSi₁₀Mg. Z tohoto materiálu jsou 3D tiskovou technologií Direct Metal Laser Sintering (DMLS) vyrobeny tři skupiny vzorků. Zkoumané skupiny vzorků se rozdělují podle natočení modelu vůči základně při tisku na vzorky s orientací 0 °, 45 ° a 90 °. Tyto vzorky jsou zatěžovány nejprve statickým namáháním na tah a krut, a poté je vzorek, který je vyhodnocený jako nejvhodnější, zatěžován na tah a na krut cyklickým namáháním. Na základě vyhodnocení výsledků experimentů je navrženo konstrukční řešení s využitím získaných výsledků.

Klíčová slova

3D tisk kovu; aditivní výroba; DMLS; AlSi₁₀Mg; cyklické zatěžování;

Abstract

This Bachelor's thesis deals with fatigue characteristics of metallic 3D printing materials, namely aluminium alloy AlSi₁₀Mg. Samples are made utilizing the DMLS 3D printing method. Samples are sorted into three sections according to the rotation against the printing bed, specifically 0 °, 45 ° and 90 °. These specimens are subjected to static tensile and torsional stress and then the specimen, evaluated as the most suitable, is subjected to tensile and torsional loads by cyclic stresses. According to results of the cyclic experiment constructional solution is designed.

Key words

Metallic 3D printing; additive production; DMLS; AlSi₁₀Mg; cyclic loading

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Souhlasím s umístěním bakalářské práce v knihovně VŠPJ a s jejím užitím k výuce nebo k vlastní vnitřní potřebě VŠPJ.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje AZ, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výtěku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

V Jihlavě dne 27. dubna 2020

.....

Podpis studentky

Poděkování

Především děkuji vedoucímu práce Ing. Bc. Karlovi Dvořákovi, Ph.D. za pomoc při měření v laboratoři a za odborné vedení při vypracování bakalářské práce. Ráda bych také poděkovala mojí rodině za podporu a trpělivost.

Obsah

Úvod.....	12
Motivace.....	13
Cíl práce	13
1 3D tisk.....	14
1.1 Druhy 3D tisku	16
1.2 Pevné a viskózní materiály – technologie FDM	17
1.3 Kapaln� materiály – technologie SLA.....	18
1.4 Pr�skov� materiály – technologie DMLS	18
1.5 Využití kovového 3D tisku	20
2 Mechanické vlastnosti materiálu	21
2.1 Statick� zkouška tahem.....	23
2.2 Statick� zkouška krutem	24
2.3 Kombinovan� namáhání	26
2.4 Tahov� diagram.....	26
3 Dynamick� zat�eov�n�	31
3.1 Cyklick� zat�eov�n�.....	32
3.2 Wöhlerova křivka	34
4 Testovan� materiál	37
4.1 Hliník a jeho slitiny	37
4.2 Materiál AlSi ₁₀ Mg	37
5 Postup měření.....	39
5.1 Popis vzorků.....	39
5.2 Zařizování pro měření	40
5.3 Popis připravov� měření.....	40
5.4 Průběh měření	41
5.5 Statick� zkouška	42

5.5.1	Tah.....	42
5.5.2	Krut.....	45
5.5.3	Vyhodnocení statické zkoušky.....	48
5.6	Cyklická zkouška.....	48
5.6.1	Tah.....	48
5.6.2	Krut.....	51
6	Příklad konstrukčního řešení.....	53
7	Diskuse.....	54
8	Doporučení pro praxi.....	55
	Závěr.....	56
	Zdroje.....	57
	Přílohy.....	59

Seznam obrázků

Obrázek 1 Vnitřní struktura tištěných částí [2]	14
Obrázek 2 Tisk s rozpustitelnými podpěrami [3]	15
Obrázek 3 Model zbaven podpěr [3]	15
Obrázek 4 Kombinace materiálů pro podpěry [4]	16
Obrázek 5 Schéma technologie FDM [9].....	17
Obrázek 6 Schéma technologie SLA [10].....	18
Obrázek 7 Schéma technologie DMLS [11]	19
Obrázek 8 Znázornění zkoušky krutem	24
Obrázek 9 Rozložení síly a momentů	26
Obrázek 10 Tahový diagram s výraznou mezí kluzu.....	27
Obrázek 11 Výrazná mez kluzu.....	28
Obrázek 12 Porovnání tahových diagramů	29
Obrázek 13 Určení smluvní meze kluzu	29
Obrázek 14 Únavový proces	31
Obrázek 15 Amplituda napětí.....	33
Obrázek 16 Druhy cyklického zatěžování	34
Obrázek 17 S–N křivka v logaritmických souřadnicích	34
Obrázek 18 Popis Wöhlerovy křivky.....	35
Obrázek 19 Znázornění orientace tisku vzorku.....	39
Obrázek 20 Přetržený vzorek	42
Obrázek 21 Tahový diagram pro tah	43
Obrázek 22 Tahový diagram vzorku s orientací 0 °	44
Obrázek 23 Tahový diagram vzorku s orientací 45 °	44
Obrázek 24 Tahový diagram vzorku s orientací 90 °	44
Obrázek 25 Pohyb čelisti při statické zkoušce na krut	45
Obrázek 26 Ukroucený vzorek.....	45
Obrázek 27 Tahový diagram pro krut.....	46
Obrázek 28 Tahový diagram vzorku v krutu s orientací 0 °	47
Obrázek 29 Tahový diagram vzorku v krutu s orientací 45 °	47
Obrázek 30 Tahový diagram vzorku v krutu s orientací 90 °	47
Obrázek 31 Cyklické zatěžování míjivé	49
Obrázek 32 Wöhlerova křivka pro vzorek 45 ° v tahu	50

Obrázek 33 Cyklické zatěžování střídavé souměrné	51
Obrázek 34 Wöhlerova křivka pro vzorek 45 ° v krutu	52
Obrázek 35 Osa s ozubením	53

Seznam tabulek

Tabulka 1 Vlastnosti čistého hliníku [20]	37
Tabulka 2 Vlastnosti AlSi10Mg [22].....	38
Tabulka 3 Výsledky statické zkoušky v tahu	43
Tabulka 4 Výsledky statické zkoušky v krutu.....	46
Tabulka 5 Výsledky cyklické zkoušky v tahu.....	49
Tabulka 6 Výsledky cyklické zkoušky v krutu	52

Seznam použitých zkratek a označení

Zkratka	Popis	Jednotky
3D	3 Dimensional	
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	
CAD	Computer Aided Design	
.stl	Stereolithography	
FDM	Fused Deposition Modeling	
SLA	Steleografie	
UV	Ultrafialové (záření)	
PBF	Powder Bed Fusion	
SLS	Selective Laser Sintering	
ČSN EN	Státní technická norma ČR převzatá z Evropské normy	
ε	Poměrná deformace	[-]
L	Okamžitá délka tělesa	[mm]
L_0	Počáteční měřená délka	[mm]
ΔL	Prodloužení tělesa	[mm]
σ	Normálové napětí	[MPa]
F	Vnější zatížení	[N]
S_0	Počáteční průřez tělesa	[mm ²]
A	Tažnost	[%]
Z	Kontrakce	[%]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
d_0	Počáteční průměr	[mm]
M_k, M_x	Kroutící moment	[Nm]

D, d	Průměr	[mm]
φ	Úhel zkroucení	[°]
τ_k	Smykové napětí	[MPa]
W_k	Modul průřezu v krutu	[mm ³]
ϑ	Poměrné zkroucení	[°/mm]
σ_u	Mez úměrnosti	[MPa]
σ_E	Mez pružnosti	[MPa]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
R_{eH}	Horní mez kluzu	[MPa]
R_{eL}	Dolní mez kluzu	[MPa]
R_p	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
ΔL_g	Rovnoměrné prodloužení	[mm]
ΔL_u	Celkové poměrné prodloužení	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu, Youngův modul	[MPa]
N	Počet cyklů při cyklickém zatěžování	[-]
σ_h	Maximální napětí při cyklickém zatěžování	[MPa]
σ_d	Minimální napětí při cyklickém zatěžování	[MPa]
σ_m	Střední napětí	[MPa]
σ_a	Amplituda napětí	[MPa]
$\Delta\sigma$	Rozkmit napětí	[MPa]
R	Koeficient asymetrie	[-]
f	Frekvence	[Hz]
T	Časová perioda	[s]
σ_c	Mez únavy materiálu	[MPa]

Úvod

Práce se zabývá stanovením únavových vlastností kovového materiálu $AlSi_{10}Mg$, který je vytištěn na 3D tiskárně tzv. aditivní technologií. 3D tisk prošel velkým vývojem. Původní polymery v dnešní době doplnilo mnoho dalších materiálů pro 3D tisk, mimo jiné i kovových.

Kovové materiály nejsou vhodné pro všechny druhy 3D tisku. Při tisku z kovových materiálů se používá laser, který roztaví kovový materiál ve formě prášku a spojí ho do vrstvy. Takto spojená vrstva se působením tepla přitaví ke stávající vrstvě a tímto způsobem dojde k vytištění kovové součásti.

Využití 3D vytištěných modelů jako strojních součástí je ovlivněno problematikou únavy materiálu. Při opakovaném namáhání je k porušení materiálu zapotřebí menší síla, než je potřeba při jednorázovém působení síly. Při použití v praxi je tištěná součást zatěžována namáháním s určitým průběhem, které kvůli nepředvídatelným výkyvům nelze naprosto přesně určit. Z tohoto důvodu je tento komplikovaný průběh namáhání při laboratorním zatěžování zkušebních těles nahrazen zjednodušeným namáháním s průběhem sinusoidy. Laboratorní měření se provádí za účelem stanovení specifických vlastností pro návrh tištěné součásti.

V této práci je zkoumán vliv orientace 3D tisku na výsledné mechanické vlastnosti tištěné součásti. Mechanické vlastnosti jsou zkoumány dvěma způsoby namáhání, a to namáháním v tahu a namáháním v krutu. Tyto dva způsoby namáhání lze za pomoci vzorců zkombinovat a získat kombinované namáhání ve variantě tah a krut, které se v praxi často vyskytuje. Reálné namáhání součásti při používání je nahrazeno v laboratorních podmínkách statickou a dynamickou zkouškou, kdy je statická i dynamická zkouška prováděna se zatěžováním v tahu i v krutu.

Práce je rozdělena na 5 hlavních částí. První část pojednává o 3D tisku, jeho využití a druzích 3D tisku, které jsou pro tuto práci nejvýznamnější. V druhé části jsou popsány mechanické vlastnosti materiálů a statická zkouška. Třetí část je věnována dynamickému cyklickému zatěžování a pojednává o Wöhlerově křivce. Čtvrtá část obsahuje popis vlastností hliníkových slitin a také konkrétního zkoušeného materiálu. V páté části jsou popsány postupy prováděných zkoušek, zpracování a vyhodnocení výsledků.

Motivace

Motivací této práce je ověření využitelnosti kovového 3D tisku metodou DMLS jako alternativy k zažitým technologiím. Při výrobě je kladen důraz na úspory, a proto je žádoucí implementovat 3D tisk. Pro jeho implementaci je však nutné ověřit mechanické vlastnosti součástí vyrobených touto technologií, protože vzorky vyrobené odlišnými technologiemi mohou mít rozdílné mechanické vlastnosti.

Další motivací je posun znalostí v oboru, kdy nové poznatky umožní širší využití 3D technologie v průmyslové výrobě a tím i finanční a časové úspory.

Osobní motivací je možnost využití znalostí získaných během studia, stejně tak jako využití zkušebních kapacit dostupných na Katedře technických studií.

Cíl práce

Cílem práce je výzkum únavové pevnosti a životnosti 3D tiskových kovových materiálů. Na zkušebních vzorcích z kovového materiálu $AlSi_{10}Mg$, vyrobených aditivní technologií DMLS, jsou experimentálními metodami testovány únavové charakteristiky v tahu a krutu. Na základě zpracování a vyhodnocení výsledků měření je navržen příklad aplikace konstrukčního řešení s možností využití aditivních technologií při prototypové, nebo sériové výrobě strojírenských součástí, vystavených při své funkci cyklickému namáhání. U součástí je posouzeno využití aditivních technologií alternativně ke konvenčním výrobním technologiím.

1 3D tisk

Všechny druhy 3D tisku pracují s podobným principem technologií výroby 3D modelů, kdy se k sobě materiál spojuje nebo vytvrzuje po vrstvách. V porovnání s konvenční metodou třískového obrábění se jedná o inverzní operaci. Namísto ubírání materiálu třískovým obráběním (například soustružením, frézováním, vrtáním nebo broušením, případně dalšími), se materiál ve vrstvách přidává a jedná se tedy o aditivní metodu. [2]

Pro přípravu tisku se využívá program doporučený výrobcem tiskárny, který se používá pro specifikaci parametrů 3D tisku. Tento program má také za úkol rozdělit 3D model na jednotlivé vrstvy. Samotný tisk pak probíhá v těchto vrstvách, které se k sobě postupně spojují. [2]

Program pro tisk slouží také pro úpravu vnitřní struktury modelu. V případě tisku objemných dílů je zapotřebí velké množství materiálu, takovýto tisk je časově náročný a výsledný díl má velkou hmotnost. Pro tyto případy program umožňuje vnitřní výplň nahradit geometrickou strukturou, díky které dochází k úspoře materiálu, času a snížení výsledné hmotnosti.

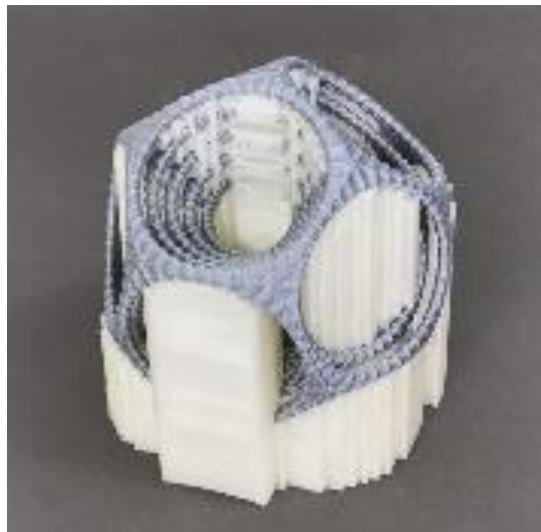


Obrázek 1 Vnitřní struktura tištěných částí [2]

Před samotným tiskem je potřeba vytvořit 3D model v CAD softwaru. Následně se model vyexportuje nejčastěji ve formátu *.stl, který je kompatibilní s většinou tiskáren dostupných na dnešním trhu. [2]

V případě tisku geometricky náročných objektů, kdy není možné vybrat orientaci tisku umožňující dostatečně kvalitní tisk a dosažení potřebných vlastností výsledného modelu, se používají podpěry. Zmíněné podpěry se také používají při tisku objektů, které se rozšiřují pod úhlem větším než 45° , anebo v případě, kdy se jednotlivé objekty přemosťují na vzdálenost větší než 2 mm. Pro představu se jedná o převisy či mosty. Podpěry se tisknou zároveň s objektem a po ukončení tisku jsou odstraněny. [2]

Podpěry je možné tisknout ze stejného materiálu jako díl a poté je odlomit. Případné zbytky podpěr je následně možné začistit. Dále lze využít podpěry rozpustitelné ve vodě, které nezanechávají zbytky a po rozpuštění není jejich použití na výsledném dílu znatelné. Na obrázku 2 je vytištěný model s podpěrami z rozpustitelného materiálu a na obrázku 3 je již model těchto podpěr zbaven. [3]



Obrázek 2 Tisk s rozpustitelnými podpěrami [3]



Obrázek 3 Model zbaven podpěr [3]

Možnou úspornější variantou je využít dražší rozpustitelný materiál pouze v místě kontaktu podpěr s modelem. Příklad využití je uveden na obrázku 4. [4]



Obrázek 4 Kombinace materiálů pro podpěry [4]

Aditivní technologie umožňují zjednodušit výrobu jinak obtížně vyrobitelných součástí, obtížným prvkem jsou například volné tvary. Volné tvary je možné vyrobit například obráběním, ovšem za náročnějších podmínek. Je pro to zapotřebí víceosý stroj a další speciální nástroje. Další možnost je odlévání volných tvarů, pro které je zapotřebí forma na odlévání, která je ovšem nákladná a její výroba se vyplatí pouze v případě velkého objemu výroby.

