



**FAKULTA
ŠTROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

**Vliv zbytkových pnutí v součásti na její
únavovou pevnost**

**The impact of residual stresses of a
component on its fatigue strength**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

Bc. Petr KOLOVRÁTNÍK

Studijní program: Aplikované vědy ve strojním inženýrství

Studijní obor: Aplikovaná mechanika

Vedoucí práce: Ing. Jan Papuga, Ph.D.

FAKULTA STROJNÍ
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
DĚKAN



V Praze dne 26. 10. 2023

Pan
Bc. Petr Kolovrátník
Hněvčeves 66
503 15 Nechanice

Věc: Stanovení způsobu přepracování Diplomové práce a termínu odevzdání

V souladu s článkem 17, odstavec (5) Studijního a zkušebního řádu pro studenty ČVUT v Praze a na základě doporučení komise pro SZZ ze dne 21. června 2023, která s přihlédnutím k přiloženým posudkům, konstatovala, že přepracovaná DP by měla odpovídat svým rozsahem obvyklým standardům vypracování DP na FS ČVUT v Praze, Vám stanovuji následující:

1. Doplnit rešeršní část DP o podrobnější komentář k jednotlivým vlivům na únavu.
2. Nalézt a převzít do DP vhodná únavová experimentální data s prokazatelným vlivem zbytkových napětí.
3. Doplnit teoretickou část o další metody zahrnující zbytková napětí do výpočtu, rozšířit a zkvalitnit jejich popis např. o oblast jejich platnosti/použitelnosti na základě informací získaných z dostupné literatury, šířeji komentovat jejich kalibraci apod.
4. Provést validaci vybraných metod a důsledně zhodnotit získané výsledky, vyvodit závěry.

V souladu s článkem 17, odstavec (3) Studijního a zkušebního řádu pro studenty ČVUT v Praze Vám stanovuji náhradní termín odevzdání přepracované (doplněné) Diplomové práce na pátek dne **19. ledna 2024**.

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.

v z. doc. Ing. Jan Skočilas, Ph.D.
PRODĚKAN PRO PEDAGOGICKOU ČINNOST

Převzal osobně dne: 15. 11. 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Vliv zbytkových pnutí v součásti na její únavovou pevnost“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Papugy, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Petr KOLOVRÁTNIK

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Papugovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a podporu při tvorbě této diplomové práce. Dále chci poděkovat Ing. Jiřímu Čapkovi, Ph.D. za provedení měření zbytkových napětí a Ing. Tomáši Vrbatovi za asistenci při provádění únavových zkoušek.

Anotační list

Jméno autora: Petr Kolovrátník
Název práce: Vliv zbytkových pnutí v součásti na její únavovou pevnost
Anglický název: The impact of residual stresses of a component on its fatigue strength

Rok: 2024
Studijní program: Aplikované vědy ve strojním inženýrství
Obor studia: Aplikovaná mechanika
Ústav: Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedoucí práce: Ing. Jan Papuga, Ph.D.
Bibliografické údaje: počet stran 40
počet obrázků 28
počet tabulek 7

Klíčová slova: únava materiálu, únavová pevnost, zbytkové napětí

Keywords: materiál fatigue, fatigue strength, residual stress

Anotace:
Tato diplomová práce se zabývá vlivem zbytkových napětí v součásti na její únavovou pevnost. V úvodní části je teoretický úvod do dané problematiky. Dále jsou provedeny únavové experimenty a analýza výsledků s cílem nalézt způsob, jak správně předpovědět únavovou životnost.

Abstract:
This master's thesis deals with effect of residual stresses in a component on its fatigue strength. The introductory part contains a theoretical introduction to the issue. Furthermore, fatigue experiments and analysis of the results are carried out in order to find a way to correctly predict the fatigue life.

1	Úvod.....	- 3 -
2	Únava materiálu	- 4 -
2.1	Cyklické zatížení.....	- 4 -
2.2	Wöhlerova křivka.....	- 5 -
2.2.1	Oblasti Wöhlerovy křivky.....	- 6 -
2.2.2	Matematický popis	- 7 -
2.3	Faktory ovlivňující únavu	- 8 -
2.3.1	Střední hodnota napětí.....	- 8 -
2.3.2	Absolutní velikost tělesa.....	- 9 -
2.3.3	Koncentrátory napětí.....	- 9 -
2.3.4	Jakost a úprava povrchu	- 10 -
2.3.5	Ostatní	- 10 -
3	Zbytkové napětí	- 12 -
3.1	Vliv zbytkových napětí na životnost	- 12 -
3.2	Mechanismy vzniku zbytkových napětí.....	- 13 -
3.2.1	Mechanické zatížení	- 13 -
3.2.2	Tepelné zatížení.....	- 13 -
3.2.3	Chemické procesy.....	- 13 -
3.2.4	Kombinace vlivů.....	- 13 -
3.3	Metody měření zbytkových napětí.....	- 13 -
3.4	Difrakční analýza.....	- 14 -
3.4.1	Braggova podmínka	- 14 -
3.4.2	Určení deformace a výpočet napětí	- 15 -
3.4.3	Metoda „ sin2ψ “	- 16 -
4	Existující metody korekce vlivu zbytkových napětí	- 18 -
4.1	Faktor intenzity napětí K	- 18 -
4.2	Analogie se středním napětím.....	- 18 -
5	Analyzované datové sety	- 20 -
6	Experimentální část	- 23 -
6.1	Vzorky	- 23 -
6.2	Měření drsnosti	- 24 -



6.3	Měření zbytkových napětí	- 24 -
6.4	Měření únavy.....	- 27 -
7	Výsledky.....	- 30 -
7.1	Eliminace vlivu drsnosti	- 30 -
7.2	Analýza naměřených dat	- 32 -
8	Závěr	- 35 -
	Seznam zkratk a symbolů	- 36 -
	Seznam použité literatury	- 37 -
	Seznam obrázků	- 39 -
	Seznam tabulek	- 40 -

1 Úvod

Cílem této diplomové práce je určit, jaký vliv mají zbytková napětí v součásti na její únavovou pevnost a životnost. Správná predikce životnosti je v současné době kritická pro návrh dynamicky namáhaných součástí. V minulosti došlo k celé řadě havárií s obrovskými ztrátami jak materiálními, tak lidskými, právě díky selhání cyklicky namáhané součásti. Z těchto nehod je třeba se poučit, správně identifikovat příčinu vzniku poškození a pokusit se ji co nejpřesněji popsat, aby bylo možné v budoucnu zabránit stejnému selhání. Na životnost má vliv spousta různých parametrů a jedním z nich je právě zbytkové napětí, které se v součástech může vyskytovat jak cíleně, právě pro zvýšení životnosti, tak jako nežádoucí efekt technologie výroby nebo provozu, který může výrazně zkrátit dobu životnosti.

V teoretické části této práce jsou shrnuty důležité znalosti pro pochopení dané problematiky únavy a zbytkových napětí. Dále jsou prezentovány možné postupy výpočtu únavové životnosti s vlivem zbytkových pnutí a jejich analýza. V experimentální části je popis prováděných měření a jejich výsledky.

2 Únava materiálu

Pokud je součást během svého provozu vystavována v čase proměnnému zatížení, je při jejím návrhu nutné brát v potaz její únavovou pevnost a životnost. Tím se rozumí navrhnout rozměry a geometrii součásti tak, aby při daném maximálním dynamickém zatížení nedošlo během navrhované doby provozu k jejímu porušení nebo jinému poškození zamezující její správné funkčnosti vlivem postupné degradace materiálu. Hodnota tohoto maximálního dynamického zatížení je výrazně nižší než statická mez pevnosti materiálu. [3]

Únava materiálu je jev, při kterém vlivem cyklického zatěžování dochází v součásti v místech koncentrace napětí k vzniku plastických deformací, což vede k vzniku a kumulaci poškození. Dochází k iniciaci a růstu trhliny a v mezním stavu k lomu součásti. Na rozdíl od statického zatížení je mezní hodnota cyklického napětí, při které již nedochází k degradaci materiálu, výrazně nižší. Vzhledem k tomu, že velké množství součástí je v provozu vystavováno právě opakovanému zatížení, je důležité znát a počítat s touto takzvanou mezí únavy.