Využití aditivních technologií je výhodné při tvorbě prototypů, kdy je možné odstranit vady, ověřit smontovatelnost či jiné požadavky na díl, a teprve následně začít vyrábět přípravky, nástroje nebo formy. Takovéto využití snižuje také časovou náročnost vývoje a výroby prototypů. Dále najdou uplatnění při kusové a malosériové výrobě, kdy cena potřebných nástrojů může významně navýšit cenu výsledných dílů. [4]

V současné době se 3D tisk využívá zejména ve strojírenství, automobilovém nebo leteckém průmyslu. Najde využití v široké škále aplikací, konkrétně byl použit například pro výrobu umělé srdeční pumpy, šperků, oční rohovky, raketového motoru, nebo ocelového mostu v Amsterdamu. [1]

Aditivní technologie prochází v posledním desetiletí velkým rozvojem. Dostaly se do povědomí široké veřejnosti nejen pro její technické využití, ale je i díky tomu, že jsou dnes již cenově dostupnější.

1.1 Druhy 3D tisku

Technologie 3D tisku lze aplikovat v širokém spektru druhů tisku a pro jednodušší orientaci je lze rozdělit podle vstupních materiálů, ze kterých jsou objekty tištěny.

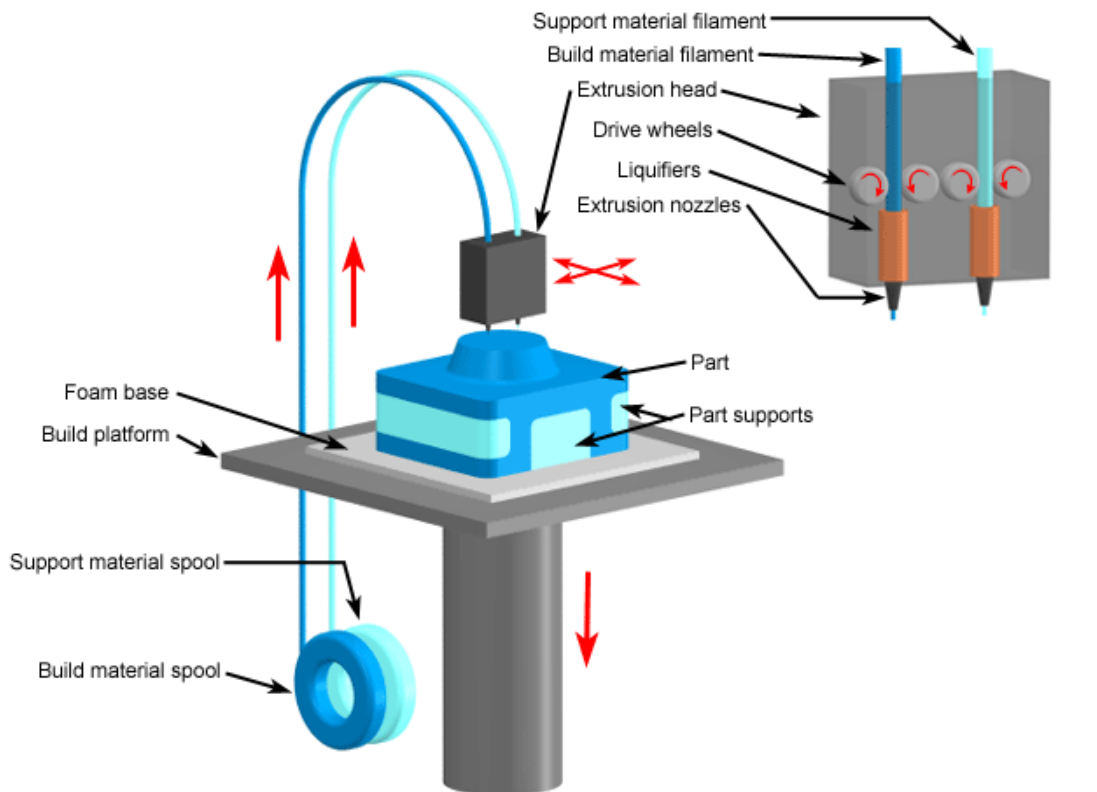
Rozdělení dle materiálu:

- pevné a viskózní
- kapalné
- práškové

V následujících kapitolách budou popsány příklady pro jednotlivé druhy tisku dle vstupního materiálu a vzhledem k zaměření práce bude podrobněji pojednáno o práškovém druhu tisku – technologii DMLS.

1.2 Pevné a viskózní materiály – technologie FDM

Pro domácí tiskárny se využívá převážně technologie Fused Deposition Modeling. Technologie spočívá v nanášení vrstev termoplastu tryskou. Materiál tvaru drátu je namotán na cívce, ze které je postupně odmotáván a nahřátou tryskou je taven do tekutého stavu. Následně je tryskou vytlačován při pohybu po osách X a Y, pohyb v ose Z zajišťuje posuvné lože, které se posouvá o výšku tištěné vrstvy. Princip je znázorněn na obrázku 5. Materiál rychle tuhne a tisk se obvykle provádí při pokojové teplotě. Jedná se o nejznámější a nejčastěji používanou technologii, která představuje více než polovinu trhu s 3D tiskárnami. [5][6]



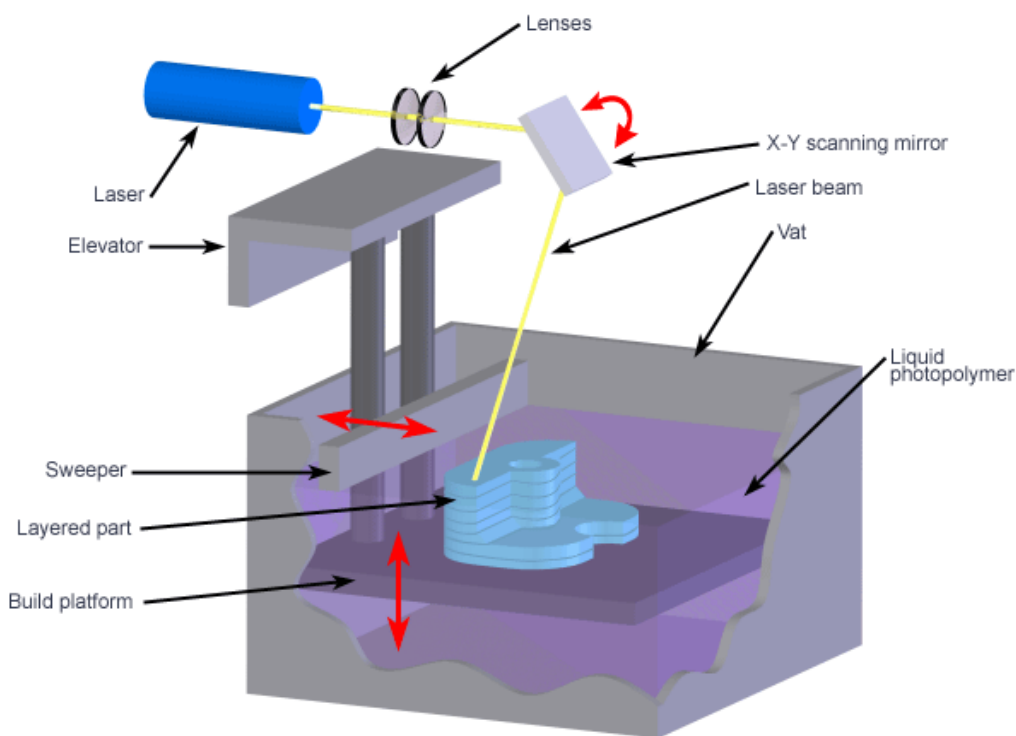
Copyright © 2008 CustomPartNet

Obrázek 5 Schéma technologie FDM [9]

1.3 Kapaln  materiály – technologie SLA

Stereolitografie umožňuje tisk vysoce přesných modelů za pomoci koncentrovaného paprsku UV laseru. Tisk probíhá v n dob  napln n  tekut m fotopolymerem. UV laser vykreslí pr rez aktu ln  vrstvy tištěného modelu, čímž dojde k vytvrzen  dan  vrstvy. Následně je nutn  automatickou st rkou vyhladit nerovnosti před aplikací dal  vrstvy. Poté se stavebn  platforma posune o výšku ti t n  vrstvy a proces se opakuje. [10]

Po ukončení tisku je model vysunut nad hladinu a odebrán ze stavebn  platformy. Vyt t n  model se n sledn  o ist  od zbytku fotopolymeru a odstraní se pomocn  podpěry. V posledním kroku je mo n  model vyleštit, obrousit, nebo jinak upravit jeho finální povrch. Pro zlepšení mechanických vlastností je mo n  model n sledn  vytvrdit v UV peci. [10]



Copyright © 2008 CustomPartNet

Obrázek 6 Schéma technologie SLA [10]

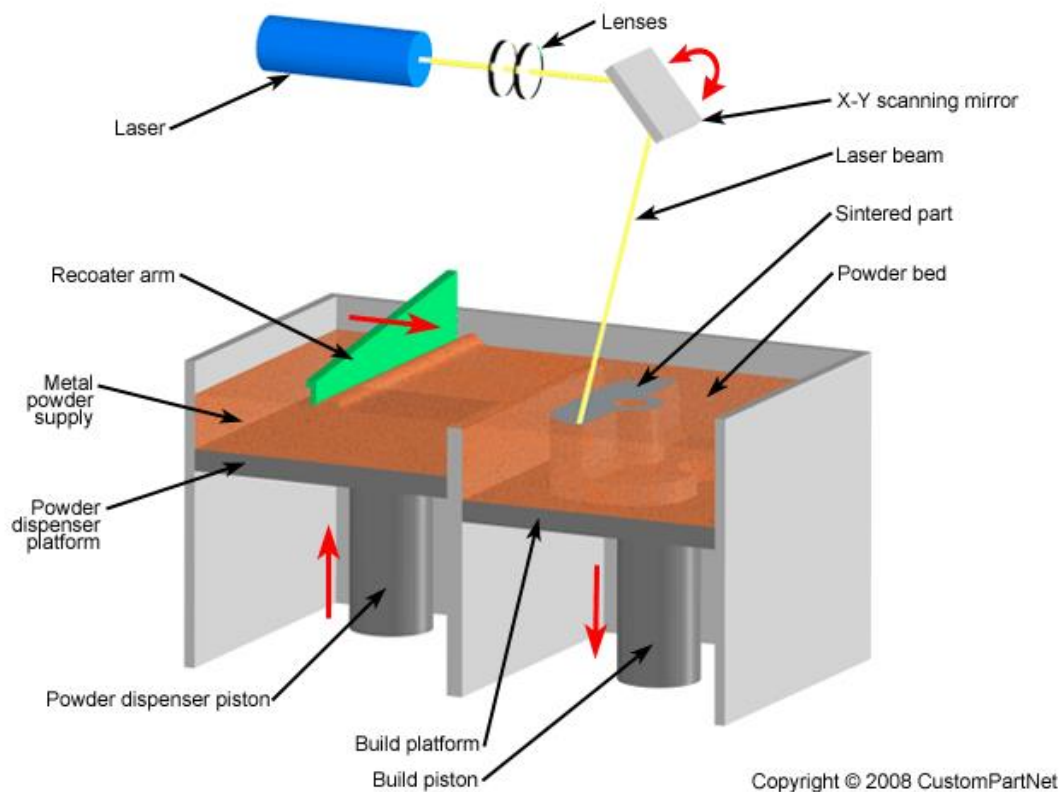
1.4 Pr skov  materiály – technologie DMLS

Pr skov  technologie 3D tisku neboli PBF Powder Bed Fusion se vyu iv  pro polymerní a kovov  materiály. Uplatn n  nachází zejména u kovových materiálu a jako p r klad je dále popsána metoda DMLS Direct Metal Laser Sintering. [7]

U technologie DMLS je využívána komora, která se před začátkem tisku naplní inertním plynem, nejčastěji argonem, ale je možné použít i dusík. Inertní plyn vytváří ochrannou atmosféru a zabraňuje tak nežádoucím chemickým reakcím, které by mohli poškodit tištěný objekt. Absence inertního plynu by mohla způsobit například korozi materiálu. [7]

V dalším kroku je nutné komoru zahřát na provozní teplotu. Následně se rozprostře tenká vrstva kovového prášku po pracovní desce, která je umístěna v komoře. Poté je možné zahájit spékání práškových zrn za pomoci vysoce výkonného laseru. Tento laser vykreslí průřez tištěného objektu a roztaví materiál v daném místě. Tímto procesem dojde k vytvoření první vrstvy. V dalším kroku dochází ke snížení pracovní desky o výšku tištěné vrstvy. V následném kroku je na tuto vrstvu rozhrnuta další vrstva práškového materiálu a celý proces se opakuje. [7] [8]

Technologie DMLS vychází ze starší technologie SLS Selective Laser Sintering, kdy je práškový materiál také spékán stejným způsobem, rozdíl je však v síle paprsku laseru. DMLS je oproti SLS určen pro kovový materiál, a proto musí vyvinout podstatně větší teplotu. Dalším rozdílem je, že technologie SLS při tisku nevyužívá ochrannou atmosféru. [8]



Obrázek 7 Schéma technologie DMLS [11]

1.5 Využití kovového 3D tisku

Při konvenčním zpracování kovových materiálů existují určitá omezení odvíjející se od použitého typu zpracování. Ačkoliv jsou výrobky zhotoveny 3D tiskem po vrstvách, tak nepodléhají téměř žádnému omezení zpracovatelnosti, což umožňuje vytvořit složitější design, který není možné vyrobit konvenčními metodami anebo pouze velmi náročně. Díky výpočtům nákladů na základě objemu je možné experimentovat s komplexnějšími tvary k dosažení optimálního funkčního designu, to by podle klasických kalkulací nákladu nebylo možné. [12]

Na rozdíl od konvenčních metod, 3D tisk nevyžaduje žádné dodatečné nástroje během výroby a díky tomu nezáleží na času spuštění tisku, ani na celkovém množství kusů výroby nebo počtu konstrukčních variací. Nejsou zapotřebí velké zásoby materiálu a konstrukční úpravy je možné aplikovat bez zbytečných prodlev. [12]

Kovový 3D tisk lze využít pro výrobu chladičů, které se vyrábějí s co největší plochou povrchu, jsou přidávány chladicí žebra, či jiné výstupky. Technologie 3D tisku umožňuje vytvořit velmi tenké a geometricky náročné tvary, které optimálně využijí dostupný prostor. [12]

Při distribuci náhradních dílů nelze předvídat poptávku konkrétních dílů na konkrétním místě a dlouhodobé skladování takových částí není ekonomicky výhodné. Na poptávku lze pružně reagovat tiskem dílu v konkrétním místě při potřebě skladovat pouze základní materiál pro tisk. [12]

Zpracování potravin často vyžaduje speciální díly, například specifické trychtýře, prvky pro posuvné pásy a posun potravin, nebo prvky třídících mechanismů. Cena takových dílů se při malosériové výrobě projeví zvýšením nákladů. Oproti tomu výrobní náklady 3D tisku se neodvíjí od objemu série, a tudíž to je způsob, jak snížit tyto náklady.[12]

2 Mechanické vlastnosti materiálu

Mechanické vlastnosti materiálu určují jeho reakci na vnější namáhání a dají se tedy využít pro predikci chování objektů nebo konstrukcí, které jsou tomuto namáhání vystaveny. Mechanické vlastnosti materiálu se odvíjí také od způsobu technologického zpracování, tzn. že vzorky vyrobené ze stejného materiálu, ale rozdílným technologickým zpracováním mohou mít jiné mechanické vlastnosti. Např. u vzorků vyrobených metodou DMLS lze očekávat jiné mechanické vlastnosti než u vzorků vyrobených třískovým obráběním.

Mezi mechanické vlastnosti patří:

- pružnost
- pevnost
- tvárnost
- houževnatost
- tvrdost

[13]

Pružnost neboli elasticita, popisuje jak moc se materiál elasticky deformuje, než dojde k trvalé deformaci. Po odstranění síly se materiál vrátí do původního stavu.

Pevnost určuje odolnost proti trvalému porušení struktury.

Tvárnost neboli plasticita, popisuje jak moc se materiál plasticky deformuje, než dojde k porušení materiálu. Po odstranění síly zůstane materiál ve zdeformovaném stavu.

Houževnatost je odolnost materiálu proti porušení. S větší houževnatostí materiálu je zapotřebí silnější působení síly pro vznik deformací nebo porušení.

Tvrdost definuje odpor materiálu vůči vnikání cizího tělesa

Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny vnitřními a vnějšími faktory. [13]

Mezi vnitřní faktory patří:

- chemické složení
- chemická heterogenita
- struktura a strukturní heterogenita
- velikost a tvar tělesa
- konstrukční vruby (koncentrují napětí),
- vady (trhliny, vměstky...)
- stav povrchu

Mezi vnější faktory patří:

- teplota
- rychlost deformace
- druh zatěžování
- okolní prostředí [13]

Pro zjištění mechanických vlastností materiálu se využívají zkoušky, jejichž výsledky určují výše zmíněné vlastnosti.

Mechanické vlastnosti se zkoumají s ohledem na způsob zatěžování v tahu, tlaku, ohybu, smyku, krutu anebo střihu. Mezi nejběžnější zkoušky mechanických vlastností patří následující zkoušky.

Zkoušky mechanických vlastností:

- statické
- tvrdosti
- rázem v ohybu
- únavové zkoušky [14]

V této kapitole jsou uvedeny všechny mechanické vlastnosti materiálů, ale pro účel této práce a základní zhodnocení vlastností vzorků vyrobených technologií DMLS, budou v praktické části zkoumány mechanické vlastnosti zaměřené na tah a kruh.

2.1 Statická zkouška tahem

Pokud na těleso působí vnější síla, těleso se deformuje. Proti této deformaci působí vnitřní síly v tělese a tím vzniká vnitřní napětí.

Deformace neboli změna tvaru tělesa, je určena poměrnou deformací ε , která je definována následující rovnicí. [13]

$$\varepsilon = \frac{(L - L_0)}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

ε – poměrná deformace, L – okamžitá délka tělesa [mm], L_0 – počáteční měřená délka [mm], ΔL – prodloužení tělesa [mm].

Vnitřní síly, které vznikají jako reakce na deformaci, lze určit vztahem 2. Pro zmínění vztah platí podmínka, že se jedná o hladké válcové těleso, a tudíž je napětí rozloženo rovnoměrně po průřezu. [13]

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2)$$

σ – normálové napětí [MPa], F – vnější zatížení [N],

S_0 – počáteční průřez tělesa [mm²].

Z výsledků zkoušky tahem se stanoví tahový diagram, podle kterého lze určit mez kluzu R_e a mez pevnosti R_m . Podle měření přetržených zkušebních vzorků je možné určit také tažnost A a kontrakci Z .

Vzorky používané pro zkoušku tahem jsou v podobě zkušebních tyčí, které jsou nejčastěji kruhového, nebo obdélníkového průřezu. Zkušební tyče se rozdělují podle způsobu, kterým jsou upínány do stroje vykonávající zkoušku, nebo podle tvaru vzorku.

Tvar zkušebních tyčí předepisuje norma ČSN EN ISO 6892-1:2017. Válcové tyče rozděljuje na tyče dlouhé, jejichž délka se rovná desetinásobku jejich průměru (viz následující rovnice), a krátké, jejichž délka se rovná pětinasobku jejich průměru. [13]

$$L_0 = 10 \cdot d_0 \quad (3)$$

Pro obdélníkové tyče platí odvození od kruhových tyčí se stejnou plochou průřezu. Pro délku dlouhé ploché zkušební tyče platí vzorec 4.

$$L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0} \quad (4)$$

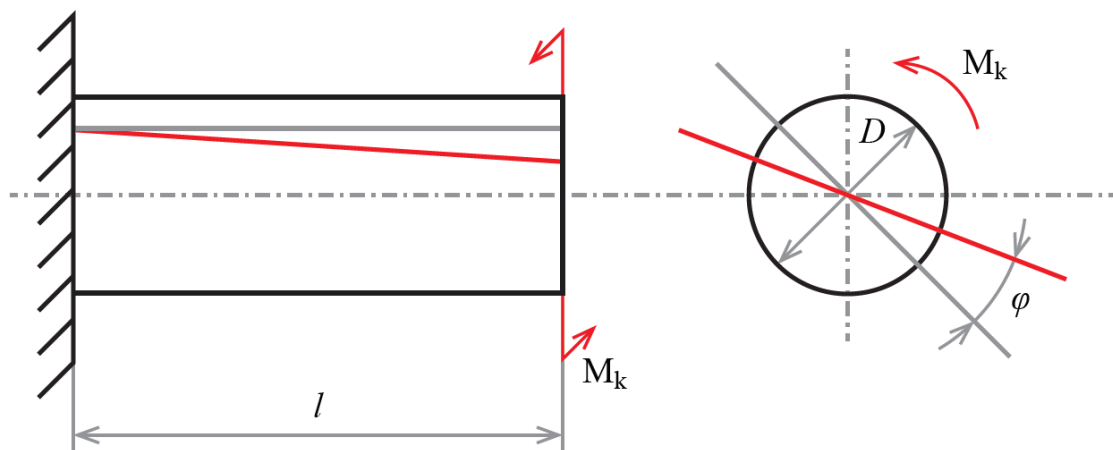
Délka krátké ploché zkušební tyče je určena vztahem 5.

$$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0} \quad (5)$$

Pro zkoušky tahem se využívají univerzální trhací stroje, které lze kromě tahové zkoušky využít i pro zkoušky tlakem, krutem, ohybem, stříhem nebo smykem. Zkušební stroje jsou omezeny rozsahem síly, kterou dokážou vyvinout na zkušební vzorek. Největší rozsah, kterého je schopen zkušební stroj dosáhnout je až 2 000 kN. [13]

Pro měření velmi malých deformací se používají extenzometry neboli průtahoměry. Průtahoměr se připevní ke zkušebnímu vzorku před zahájením zkoušky. Průtahoměry lze rozdělit na několik typů: extenzometry mechanické, opticko-mechanické (např. Martensův zrcátkový průtahoměr), optické a elektrické. Elektrické lze dále rozdělit na kapacitní, indukční a tenzometrické. Nejvyužívanější jsou průtahoměry elektrické, konkrétně indukční a tenzometrické, díky schopnosti pořizovat velmi přesné záznamy až 1 000 násobně zvětšené. Optické extenzometry mají tu výhodu, že jsou bezkontaktní a nehrozí tedy jejich poškození při měření, také umožňují přesnější zaznamenání měřených hodnot. [13]

2.2 Statická zkouška krutem



Obrázek 8 Znárodnění zkoušky krutem

M_k – kroučící moment [Nm], D – průměr [mm], φ – úhel zkroucení [°]

Účelem statické zkoušky v krutu je zjistit pevnost materiálu při kroucení. Namáhání na krut jsou velmi často vystavovány součásti, které přenášejí rotační pohyb, jedná se hlavně o hřídele. Pro korektní zkoušku na krut je nutné, aby byl vzorek

kruhového nebo mezikruhového průřezu. Jeden konec vzorku je upnut v pevných čelistech, zatímco druhý konec je upnut do pohyblivých čelistí a začne na něj působit zvětšující se kroutící moment. Působící kroutící moment způsobuje natočení průřezu vůči původní poloze, tento stav je znázorněn na obrázku 8. Při zkoušce se zjišťuje mez pevnosti v krutu, kterou lze určit pomocí vzorce 6,

$$\tau_{Pk} = \frac{M_{k \max}}{W_k} \quad (6)$$

kde τ_{Pk} – Mez pevnosti v krutu, $M_{k \max}$ – maximální kroutící moment, při kterém dochází k přerušení vzorku. W_k – modul průřezu v krutu [mm³] pro kruhový průřez se určí podle vzorce 7. [15]

$$W_k = \frac{\pi d^3}{16} \quad (7)$$

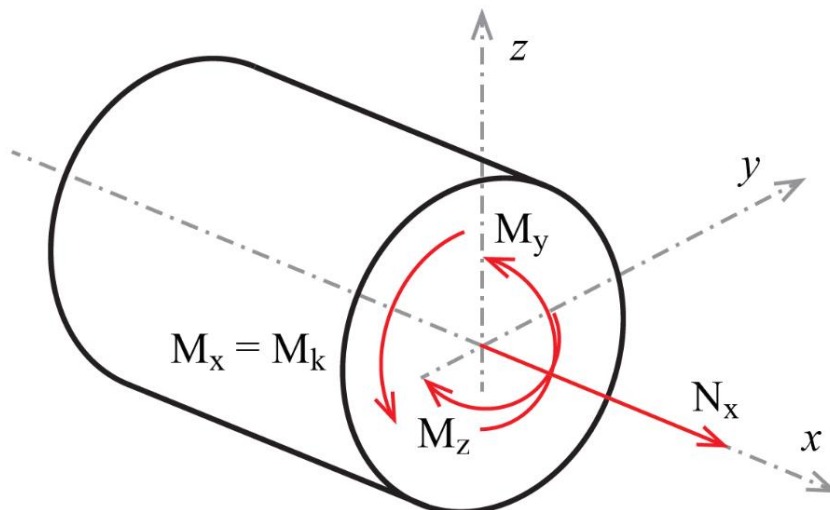
Dále lze při zkoušce na krut kromě meze pevnosti zjistit poměrné zkroucení čili dosažitelnou deformaci.

$$\vartheta = \frac{\varphi}{l} \quad (8)$$

kde ϑ je poměrné zkroucení, φ je úhel, o který byl působením kroutícího momentu, v délce l , pootočen průřez na konci vzorku vůči průřezu na protějším konci, který byl napevno upnut. [15]

2.3 Kombinované namáhání

Vnější síly působící na těleso způsobují v jeho průřezu vznik vnitřních sil. Tyto síly lze rozložit na jednotlivé složky ve směru pravoúhlé soustavy souřadnic s počátkem v ose prutu (či těžiště průřezu). Znázorněno na následujícím obrázku.



Obrázek 9 Rozložení síly a momentů

Vnitřní síly jsou rozdělovány dle směru, ve kterém působí na průřez zkušebního prutu. Zatěžováním v ose x vzniká normálová síla N_x , při ohybu vznikají momenty M_y a M_z a při namáhání na krut jsou iniciovány kroučící momenty M_x a M_k .

V této práci se pojednává o namáhání na tah a na krut, a proto je relevantní rozepsat pouze kombinaci tahu a krutu. Vzorce pro výpočet těchto napětí jsou uvedeny v kapitolách 2.1 a 2.2, konkrétně vzorce 2 a 6.

Z normálového napětí a smykového napětí lze podle následujícího vzorce vypočítat redukované napětí.

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + (\alpha \cdot \tau)^2} \quad (9)$$

σ – normálové napětí, τ – smykové napětí a podle Guestovi podmínky $\alpha = 2$

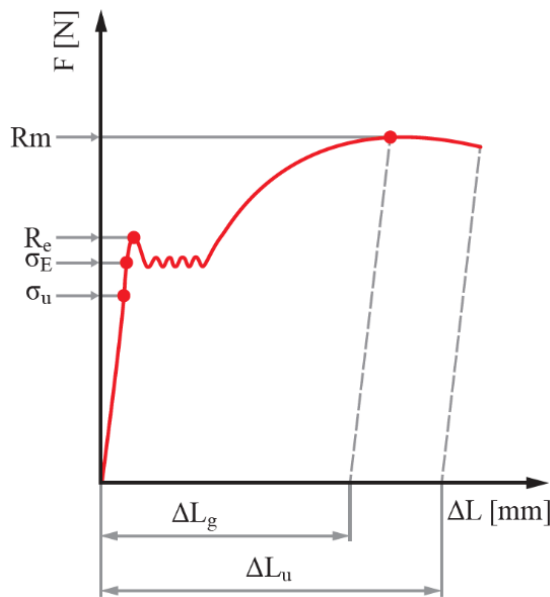
[23] [24]

2.4 Tahový diagram

Během zkoušky tahem je zkušební těleso upnuto v čelistech a zatěžováno ve směru osy pomalu rostoucí silou, až dokud nedojde k přetržení tělesa. V průběhu zkoušky je sledována závislost mezi působící silou F a prodloužením tělesa ΔL . Na základě průběhu této závislosti je následně možné vytvořit tahový diagram.

Za použití vzorců 1 (Vzorec poměrné deformace) a 2 (Vzorec vnitřní síly), lze využít závislost smluvního napětí σ na síle F a poměrné deformace ε na prodloužení ΔL . Následně při zkoušce jednoosým tahem lze přepočtem získat ze závislosti $F - \Delta L$, závislost $\sigma - \varepsilon$, která se využívá v technické praxi. [14]

Podle průběhu tahového diagramu lze určit mez úměrnosti σ_u , mez pružnosti σ_E , mez kluzu R_e nebo smluvní mez kluzu R_p a mez pevnosti R_m . Dále největší rovnoměrné prodloužení ΔL_g a celkové poměrné prodloužení ΔL_u . Jednotlivé veličiny jsou zobrazeny na obrázku 10.



Obrázek 10 Tahový diagram s výraznou mezí kluzu

Mez úměrnosti σ_u

Do dosažení meze úměrnosti je deformace přímo úměrná napětí, platí zde Hookův zákon (vzorec 9), a tudíž lze až do této hodnoty napětí tahový diagram aproximovat přímkou, nad mezí úměrnosti již Hookův zákon uplatnit nelze.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (9)$$

σ – napětí [MPa], E – modul pružnosti v tahu [MPa],

ε – poměrné prodloužení [-].

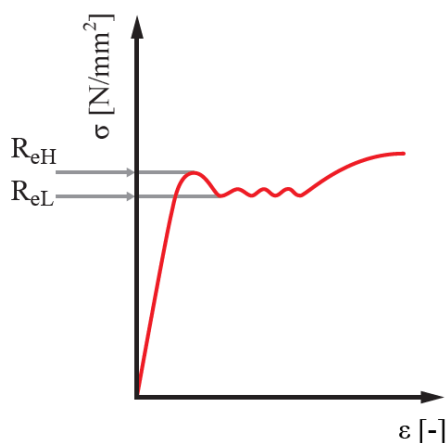
Velká hodnota E znamená, že při velkém zatížení dojde k malému poměrnému prodloužení. Například modul pružnosti v tahu, také označovaný jako Youngův modul, pro uhlíkovou ocel je $E = 210$ GPa a modul pružnosti v tahu pro čistý hliník je $E = 70$ GPa. [13]

Mez pružnosti σ_E

Do dosažení hodnoty meze pružnosti vznikají pouze elastické deformace, které po odstranění působení síly zanikají a těleso se vrátí do původního stavu. Pokud působící síla překoná mez pevnosti, těleso po odstranění síly zůstane deformováno.

Mez kluzu R_e

Mez kluzu je napětí, při němž vznikají plastické deformace. To znamená, že po odebrání působící síly se těleso nevrátí do původní délky a deformace jsou tudíž trvalé. Podle definice je mez kluzu napětí v okamžiku, kdy vznikne plastická deformace. Na základě průběhu diagramu, lze rozlišit výraznou mez kluzu R_e (obrázek 11), nebo smluvní mez kluzu R_p . [14]

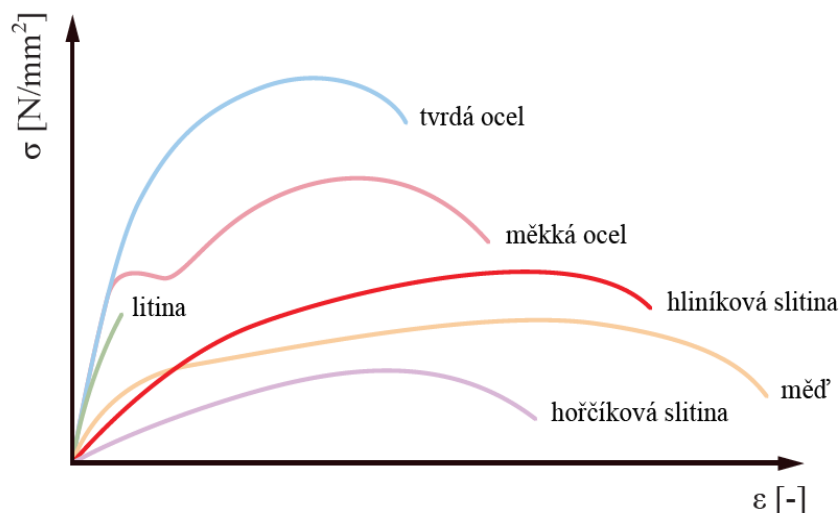


Obrázek 11 Výrazná mez kluzu

Pokud je možné u kluzového jevu rozlišit horní mez, kdy dochází k prvnímu poklesu napětí a dolní mez, kdy hodnota napětí v oblasti kluzového jevu opět roste, určují se tyto charakteristiky jako R_{eH} horní mez kluzu a R_{eL} dolní mez kluzu. [14]

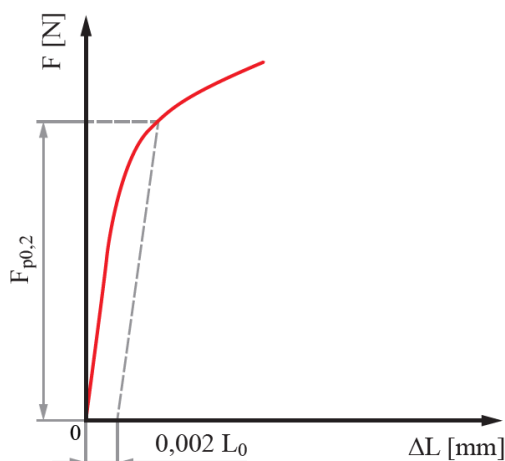
Smluvní mez kluzu

Smluvní mez kluzu R_p je určována pro materiály, v jejichž tahových diagramech nelze pozorovat výskyt kluzného jevu, tedy materiály bez výrazné meze kluzu. Obecně se jedná o materiály jako je tvrdá ocel, hliníkové slitiny nebo měď. [14]



Obrázek 12 Porovnání tahových diagramů

Smluvní mez kluzu se v grafu určí přímkou se směrnicí lineární části grafu, ve které platí Hookův zákon. Tato přímka se posune po ose X o 0,2 procentních bodů a v bodě, kde se pomocná přímka potká s grafem se nachází smluvní mez kluzu, označená $R_{p0,2}$. [14]



Obrázek 13 Určení smluvní meze kluzu

Mez pevnosti R_m

Mez pevnosti R_m je maximální napětí, které zkoušený vzorek snese bez narušení materiálu, dojde ke ztrátě plastické stability. Při překonání této hranice se vzorek prodlouží i za působení menšího napětí, až dojde k přetržení materiálu. Mez pevnosti je podíl maximálního zatížení a průřezu vzorku před zatížením, tato definice je popsána následujícím vzorcem.