Mez únavy je hodnota napětí, při které daný materiál vydrží teoreticky nekonečně mnoho cyklů zatížení. Tato hodnota se zjišťuje experimentálně a pro její určení se používají vzorky, které jsou leštěné, nevrubované a měření probíhá v kontrolovaných laboratorních podmínkách s předem daným průběhem zatěžování, který je harmonický s konstantní amplitudou napětí. V praxi se ovšem takové ideální vzorky nevyskytují, součásti mají různé tvary, velikosti, úpravy povrchů a průběh jejich zatížení v čase není vždy ideální. Všechny tyto nedokonalosti mají negativní vliv na mez únavy a naším cílem je co nejpřesněji určit, jak velké tyto vlivy jsou, pro co nejpřesnější předpověď životnosti součásti.

2.1 Cyklické zatížení

Pro správný návrh životnosti je nutné znát přesný popis průběhu zatěžování součásti v čase. Ne vždy je možné získat přesný matematický popis, protože v praxi může být zatížení z části náhodné. V takovém případě se dají použít stochastické metody pro odhad průběhu zatížení a přepočítání na matematický popis s ekvivalentní životností.

Pro účely této práce budu uvažovat harmonický průběh s jednoosým zatížením a s konstantní hodnotou amplitudy, který je znázorněn na Obr. 1. Takový průběh je běžně používán v experimentálních metodách a při určování životnosti materiálu, protože je snadno dosažitelný a jeho popis je jednoduchý. Lze popsat následujícími veličinami:

- Amplituda napětí: σ_a
- Střední napětí: σ_m
- Horní napětí: σ_h
- Dolní napětí: σ_d

- Rozkmit napětí: $\Delta\sigma$
- Koeficient asymetrie: R

Průběh zatěžování lze popsat kombinací dvou těchto veličin, ze kterých je možné dopočítat veličiny ostatní pomocí následujících vztahů:

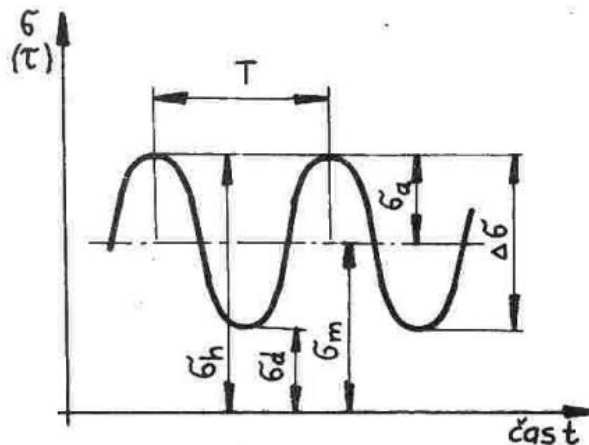
$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_h - \sigma_d$$

$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h}$$

(1)



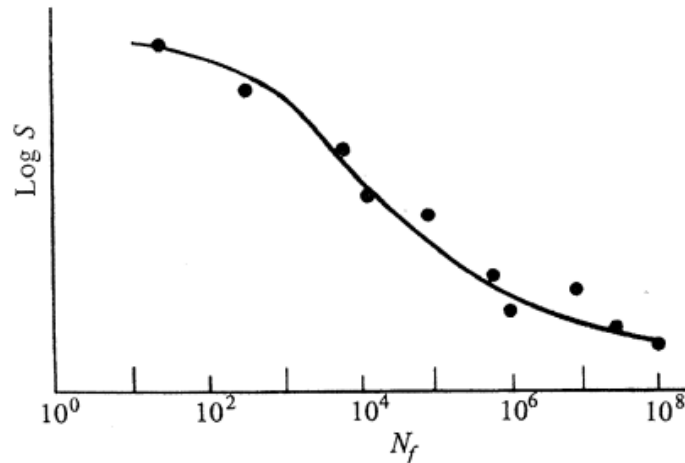
Obr. 1: Harmonický průběh zatížení v čase [3]

Koeficient asymetrie značí poměr mezi dolní a horní hodnotou napětí. Lze z něj určit, zda se jedná o zatížení pulzující, kdy mají horní a dolní napětí stejné znaménko, míjivé, při kterém je horní nebo dolní napětí rovno nule, nebo symetrické, u kterého je střední hodnota rovna nule a horní a dolní napětí mají stejnou hodnotu a opačné znaménko.