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (10)$$

F_{max} – maximální zátěžná síla [N], S_0 – průřez vzorku před zatížením [mm²] [14]

Tažnost A

Tažnost je deformační charakteristika, která udává trvalé poměrné prodloužení po přetržení zkušební tyče, kdy se obě části přiloží a změří se, o kolik se zkušební tyč prodloužila. Pokud jsou měřeny velmi malé deformace a je použit extenzometr, tak je prodloužení měřeno jako celkové prodloužení v okamžiku lomu. Pro zjištění tažnosti se odečte pružné prodloužení. Tažnost se udává v procentech.

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad (11)$$

L_0 – počáteční délka [mm], L_u – délka po protažení [mm]

Pokud se jedná o krátké zkušební tyče, tzn. jejichž poměr délky a průměru nabývá hodnoty 5, je jejich tažnost označována jako A_5 . [14]

Kontrakce Z

Deformační charakteristika kontrakce je trvalé poměrné zúžení v místě lomu po přetržení zkušební tyče. Udává se v procentech a je dána vztahem 12.

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad (12)$$

S_0 – původní plocha příčného řezu [mm²], S_u – nejmenší plocha průřezu zkoušeného vzorku [mm²] [13]

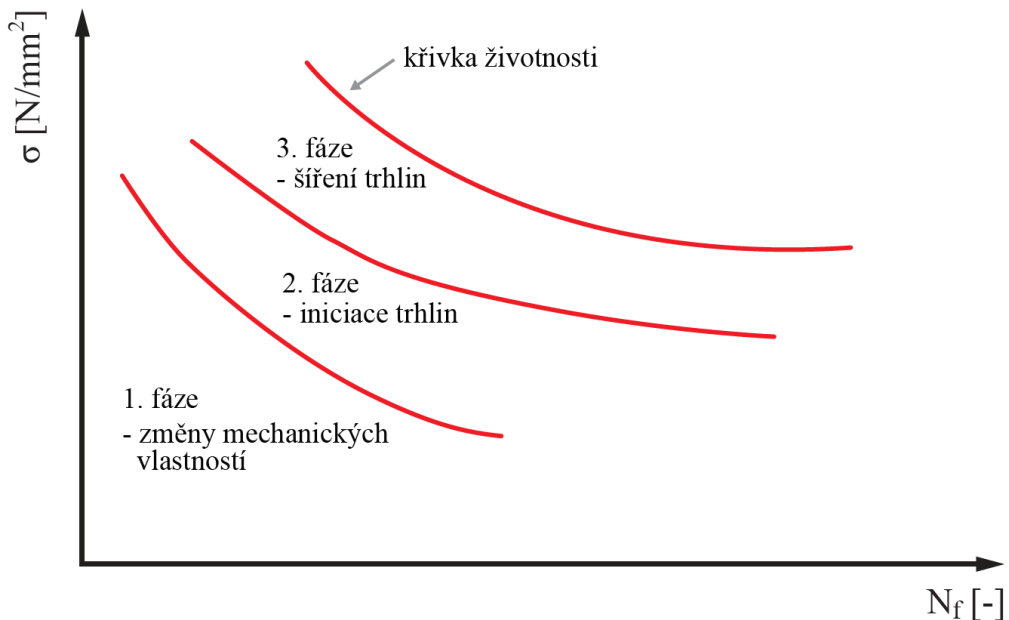
3 Dynamické zatěžování

Proces, při kterém se vlivem působení periodicky se měnícího napětí mění strukturní stav materiálu, se nazývá únavu materiálu. Při tomto procesu dochází kromě změn ve struktuře i ke změnám vlastností zatěžovaného materiálu, které jsou vyvolané opakovaným tzv. cyklickým zatěžováním. Ani největší napětí při cyklickém zatěžování nepřekračuje mez pevnosti R_m , která se za účelem určení únavové charakteristiky zjišťuje v laboratoři jako první. [16]

Statické působení síly o takové intenzitě nemá podstatný vliv na materiál a nepůsobuje změny, ani poškození. Oproti tomu dynamické zatěžování způsobuje kumulaci plastické deformace a nahromaděné poškození se projevuje růstem trhlin, které nakonec přeroste až v únavový lom. [16]

Únavový proces se dělí na tři fáze, které na sebe plynule navazují. Následující graf jednotlivé fáze popisuje. Jedná se o:

1. Fáze změn mechanických vlastností
2. Fáze iniciace únavových trhlin
3. Fáze šíření únavových trhlin



Obrázek 14 Únavový proces

Na vodorovné ose je počet zátěžových cyklů do lomu N_f . Na ose svislé je amplituda napětí σ . Během fáze změn mechanických vlastností se následkem kumulace poškození mění rozložení a hustota dislokací v materiálu. Na základě tohoto jevu mění materiál své mechanické vlastnosti. [16]

Ve fázi vzniku únavových trhlin se vlivem narůstající koncentrace plastické deformace tvoří na povrchu koncentrátoři, ve kterých se kumuluje větší množství napětí a deformace. První mikrotrhliny vznikají právě v okolí koncentrátořů. [16]

Fáze šíření únavových trhlin je poslední fází před přerušením materiálu. Vzniklé mikrotrhliny neustále rostou, až se vlivem nerovnoměrně rozloženého napětí a deformace z jedné z mikrotrhlin stane řídicí trhlina. Řídicí trhlina roste rychleji než ostatní trhliny, až pronikne větší částí vzorku. Poté, co rostoucí napětí přesáhne kritickou hodnotu, dojde ke konečnému dolomení. [16]

Pro zjištění chování materiálu nestačí jedno přetržení zkušební vzorku, nýbrž série pokusů pro zjištění závislosti napětí na počtu cyklů. Tuto závislost popisuje Wöhlerova křivka, jedná se o nejpoužívanější charakteristika únavy materiálu. O Wöhlerově křivce bude blíže pojednáno v kapitole 3.2. [16]

3.1 Cyklické zatěžování

Pro tuto práci budou klíčové výsledky únavové zkoušky, které nutně předchází zkouška statická. Vyhodnocením statického zatěžování, se z diagramu určí mez pevnosti, která se použije jako výchozí hodnota pro dynamické zatěžování. Od této meze se bude hodnota zatěžování pro každý pokus snižovat, dokud zkušební vzorek nevydrží při daném napětí 10^7 cyklů, čímž se předpokládá, že při dané úrovni namáhání vzorek vydrží nekonečný počet cyklů bez přetržení. [13]

V praxi nejsou obvykle strojní součásti zatěžovány statickým napětím, nýbrž jsou vystavovány nahodilému působení sil. Protože plně náhodný průběh zatěžování nelze pro potřeby měření přesně určit, nahrazuje se tento průběh harmonickým grafem nejčastěji sinusové funkce. Hodnota působeného napětí se mění periodicky mezi maximem a minimem, kdy se maximální napětí označuje σ_h jako horní napětí a minimální či dolní hodnota cyklického napětí se označuje σ_d . Statickou složku lze vypočítat jako průměrnou hodnotu maximálního a minimálního napětí podle vzorce 13 a označuje se střední napětí σ_m v jednotkách [MPa]. Dynamická složka se vypočítá podle vzorce 14 a označuje se jako σ_a amplituda napětí v jednotkách [MPa]. Dále se při harmonickém zatěžování určuje rozkmit napětí $\Delta\sigma$ (vzorec 15) a koeficient nesouměrnosti R (vzorec 16). [13] [16]

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2} \quad (13)$$

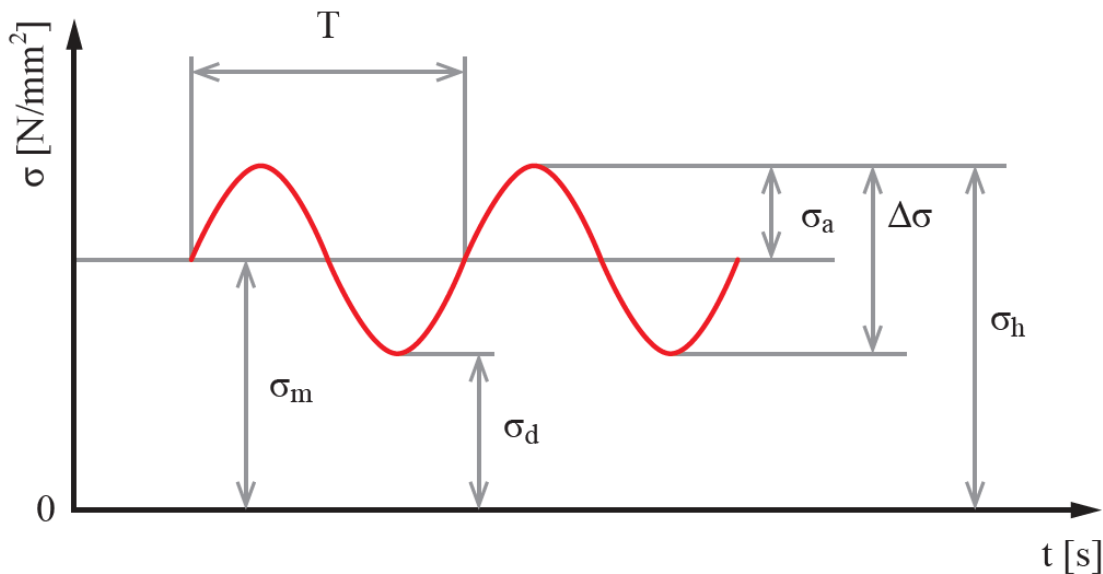
$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2} \quad (14)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_h - \sigma_d \quad (15)$$

$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} \quad (16)$$

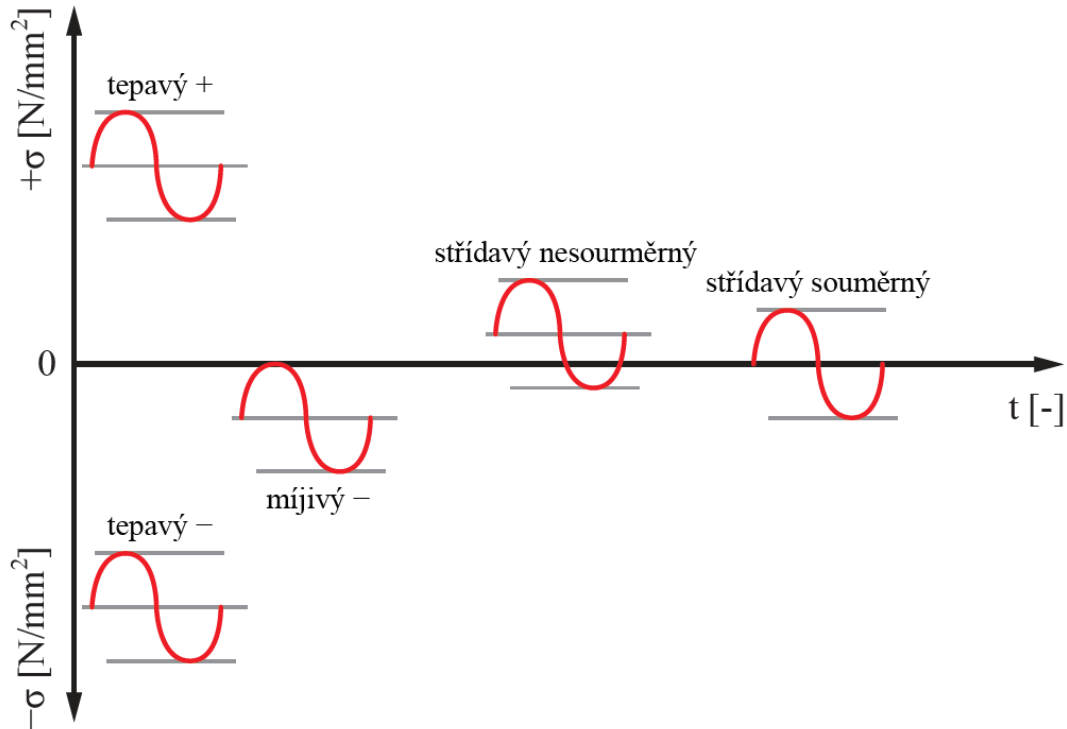
$$f = \frac{1}{T} \quad (17)$$

[16]



Obrázek 15 Amplituda napětí

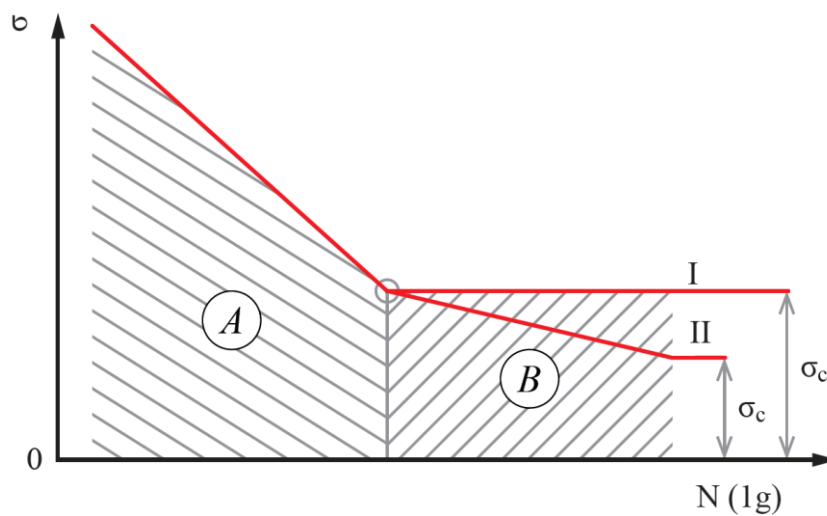
Cyklus zatěžování může mít různé podoby podle oblasti napětí, ve které se nachází. Může se vyskytovat v tahové (viz obr. 15) i tlakové oblasti. Pokud se zatěžovací cyklus pohybuje pouze v oblasti tahu nebo pouze v oblasti tlaku, jedná se o tepavý či pulzující cyklus. Cyklus, který se maximem nebo minimem dostává k nulovému napětí, je označován za cyklus mívivý. V případě symetrického cyklu je střední napětí rovno nule a vzorek je rovnoměrně namáhám na tah i tlak. Druh cyklického zatěžování lze určit vzorcem 16, kdy v případě, že je výsledek roven 1 nejedná se o cyklické, nýbrž statické zatížení. V případě, kdy R nabývá záporné hodnoty, jedná se o zatěžování střídavé. Pokud R nabývá kladné hodnoty tak je zatěžování pulzující. V případě, že je R rovno nule, jde o zatěžování mívivé. [16]



Obrázek 16 Druhy cyklického zatěžování

3.2 Wöhlerova křivka

Wöhlerova křivka, známá jako S-N křivka, znázorňuje závislost mezi amplitudou napětí σ_a a počtem cyklů N . S-N křivka popisuje, kolik cyklů vydrží materiál do přesně definované poruchy. Nejčastěji se jako porucha udává lom, ale může jí být i například délka počáteční trhliny. Křivka je ovlivněna koeficientem asymetrie, který udává druh zatěžování. Nejčastěji se při experimentálním měření používá střídavé souměrné $R = -1$ nebo míjivé zatížení $R = 0$. Wöhlerova křivka je zobrazována v logaritmických (Obr. 17) nebo semilogaritmických souřadnicích (Obr. 18).[17]



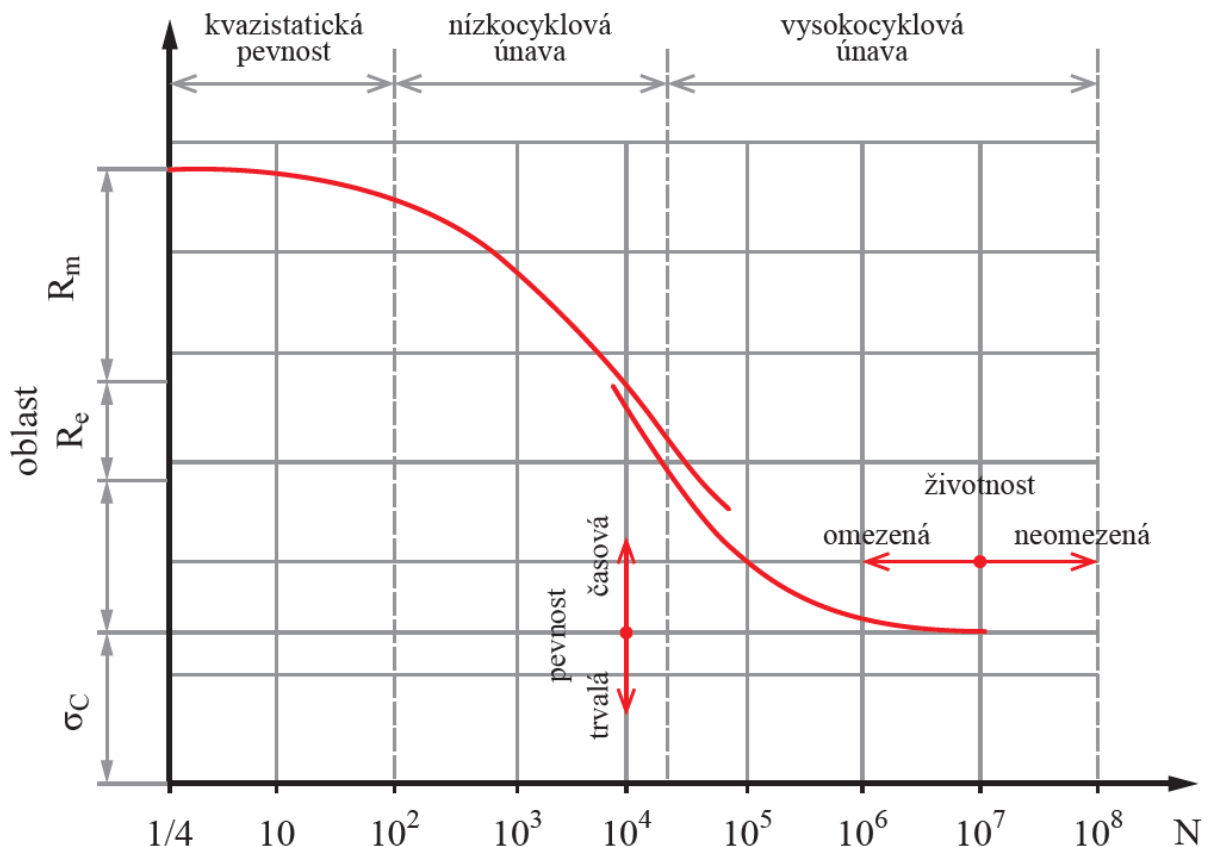
Obrázek 17 S-N křivka v logaritmických souřadnicích

Obecně lze v logaritmických souřadnicích S–N křivky rozlišovat dva typy křivek. První typ je v grafu označen I a je pro litinu a ocel a druhý typ II pro hliníkové slitiny a austenitické oceli. Celý Wöhlerův diagram lze rozdělit na A, pásmo časových pevností, a dále na B, pásmo meze únavy. (Obr. 17) [18]

Křivka pro typ I typicky přestane v určitém místě klesat a přejde v horizontální přímku. Hodnota amplitudy napětí, při které ke změně dochází, se nazývá *mez únavy* materiálu σ_c . Mez únavy je možno definovat jako největší napětí, které nezpůsobí lom při nekonečném počtu zatěžovacích cyklů. Mez únavy rozděluje oblasti časové (omezené) a neomezené životnosti na vodorovné ose (Obr. 18).

Původně byla mez únavy definována pro zjednodušení výpočtu, protože za předpokladu nekonečné životnosti lze s únavovou pevností počítat obdobně, jako při statickém zatěžování. Slitiny hliníku nemají výrazný přechod, a proto je nutno definovat takzvanou časovou mez únavy. [18]

Únavu materiálu lze rozdělit i podle počtu cyklů, který materiál vydrží, než se přetrhne. Toto rozdělení je poněkud sporné, jelikož neexistuje ustálená terminologie. Jednotnou terminologii nelze stanovit mimo jiné proto, že různé skupiny materiálů mají



Obrázek 18 Popis Wöhlerovy křivky

rozdílné vlastnosti a chovají se odlišně. Z toho důvodu je důležité porozumět podstatě pojmů jako takových a propojit je s procesy a příčinami vzniku a průběhu únavového poškození a netrvat na exaktních stanovení hranic těchto pojmů. [19]

Na začátku křivky je hodnota působícího napětí rovna mezi pevnosti R_m , lom tedy nastane v prvním, či několika prvních desítkách cyklů. Vzniklý lom nemá charakter únavového lomu, ale jedná se o zdánlivě statický lom, který má vlastnosti statického lomu, ale vznikne po opakovaném namáhání. Takový lom je označován jako kvazistatický lom. [19]

V druhé části amplituda napětí klesá a vzorek je namáhán napětím větším, než je mez kluzu R_e . V tomto úseku se jedná o časovou pevnost s omezenou životností a k porušení dochází nízkocyklovou únavou. [19]

Třetí část křivky popisuje vysokocyklovou únavu, kdy je působící napětí menší než mez kluzu. V místě, kde křivka přestane klesat a přejde v horizontálu se na amplitudě napětí vyznačí mez únavy. [19]

4 Testovaný materiál

V následujících kapitolách jsou popsány vlastnosti hliníku v obecné rovině a také vlastnosti testovaného materiálu $AlSi_{10}Mg$, který je z hlediska průmyslového využití žádaným materiálem.

4.1 Hliník a jeho slitiny

Čistý hliník má výbornou elektrickou a tepelnou vodivost, ale špatné mechanické vlastnosti. Pro využití v průmyslu je proto nutné vlastnosti hliníku upravit legováním. Nejznámější slitinou hliníku je dural, který vzniká kombinací hliníku a mědi. Slitiny jsou oproti čistému hliníku pevnější, tvrdší a zároveň si zachovávají malou měrnou hmotnost a ve většině případů i odolnost vůči korozi. Mezi významné přísady patří: Cu, Mg, Mn, Si a Zn. Slitinu hliníku lze přísadami vylepšit, ale záleží na účelu využití výsledné slitiny. Například přidavek mědi zvýší pevnost a tvrdost, ale zhorší tvárnost a odolnost proti korozi. [20]

Tabulka 1 Vlastnosti čistého hliníku [20]

Měrná hmotnost	2 690 kg/m ³
Teplota tavení	660 °C
Mez pevnosti v tahu	70 MPa
Mez kluzu	20 MPa
Tažnost	20 % – 30 %

Přídavek křemíku zvyšuje pevnost a odolnost, také snižuje možnost vzniku trhlin. Pokud se ve slitině vyskytuje ve větším množství, je ve formě čistého křemíku, což má za následek vyšší křehkost. Tvářené slitiny obsahují maximálně 1 % křemíku. Přidání hořčíku zvyšuje pevnost a vytvrditelnost slitiny, také se zlepšuje odolnost proti korozi. [21]

Pro slitinu Al–Mg–Si je typický nízký obsah legujících prvků, obvykle do 1,5 %. Tuto slitinu lze vytvrzovat tepelným zpracováním, a tak dosáhnout meze pevnosti v tahu až 350 MPa. Slitinu lze použít na odlitky, které se používají při vysokých teplotách, například žebrovaná hlava válce motoru. [20]

4.2 Materiál $AlSi_{10}Mg$

Materiál tvoří hliník legovaný křemíkem s hmotnostním podílem 10 % ± 1 %, malým množstvím hořčíku, železem a dalšími prvky ve stopovém množství jako jsou

dusík, kyslík, titan, zinek, mangan, nikl, měď, olovo a cín. Díky přítomnosti křemíku je slitina tvrdší a pevnější než čistý hliník. [22]

Díky přirozené tvorbě oxidační vrstvy Al_2O_3 na povrchu hliníkové slitiny má materiál vysokou odolnost proti korozi, kterou lze navíc vylepšit chemickou anodizací. Vlastnosti tohoto materiálu je například nízká hustota $2\,680\text{ kg/m}^3$, díky které je vhodný pro výrobu komponent s požadavkem na nízkou hmotnost. Další vlastností je velká pevnost, vysoká tepelná i elektrická vodivost a na výsledné produkty lze aplikovat povrchové úpravy. Teplota tavení je od $570\text{ }^\circ\text{C}$. Tyto vlastnosti materiálu jsou při zpracování DMLS technologií deklarované výrobcem. Vlastnosti vyplývající ze zatěžování jsou stanoveny pro horizontální a vertikální orientaci dílů při tisku. [22]

Využití tohoto materiálu lze nalézt například v automobilovém průmyslu, letectví a zbrojním průmyslu, chlazení elektroniky i u spotřebního zboží.

Materiál se dodává ve formě prášku, aby jej bylo možno následně zpracovat pomocí aditivní technologie.

Tabulka 2 Vlastnosti AlSi10Mg [22]

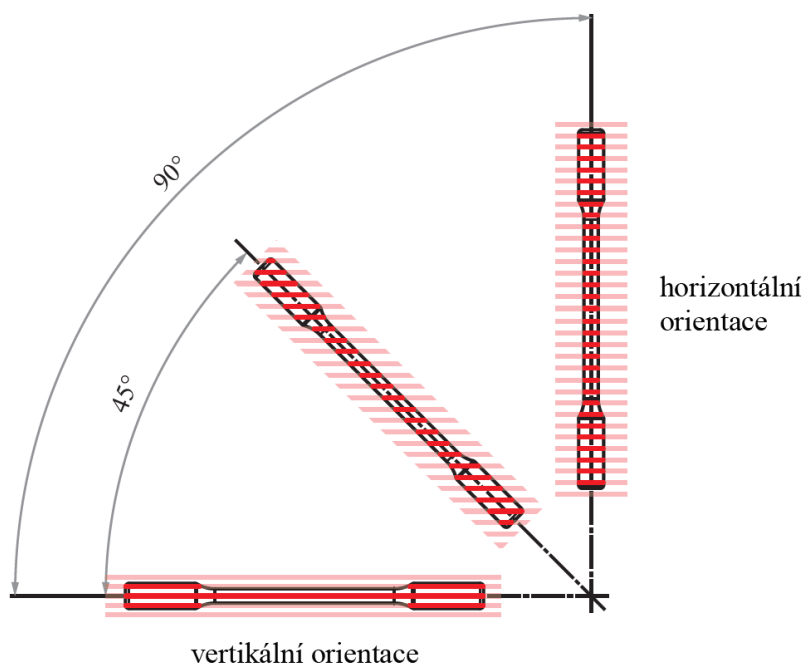
Měrná hmotnost	$2\,680\text{ kg/m}^3$
Teplota tavení	$570 - 590\text{ }^\circ\text{C}$
Mez pevnosti v tahu	
vertikální	$400\text{ MPa} \pm 13\text{ MPa}$
horizontální	$366\text{ MPa} \pm 30\text{ MPa}$
Mez kluzu	
vertikální	$266\text{ MPa} \pm 2\text{ MPa}$
horizontální	$220\text{ MPa} \pm 11\text{ MPa}$
Maximální prodloužení	
vertikální	$4\% \pm 1\%$
horizontální	$3\% \pm 1\%$

5 Postup měření

Níže je popsán postup měření vzorků s třemi druhy orientací, které bylo provedeno v laboratoři experimentálního měření Vysoké školy polytechnické. Byla provedena statická zkouška na tah a krut a dále byla provedena cyklická zkouška také na tah a krut.

5.1 Popis vzorků

Vzorky jsou vyrobeny z materiálu AlSi10Mg metodou DMLS, tedy laserového spékání kovového prášku, které byla věnována kapitola 1.5. Vzorky jsou tisknuté ve třech orientacích. Vzorky s vertikální orientací tištěných vrstev 0° jsou tištěné tak, že osa zkušební tyče je vodorovně se základnou tisku. U vzorků s horizontální orientací 90° je osa zkušební tyče kolmo k tištěným vrstvám a základně tisku. Třetí druh vzorků je tištěn s orientací 45° . Pro názornost jsou v následujícím obrázku tyto orientace znázorněny graficky. Rozměry zkušební tyče před namáháním jsou uvedeny ve výkresu, který je součástí přílohy. **NORMA** ČSN EN ISO 6891-1



Obrázek 19 Znázornění orientace tisku vzorku

Pro statickou zkoušku v tahu bylo použito 5 vzorků s horizontální orientací, 5 vzorků s orientací tisku 45° a 5 vzorků vertikálních. Pro statickou zkoušku v krutu bylo použito stejné množství vzorků, dohromady bylo pro statické zkoušky použito 30 kusů vzorku, 10 od každého ze 3 druhů orientace. Při cyklickém namáhání byly použity vzorky s orientací tisku 45° , 25 vzorků pro namáhání v tahu a dalších 25 vzorků pro namáhání v krutu. Pro všechny zkoušky bylo celkem použito 80 vzorků.

5.2 Zařízení pro měření

Měření proběhlo v laboratoři experimentálního měření Vysoké školy polytechnické. Pro účely měření bylo využito kombinované zkušební zařízení Electropuls 10 000, dále byl použit počítač s programy Intron Console, pro elementární ovládání stroje, Wave matrix, pro statickou zkoušku v krutu a pro cyklické zkoušky, a programem Blue Hill Universal, pro statickou zkoušku v tahu.

5.3 Popis přípravy měření

Samotnému měření předchází příprava stroje ElectroPuls 10 000. Je nutné přizpůsobit zařízení lineární a torzní tuhosti vzorku. Tento krok slouží k optimalizaci řízení, což zajistí rovnoměrné a plynulé působení síly. Vynechání tohoto kroku by mohlo způsobit zkreslení měření, v horším případě i natolik, že by bylo nemožné jakékoli vyhodnocení. Při měření by totiž docházelo k překračování limitů zrychlení pohybu. Pro jednotlivé standardní operační procesy jsou stanoveny specifika pro automatické, nebo manuální přizpůsobení.

Ladění zařízení se provádí v aplikaci Instron Console a probíhá následovně:

Jako první se standardizovaná zkušební tyč upne do stroje. Konec tyče je upnut nejprve do statických čelistí, a poté za druhý konec do čelistí posuvných. Následně se provede vyvážení snímačů. Poté se v aplikaci zvolí ladění podle posunu nebo síly. Volba podle síly je vhodnější, protože lépe určí bezpečnou a zároveň dostatečnou sílu dle materiálových charakteristik a rozměrů vzorku. Poté je zvolena varianta automatického přizpůsobení.

Další krok je nastavení limitů, které musí odpovídat testovanému vzorku, aby nebyl trvale deformován. Pokud není možné vlastnosti materiálu spolehlivě predikovat, je vhodnější volit bezpečně nízké zatížení, které lze postupně zvyšovat. Eventuálně lze výpočtem stanovit tuhost a následně zatěžující sílu.

Po určení limitů se zařízení přepne do vysokého výkonu a následně se provede automatické přizpůsobení. Dokončení testu je provázeno zobrazením získané hodnoty tuhosti uváděnou v N/mm. Po dokončení testu následuje přepnutí zařízení zpět do nízkého výkonu.

5.4 Průběh měření

Před začátkem měření jsou zaznamenány rozměry zkušební vzorku. Za pomoci posuvného měřítka se změří průměr ve středu a na obou koncích měřené délky. Následně se pomocí ohebného ocelového měřítka změří a označí střed vzorku. Dále se souměrně od středu vyznačí dvě značky, jejichž vzdálenost odpovídá měřené vzdálenosti L_0 . Tato vzdálenost je pomocí značek sledována průtahoměrem.

Zapne se zkušební stroj ElectroPuls 10 000 a počítač pro dané pracoviště, uskuteční se automatická diagnostika, spuštění systému zkušebního stroje a propojení komunikačních prostředků. Připojí se průtahoměr a pneumatické čelisti na píst a siloměr.

Na počítači se otevře software Blue Hill Universal, který spustí Instron Console pro ElectroPuls 10000. Spustí se kompresor, který umožní používání pneumatických čelistí a upnutí zkoušeného vzorku.

Manuálně se nastaví střední hodnoty lineární a torzní polohy pístu s čelistí tak, aby výchozí poloha dovolovala provedení zkoušky v potřebném rozsahu, tedy aby nenastala situace, kdy bude provedení zkoušky omezeno z důvodu dosednutí pohyblivé čelisti k rámu zkušebního stroje.

Po kontrole přizpůsobení tuhosti vzorku se vybere vhodná metoda z předdefinovaných zkušebních metod v programu Blue Hill Universal. Zadájí se rozměry zkušební vzorku, jmenovitě počáteční průřez a počáteční měřená délka L_0 .

Po této přípravě se zkušební vzorek upne. Vzorek je nejprve upnut do dolních čelistí, které jsou statické. Upnutí musí dosahovat přiměřené délky, aby byla zajištěna bezpečnost a zároveň neomezovala měření. Pomocí Instron Console se vynulují axiální síly. Následně se manuálně nastaví pohyblivé čelisti do polohy umožňující upnutí volné části zkušební vzorku. Po zapnutí lineární ochrany vzorku se volná část vzorku upne, proběhne kompenzace předpětí, které vzniká při upnutí, a lineární ochrana se vypne.

Když je zkušební vzorek upnut, přepne se stroj do režimu plného výkonu. Průtahoměr se nastaví na vyznačené rysky. V programu Blue Hill Universal se na počítači vynuluje poloha a deformace. Pro ujištění se provede vizuální kontrola a pokud není nalezena nesrovnalost, lze spustit test.

Průběh zkoušení lze sledovat prostřednictvím indikovaných parametrů. Automatické vypnutí testu nastane po přerušení zkušební vzorku. Po ukončení testu se provede přepnutí do režimu nízkého výkonu a přepne se na manuální ovládání. Provede se měření zúžení průměru v místě přerušení materiálu. Po změření lze manuální ovládáním uvolnit vzorek z čelistí. Následně se orientačně zkontrolují naměřená data, zda se přinejmenším zdánlivě přibližují k očekávatelnému výsledku. Pokud ne, nelze vyloučit chybné provedení měření. Po provedení testu posledního vzorku v řadě je nezbytné zkontrolovat exportovaná primární data. Posléze je možno ukončit test na řídicím počítači.

5.5 Statická zkouška

Cyklickému namáhání předchází statická zkouška, kdy se stanoví tahový diagram, ze kterého se odečtou mez pevnosti a smluvní mez kluzu. Podle předpokladu by měla mít hliníková slitina nevýraznou mez kluzu, a proto se bude určovat smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ z tahového diagramu, jak bylo vysvětleno v kapitole 2.4. Statické zkoušky se provedou zatěžováním v tahu a krutu pro orientaci vzorků 0° , 45° a 90° . Příprava statické zkoušky a její průběh je popsán v předešlých kapitolách.

5.5.1 Tah

Mezi faktory ovlivňující výsledné vlastnosti vzorku patří materiál, metoda tisku a orientace vzorků. Vzorky se liší pouze orientací, a proto se jedná o zkoumaný faktor.



Obrázek 20 Přetržený vzorek

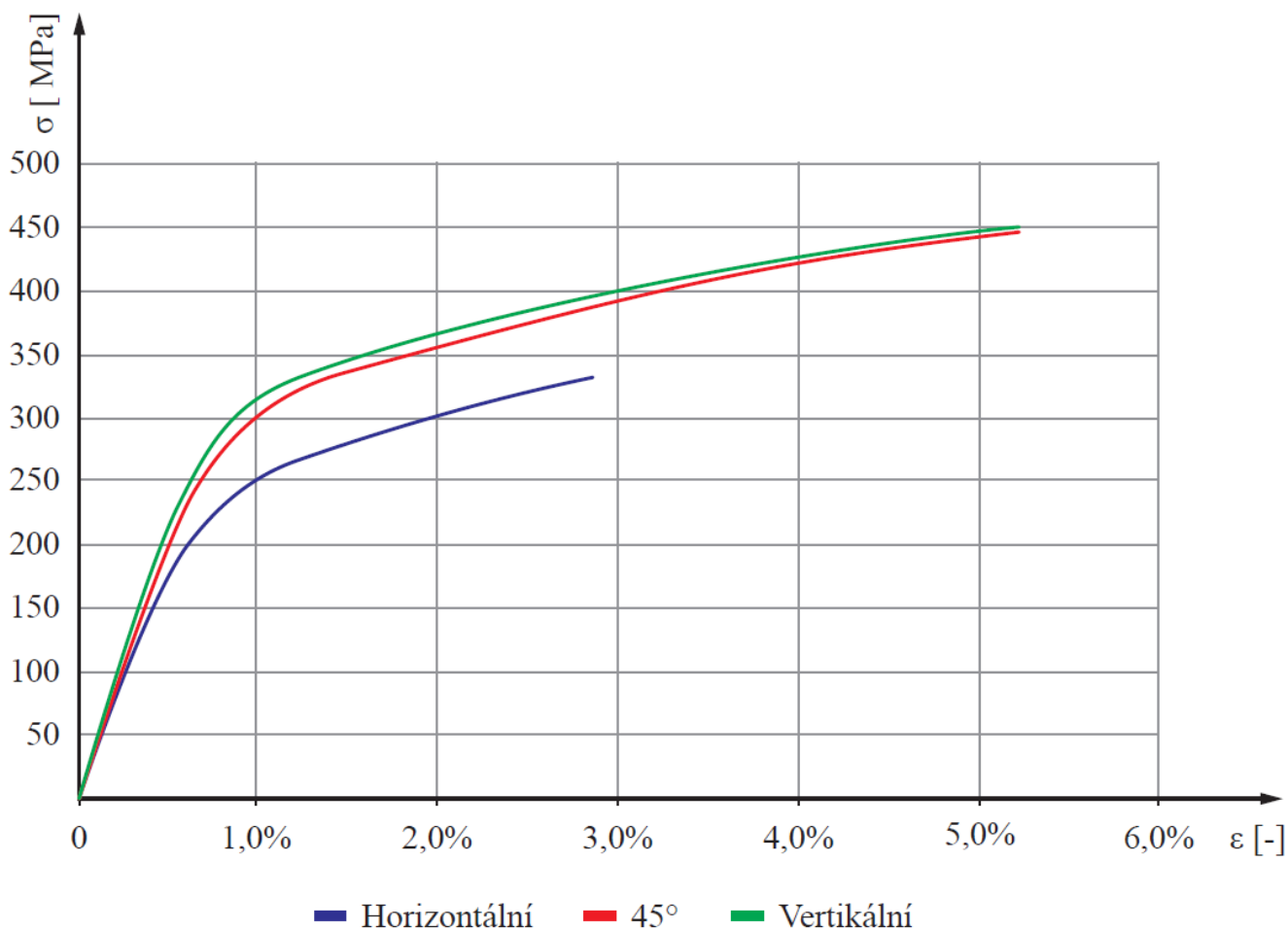
Vertikální vrstvy tisknuté ve směru působení síly rozkládají sílu v délce vlákna, a proto je lze zatížit větší silou. Oproti tomu horizontální vrstvy, které jsou kolmé na působení síly jsou méně konzistentní. Napětí se hromadí ve spojích vrstev. Tam se napětí nemá kam rozkládat, a proto dochází k dřívějšímu přerušení vzorku. Orientace 45° umožňuje vzorkům dosáhnout větší pevnosti, která se blíží vzorkům s vertikální orientací

tisku. Z výsledků statické tahové zkoušky lze vyvodit, že vzorky s horizontálně orientovaným směrem tisknutých vrstev mají v tahu výrazně menší pevnost oproti vertikálním a 45° vzorkům, které mají podobný průběh. Orientace natočená ke směru působení síly umožňuje efektivnější rozložení napětí než horizontální orientace.

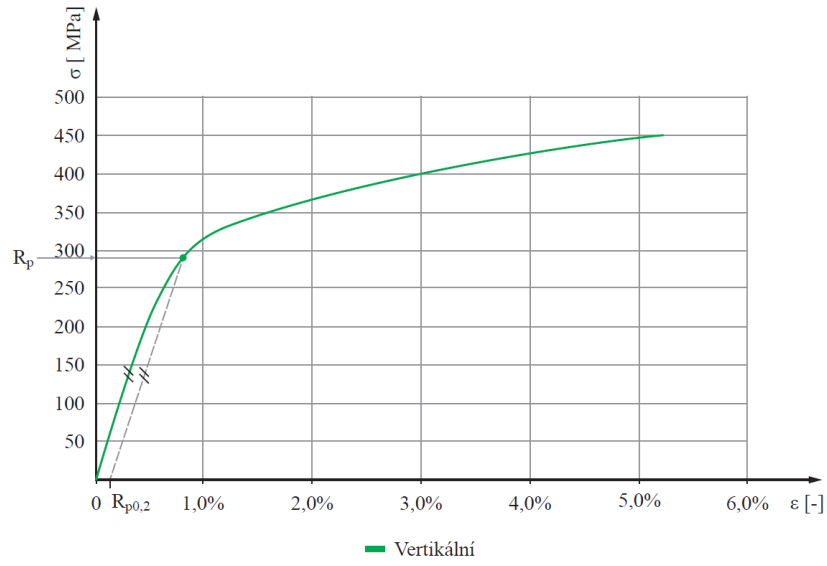
Tabulka 3 Výsledky statické zkoušky v tahu

Orientace tisku	Smluvní mez kluzu Rp [Mpa]	Mez pevnosti R _m [Mpa]
0°	310	449
45°	270	358
90°	228	331

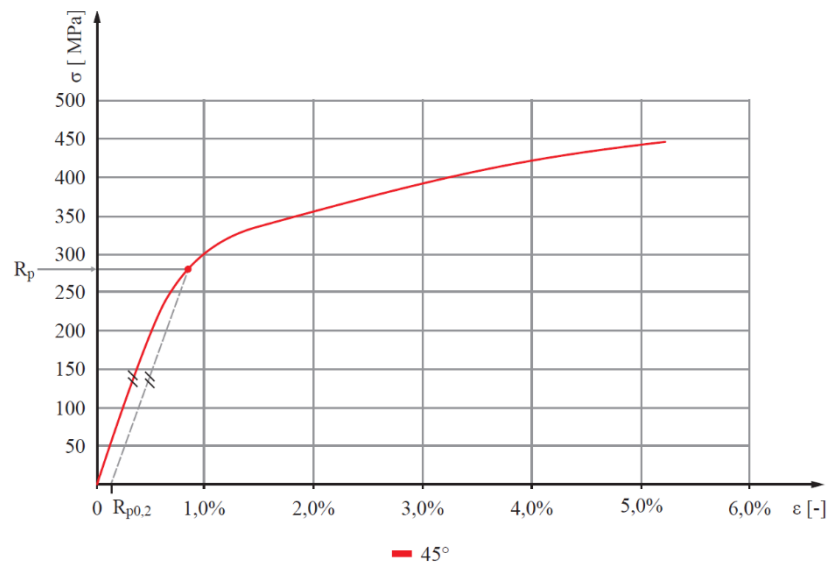
Výrobce udává vlastnosti materiálu, které jsou uvedeny v kapitole 4.2. Tyto hodnoty lze porovnat s experimentálně naměřenými hodnotami. Při experimentálním namáhání dosahují vzorky 0° o 36 MPa vyšší mez pevnosti a o 42 MPa vyšší mez kluzu, než udává tolerance výrobce. Hodnoty vzorku 90° nejsou natolik rozdílné a odpovídají toleranci udávané výrobcem.



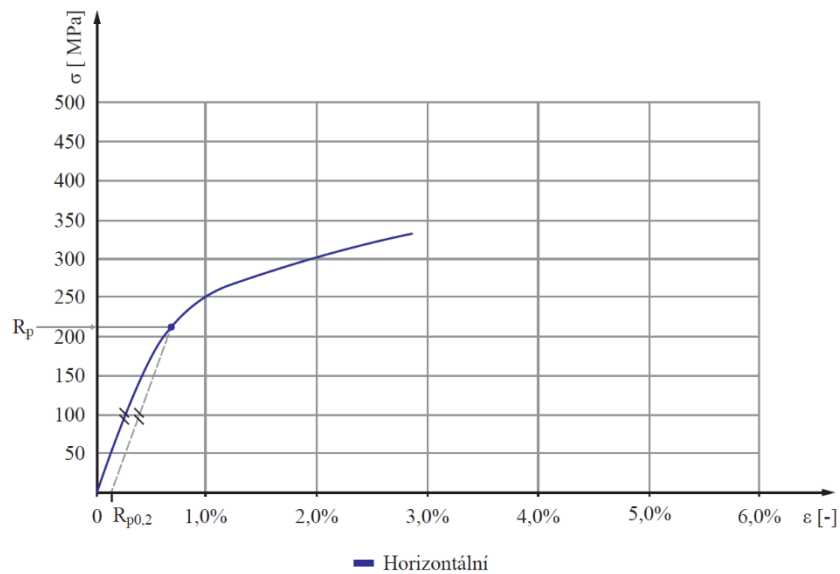
Obrázek 21 Tahový diagram pro tah



Obrázek 22 Tahový diagram vzorku s orientací 0 °



Obrázek 23 Tahový diagram vzorku s orientací 45 °



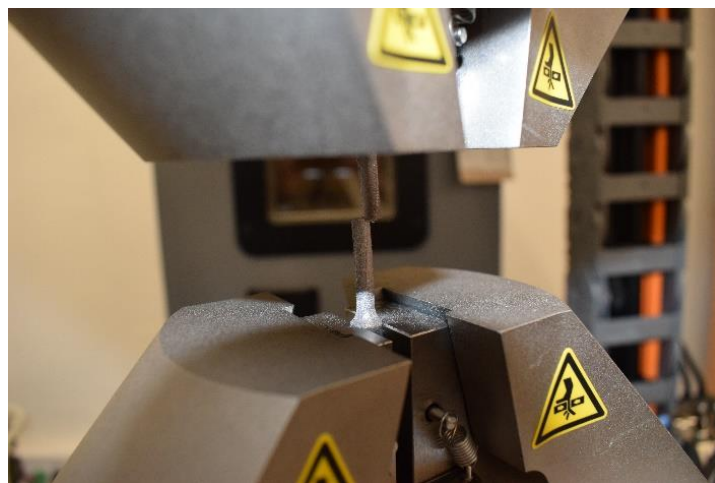
Obrázek 24 Tahový diagram vzorku s orientací 90 °

5.5.2 Krut

Ze statické zkoušky na krut vyplývá, že při namáhání na krut vykazují nejlepší mechanické vlastnosti vzorky s horizontální orientací. Napětí působí spíše ve směru rotace vodorovně k vrstvám a po kruhové vrstvě se rovnoměrně rozloží. Dlouhé vrstvy vzorků s vertikální orientací rozloží kroutící napětí po délce, ovšem nevydrží tak velké namáhání, jako vzorky s horizontální orientací. Kompromisní orientace 45° vykazuje hodnoty lepší, než vertikální orientace. Výsledné hodnoty 45° vzorků jsou mezi hodnotami horizontálních a vertikálních vzorků.



Obrázek 25 Pohyb čelisti při statické zkoušce na krut

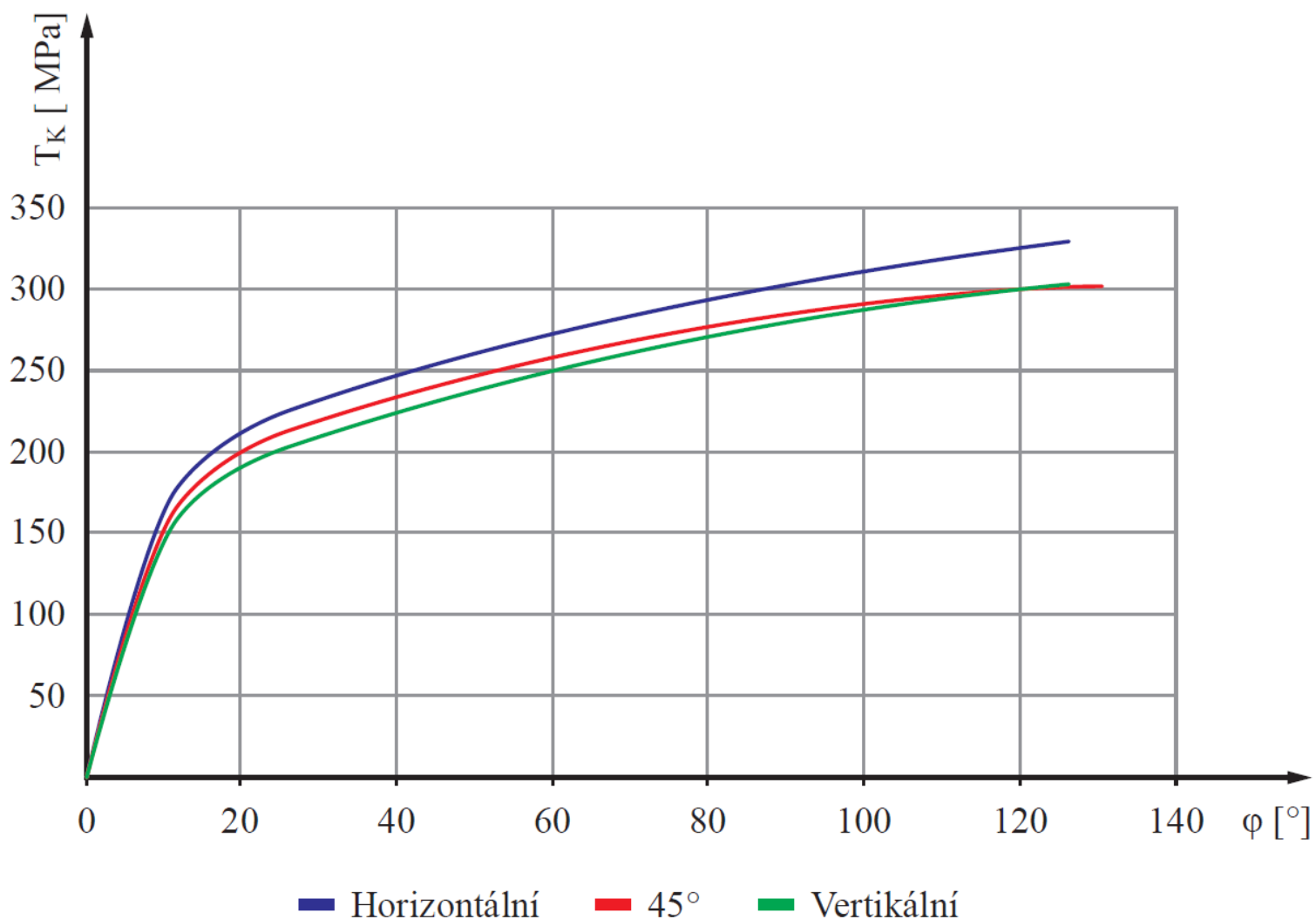


Obrázek 26 Ukroucený vzorek

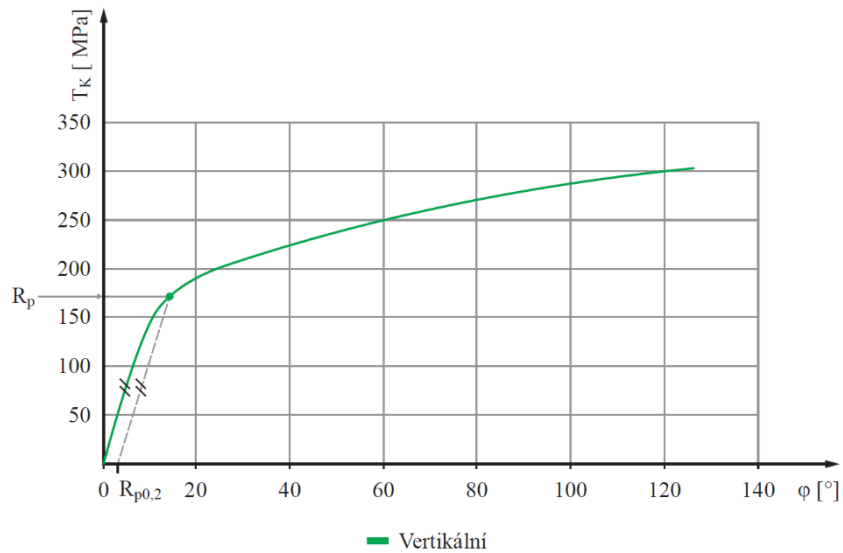
Tabulka 4 Výsledky statické zkoušky v krutu

Orientace tisku	Naměřené hodnoty		Přepočtené hodnoty	
	Smluvní mez kluzu Rp [Nm]	Mez pevnosti P [Nm]	Smluvní mez kluzu Rp [MPa]	Mez pevnosti R _m [Mpa]
0°	2,05	3,78	160	300
45°	2,12	3,82	165	303
90°	2,27	4,12	180	328

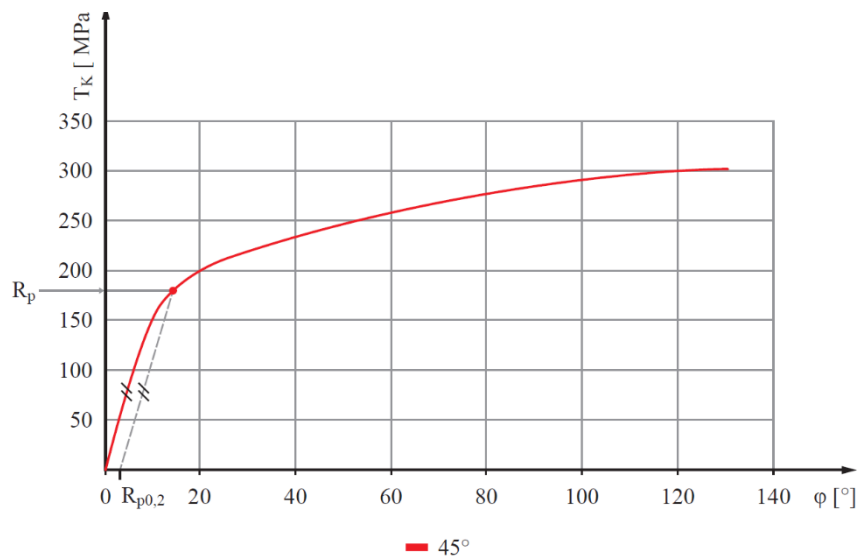
Vzorky na krut jsou zatěžovány krutícím momentem, ale pro zjednodušení porovnání výsledků mezi zkouškou na krut a na tah jsou přepočteny na souhlasné jednotky. Pro přepočtení hodnot bylo použito vzorců 6 a 7 z kapitoly 2.2.



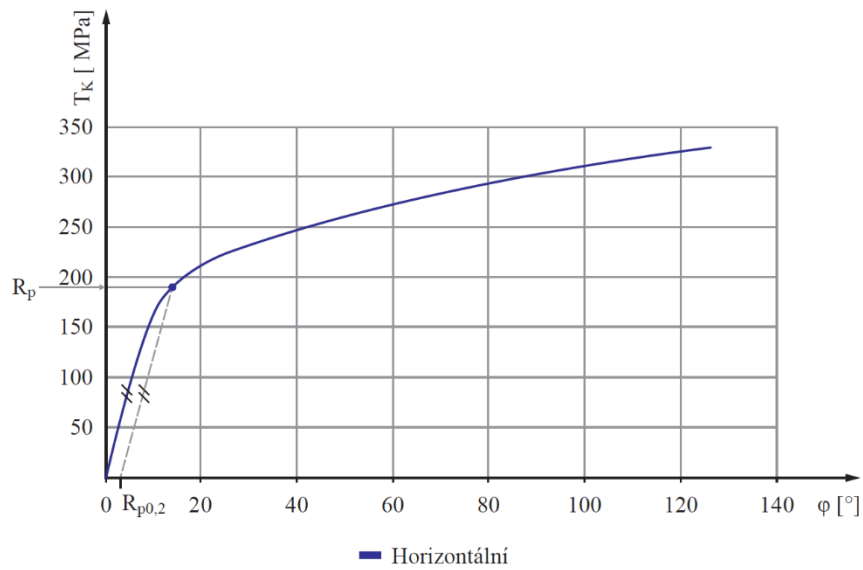
Obrázek 27 Tahový diagram pro krut



Obrázek 28 Tahový diagram vzorku v krutu s orientací 0°



Obrázek 29 Tahový diagram vzorku v krutu s orientací 45°



Obrázek 30 Tahový diagram vzorku v krutu s orientací 90°

5.5.3 Vyhodnocení statické zkoušky

Horizontální orientace ve struktuře materiálu vykazuje v krutu lepší charakteristiky než vertikální, ovšem při namáhání v tahu vykazuje výrazně horší vlastnosti. Oproti tomu vertikální vzorky při namáhání na tah dosahují nejlepší charakteristiky, ale při namáhání na krut měly nejhorší vlastnosti.

Strojní části jsou většinou namáhány časově proměnným zatížením, proto je směřováno k variantě, která bude mít dobré výsledky při statickém zatěžování v tahu i v krutu.

Ačkoliv vzorky s orientací 45° nevykazovaly při statickém zatěžování nejlepší charakteristiky, průměrné výsledky z obou zatěžování nasvědčují že jsou nejvhodnější variantou pro namáhání na tah i krut, protože mají lepší předpoklady pro docílení vyššího napětí při dosažení časově neomezené životnosti než vzorky se zbývajícemi dvěma orientacemi.

5.6 Cyklická zkouška

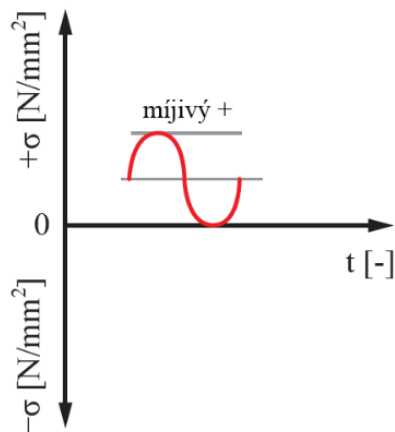
Pro vyhotovení Wöhlerovy křivky se podle teorie využívá hodnota meze pevnosti jako výchozí hodnota, která byla zjištěna statickou zkouškou. V důsledku omezené kapacity zkušební laboratoře začínala měření na hodnotách menších, než je smluvní mez kluzu a pokračovaly až do dosažení meze únavy, kdy je dosažena časově neomezená životnost.

Ačkoli měření začínalo na hodnotách menších, než je mez kluzu, nijak to neznehodnocuje vypovídající hodnotu měření, jelikož s ohledem na výsledek této práce je pro relevantní zhotovení Wöhlerovy křivky nezbytná oblast přechodu mezi časově omezenou a neomezenou životností. Kromě toho v případě překročení smluvní meze kluzu již dochází k deformaci vzorku, a proto zatěžování napětím vyšším, než je smluvní mez kluzu, není pro tuto práci přínosem.

5.6.1 Tah

Na základě odečtených dat z tahového diagramu statické tahové zkoušky vzorku 45° je smluvní mez kluzu stanovena na hodnotu přibližně 270 MPa. Cyklické zatěžování v tahu bylo prováděno od hodnoty 150 MPa, to odpovídá přibližně 55 % smluvní meze kluzu.

Vzorky byly při cyklickém namáhání zatěžovány mĳivĳe, namáhání se pohybuje v tahové oblasti a minimum představuje nulové napĳtí. Pro znázornĳení je průběh zatĳžování vyobrazen graficky na následujícím obrázku.

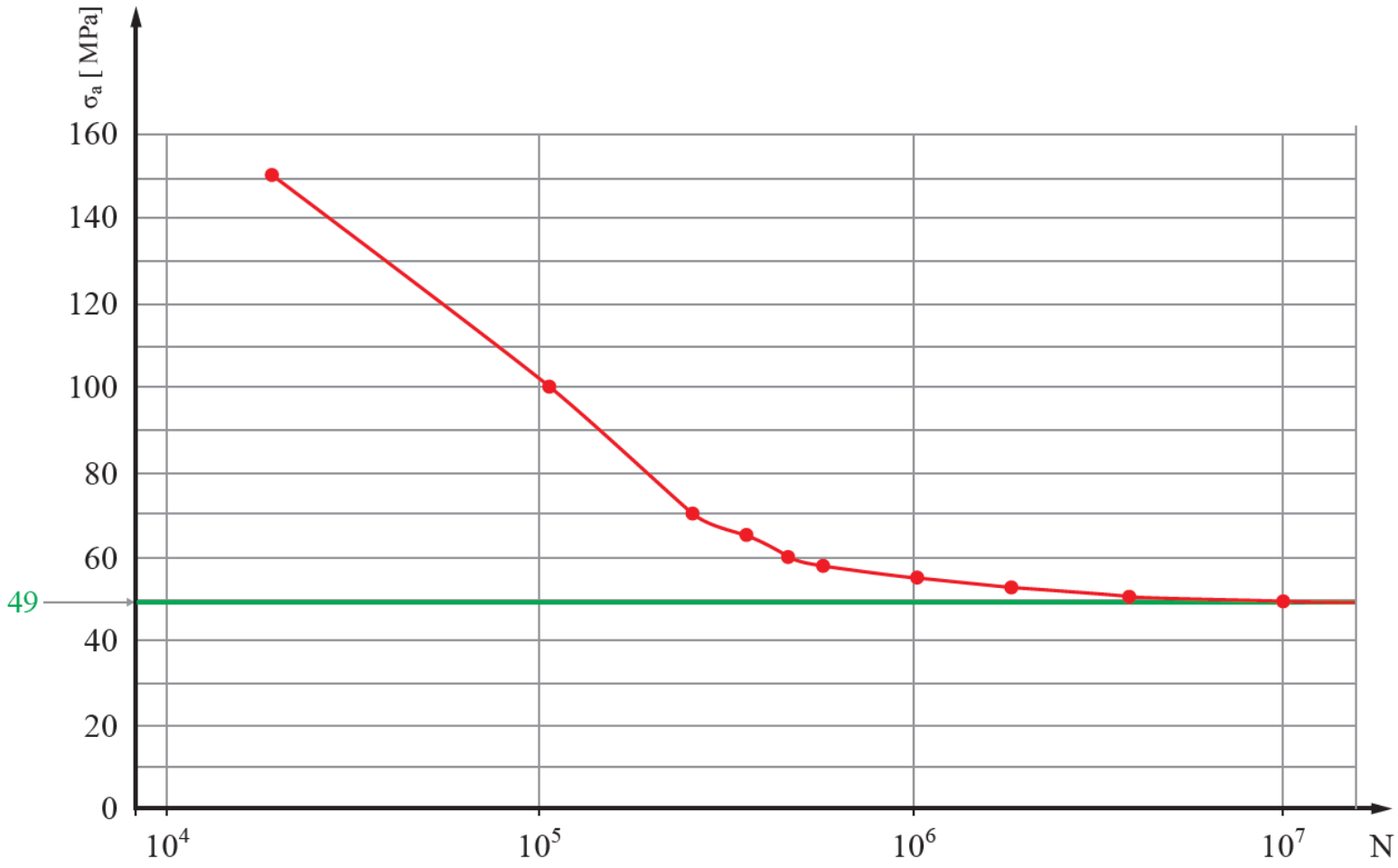


Obrázek 31 Cyklické zatĳžování mĳivĳé

Při snižujícím se napĳtí roste počet cyklů, které zkušební vzorek vydrží bez poruchy. Vzorek při působícím napĳtí vydržel více než 10^7 cyklů, dosáhl meze únavy a s největší pravděpodobností již k jeho přetržení pod daným namáháním nedojde. Mez únavy v tahu je 49 MPa a v následujícím grafu je vyznačena zelenĳ, jedná se o orientační hodnotu.

Tabulka 5 Výsledky cyklické zkoušky v tahu

Počet cyklů [N]	Napĳtí [MPa]
20 683	150,0
112 773	100,0
271 961	70,0
375 968	65,0
484 897	60,0
599 635	57,5
1 015 000	55,0
1 900 000	52,5
3 915 518	50,0
10 000 000	49,0

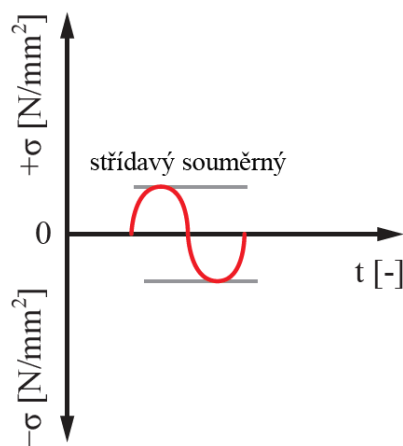


Obrázek 32 Wöhlerova křivka pro vzorek 45 ° v tahu

5.6.2 Krut

Podle výsledků odečtených z grafu statické zkoušky v krutu vzorku 45° je smluvní mez kluzu určena na hodnotu přibližně 165 MPa. Cyklické zatěžování v krutu bylo měřeno od hodnoty 120 MPa, tato hodnota odpovídá přibližně 70 % smluvní meze kluzu.

Vzorky byly namáhány střídavým zatěžováním. Při namáhání na krut by nebylo optimální zvolit mívivé zatěžování, protože vzorek by byl zatěžován jen na jednu stranu a poté by se vrátil do výchozí polohy. Proto se pro krut volí střídavé zatěžování, protože se vychází z nulového napětí a vzorek je kroucen na obě strany souměrně. Pro lepší představu je střídavé zatěžování naznačeno na následujícím obrázku.

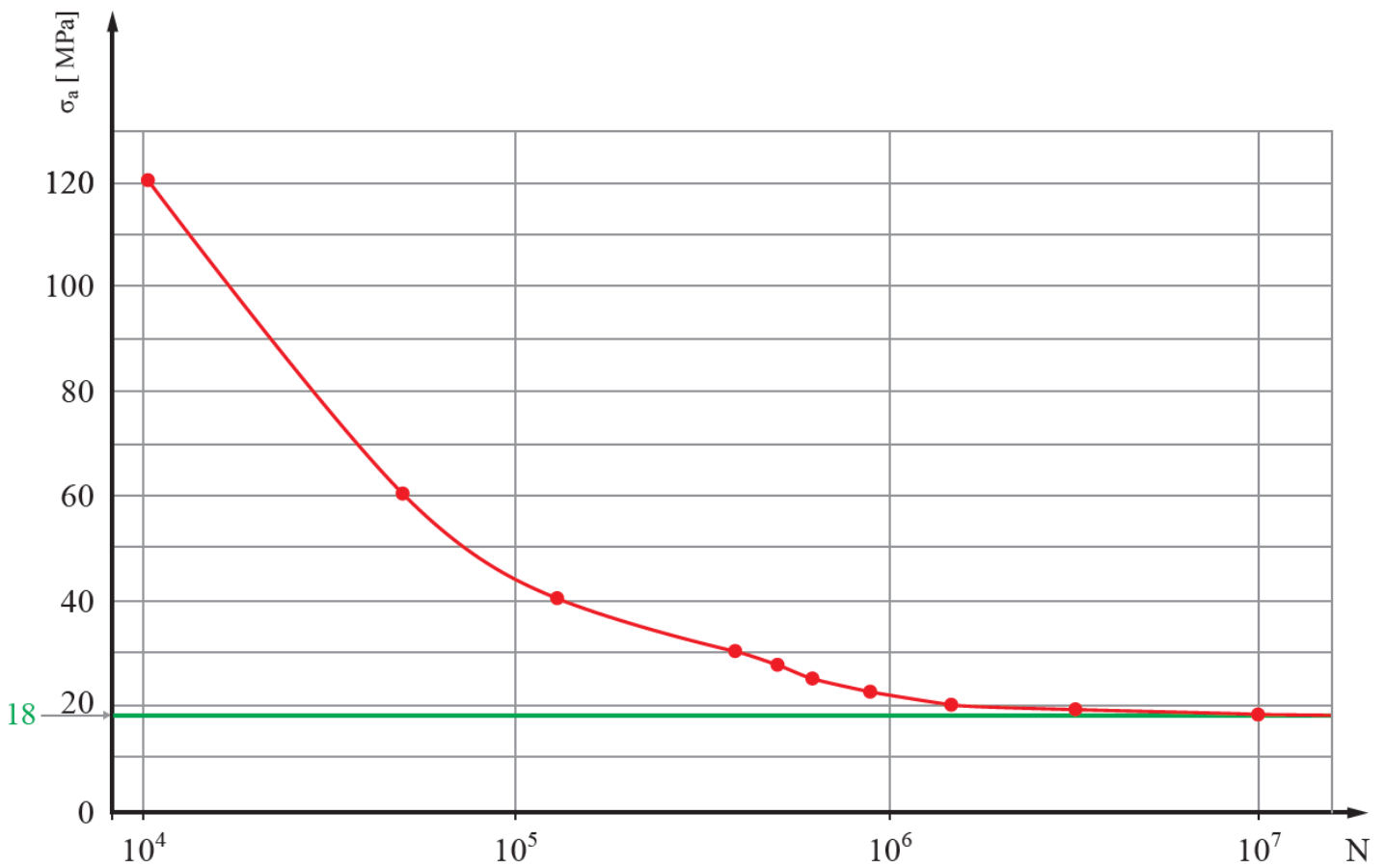


Obrázek 33 Cyklické zatěžování střídavé souměrné

Vzorek při střídavém působení síly vydržel více než 10^7 cyklů při namáhání 18 MPa. Mez kluzu je vyznačena zeleně na následujícím grafu s Wöhlerovou křivkou.

Tabulka 6 Výsledky cyklické zkoušky v krutu

Počet cyklů [N]	Napětí [MPa]
10 334	120,00
50 384	60,00
130 000	40,00
394 238	30,00
509 963	27,50
633 274	25,00
900 000	22,50
1 500 609	20,00
3 239 000	19,00
10 000 000	18,00



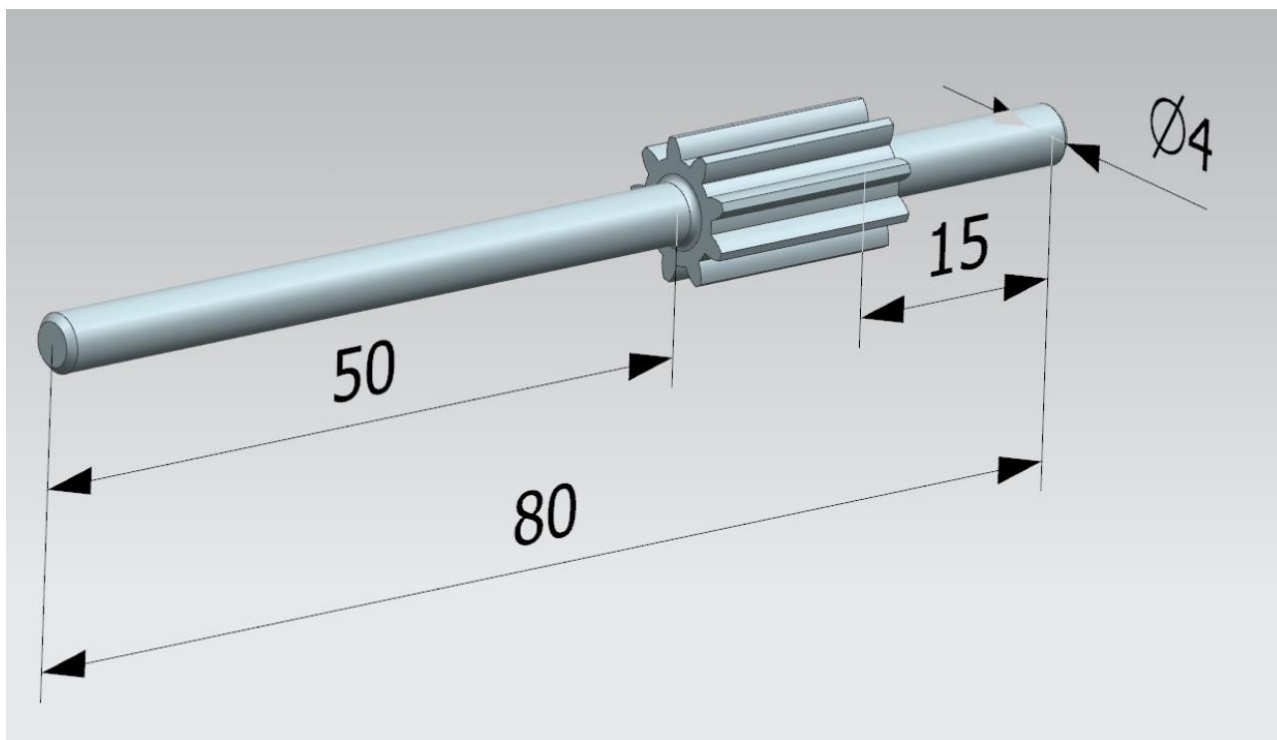
Obrázek 34 Wöhlerova křivka pro vzorek 45 ° v krutu

6 Příklad konstrukčního řešení

Pro aplikaci výsledků měření je navržen příklad konstrukčního řešení. Jedná se o osu s ozubením, která je i včetně prostorových kót zobrazena na obrázku 35. Rozměry této osy s ozubením odpovídají rozměrům vzorků použitých při experimentálním měření.

Pro konstrukční aplikaci nabytých poznatků je nutné zvolit takové zpracování, které je možné namáhat kombinovaným zatěžováním v tahu a krutu, a tak plně využít nové poznatky. Tento konstrukční návrh je inspirován projektem, který byl vypracován jako součást studijní náplně.

Z vyhodnocení výsledků vyplývá, že díly vyrobené z materiálu $AlSi_{10}Mg$ metodou DMLS, které jsou vyrobeny s orientací tisku 45° vůči základně, jsou vhodné k použití v průmyslové praxi.



Obrázek 35 Osa s ozubením

7 Diskuse

Při výrobě dílů 3D tiskem, je podle výsledků ze zvažovaných variant 0 °, 45 °, 90 ° nejvýhodnější využít při tisku 45° orientaci za předpokladu, že díl bude při používání namáhán zároveň na tah i krut.

Pro ucelený pohled by bylo vhodné doplnit tuto práci o srovnání s konvenčně vyrobeným vzorkem. Touto problematikou se zabýval například Bc. Tomáš Hlobil ve své diplomové práci. [25] Porovnáva výsledky statické zkoušky v tahu pro tištěné vzorky a tvářené vzorky. Na základě provedených zkoušek konstatuje, že na rozdíl od konvenčních vzorků mají vzorky vyrobené 3D tiskem až dvojnásobnou tažnost a také mají oproti konvenčním vzorkům zhruba o 30 % nižší pevnost.

Tvrzení, že tištěné vzorky mají o 30 % nižší pevnost a dvojnásobnou tažnost, nelze aplikovat plošně, protože autor vychází z konkrétních podmínek, jejichž obměna může mít vliv na konkrétní tvrzení. Například změna vzorku, rozdíl mezi plochým a válcovým vzorkem, dále orientace, která nebývá často zvažována a případně další faktory. Výsledky této práce potvrdily, že orientace vzorku při tisku má vliv na výsledné mechanické vlastnosti vyrobeného vzorku.

Pro rozšíření poznatků v navazující rozšiřující práci se nabízí možnost porovnání 3D tištěných vzorků s více rozdílnými orientacemi a vzorků vyrobených různými konvenčními způsoby. Dalším hodnotícím faktorem může být tepelné zpracování vzorků, a následné zkoumání reakcí vzorků na tepelné zpracování, protože je pravděpodobné, že tištěné vzorky budou na tepelné zpracování reagovat odlišnou změnou vlastností. Výsledné vlastnosti vzorků mohou být ovlivněny i hrubostí povrchu a tloušťkou vrstvy při tisku.

Výrobce deklarované hodnoty jsou v kapitole 5.5.1 porovnány s experimentálně zjištěnými hodnotami a z porovnání vyplývá, že vertikální vzorky dosáhly zatížení o několik desítek MPa větší, než deklaruje výrobce. Vzorky s horizontální orientací dosáhly zatížení, které odpovídá toleranci výrobce.

8 Doporučení pro praxi

Pro tvarově náročné díly lze aplikovat 3D tisk. Pokud zatěžování dílu nepřekoná stanovené meze, lze uplatnit 3D tisk metodou DMLS. Pro efektivní využití 3D tisku je nutné zvážit poměr mezi cenou konvenčně vyráběných dílů a cenou dílů vyrobených 3D tiskem. Velký vliv na porovnání cen má i rozsah výroby, protože při velkém objemu výroby se 3D tisk stává finančně nevýhodným.

Experimentálně zjištěné hodnoty lze uplatnit jako vstupní parametry pro simulační programy. Metodou konečných prvků lze získané hodnoty aplikovat na modely odlišných rozměrů a tvarů.

Závěr

Cílem této práce bylo stanovit životnost a experimentálními metodami stanovit únavové charakteristiky kovového materiálu v tahu a krutu, který byl vytvořen technologií 3D tisku DMLS. Dále bylo cílem zkoumat vliv orientace vzorku při tisku na finální mechanické vlastnosti tištěného vzorku.

V této práci byl statickou a cyklickou zkouškou potvrzen předpoklad vlivu orientace 3D tisku na mechanické vlastnosti tištěných vzorků z materiálu AlSi10Mg. Byla provedena statická zkouška u vzorků, které byly tištěny různou orientací. Jako orientace byly zvoleny následující úhly 0 °, 45 ° a 90 °. Dle výsledků statické zkoušky se pro namáhání v tahu jeví jako nejlepší vertikální (0 °) orientaci tisku, kdy jsou vlákna tištěna ve směru namáhání. Pro namáhání v krutu je dle výsledků nejvhodnější horizontální orientace (90 °). Dále lze konstatovat, že objekty tištěné pod úhlem 45 ° představují kompromis mezi oběma předchozími variantami a vykazují nejlepší vlastnosti, pokud je jejich zamýšlené namáhání určeno pro krut i tah.

Dle výše zmíněného byla provedena dynamická zkouška cyklickým namáháním pouze pro strukturu 45 °. Výsledky zkoušky ukázaly, že zkoušený vzorek při cyklickém namáhání dosáhne meze únavy v tahu 49 MPa a v krutu 18 MPa a tyto hodnoty jsou pro praktickou aplikaci dostačující.

Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že daný materiál AlSi10Mg při využití technologie DLMS a při orientaci vzorků 45 ° je vhodný pro aplikaci v praxi. Využití může například najít při výrobě prototypů, dále v malosériové, nebo sériové výrobě.

Navržené konstrukční řešení představuje příklad využití, kdy lze při určitých podmínkách nahradit konvenční způsoby výroby 3D tiskem bez negativního ovlivnění funkčnosti.

Vzhledem k potenciálu využití materiálu AlSi₁₀Mg i 3D tisku jsou tyto poznatky aplikovatelné v praxi a umožní úsporu zdrojů a další technologický rozvoj.

Zdroje

- [1] SHAHRUBUDIN, N., T.C. LEE a R. RAMLAN. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications [online]. 2019 [cit. 2020-01-25]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919308169>
- [2] DESKTOP 3D PRINTED PARTS CAN BE AS TOUGH AS INDUSTRIAL AND ST3P3D SHOWS YOU HOW [online]. [cit. 2020-01-27]. Dostupné z:
<https://3dprintingindustry.com/news/desktop-3d-printed-parts-can-tough-industrial-st3p3d-shows-30958/>
- [3] Prusa software update makes 3D printing water-soluble supports easier than ever [online]. [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20170821-prusa-software-update-makes-3d-printing-water-soluble-supports-easier-than-ever.html>
- [4] Simplify3D pro přípravu 3D tisku přichází s verzí 4.0 a řadou novinek [online]. [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/simplify3d-pro-pripravu-3d-tisku-prichazi-s-verzi-4-0-a-radou-novinek/>
- [5] Informace o technologiích 3D tisku [online]. [cit. 2020-01-30]. Dostupné z:
<http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- [6] PEKO, Ivan, Ivan ŠPAR a Andrej BAŠÍČ. Rapid Prototyping of Mechanical Measurement Level Device [online]. [cit. 2020-01-30]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/308367161_Rapid_Prototyping_of_Mechanical_Measurement_Level_Device
- [7] VAROTSIS, Alkaios Bournias. Introduction to metal 3D printing [online]. [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing/#what>
- [8] Přehled technologií 3D tisku [online]. [cit. 2020-02-23]. Dostupné z:
<http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>

- [9] Fused Deposition Modeling (FDM) [online]. [cit. 2020-02-12]. Dostupné z:
<https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [10] Stereolithography [online]. [cit. 2020-02-16]. Dostupné z:
<https://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [11] Direct Metal Laser Sintering [online]. [cit. 2020-02-12]. Dostupné z:
<https://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
- [12] Metal 3D Printing and Its Applications [online]. [cit. 2020-03-09]. Dostupné z:
https://www.materialise.com/system/files/resources/Whitepaper_Metal%203D%20Printing_E.pdf
- [13] BUMBÁLEK, Leoš. Kontrola a měření: pro SPŠ strojní. Praha: Informatorium, 2009. ISBN 978-80-73330-72-9.
- [14] DILLINGER, Josef. Moderní strojírenství pro školu i praxi. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [15] Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení [online]. [cit. 2020-02-29].
Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
- [16] SVOBODA, Jaroslav. Cyklické namáhání, druhy cyklických namáhání, stanovení meze únavy vzorku [online]. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z:
http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_11-18.pdf
- [17] FKM-Guideline: Analytical strength assessment of components in mechanical engineering. Frankfurt am Main: VDMA Verlag, 2003. ISBN 38-163-0425-7
- [18] Únava materiálu [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z:
<https://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P10.pdf>
- [19] Dowling, N.E. Mechanical behavior of materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture and fatigue. Third edition. Pearson Prentice Hall, 2007. ISBN 0-13-186312-6

[20] PÍŠEK, František. *Nauka o materiálu I*, 3. svazek : neželezné kovy: Academia Praha, 1973. 595 s.

[21] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4

[22] Katalogové listy - aditivní výroba: Data sheet: AlSi10Mg-0403 (400 W) powder for additive manufacturing Data sheet: AlSi10Mg-0403 (400 W) powder for additive manufacturing [en]. <https://www.renishaw.cz> [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/katalogove-listy-aditivni-vyroba--17862>

[23] GRUBER, Josef. *Mechanika II, Pružnost a pevnost* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/mec_uceb/mec2_txt.pdf

[24] PLÁNIČKA, F., M. ZAJÍČEK a V. ADÁMEK. *Kombinované namáhání* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.kme.zcu.cz/kmet/pp/kombinovane-namahani/kombinovane-namahani.pdf>

[25] HLOBIL, Tomáš. *Vlastnosti oceli AISI 316 připravené 3D tiskem* [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/128892>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

Přílohy

Příloha č. 1 – Výkres zkušební tyče