2.2 Wöhlerova křivka

Jednou z nejpoužívanějších křivek při analýze únavového života součásti je tzv. Wöhlerova křivka, pojmenovaná po Augustu Wöhlerovi (1819-1914), jinak známá jako S-N křivka, z anglického *stress* (napětí) a *number of cycles* (počet cyklů). Slouží zejména pro vizualizaci experimentálních dat získaných z únavových testů, která jsou z S-N křivky snadno čitelná a názorná. Příklad dat zanesených v S-N křivce je na Obr. 2. Tato data mohou být získána za různých podmínek a s odlišnými parametry jako jsou například geometrie vzorku, koeficient asymetrie, teplota nebo kvalita povrchu, proto je důležité u grafu uvádět podmínky, za kterých byla daná křivka měřena. Jak z názvu S-N křivky vyplývá, zobrazuje

vztah mezi amplitudou zatížení a počtem cyklů, které vzorek vydrží, než nastane předem definovaný konec testu. To může být například přetržení vzorku nebo dosažení určité velikosti trhliny a tím pádem poklesem tuhosti.



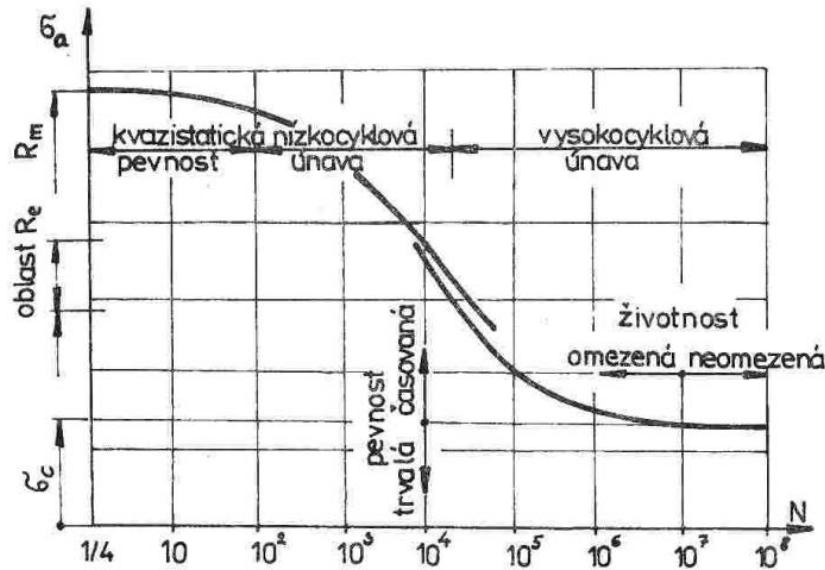
Obr. 2: Experimentální data zanesená v S-N křivce [10]

Na vertikální ose je vynesena amplituda napětí. Hodnoty se běžně uvádějí v jednotkách MPa (megapascal), avšak ve starších publikacích lze narazit i na jednotky ksi (kilolibra na čtverečný palec). Měřítka se používá logaritmické i lineární.

Horizontální osa slouží k vynesení počtu cyklů do selhání vzorku a její měřítko je logaritmické z důvodu rozložení hodnot přes několik dekád. Další výhodou logaritmického měřítka kromě lepší čitelnosti je často pozorovatelný lineární trend zanesených dat.

2.2.1 Oblasti Wöhlerovy křivky

Horizontální osa Wöhlerovy křivky lze rozdělit do čtyřech oblastí, jak je znázorněno na Obr. 3. Levá část, kde je křivka téměř horizontální, se nazývá kvazistatická, protože hodnoty napětí se zde blíží statické mezi pevnosti R_m a vzorky dosahují počtu cyklů pouze v řádech jednotek nebo desítek. Jak postupujeme na křivce směrem doprava, nastává pokles a dostáváme se do oblastí nízkocyklové a vysokocyklové únavy (LCF a HCF), které jsou pro popis únavového života nejdůležitější a nejlépe popsané. Hranice mezi těmito oblastmi není přesně definovaná a na grafu není přímo viditelná, ale běžně vyskytuje mezi 10^4 a 10^5 cykly a napětí dosahuje oblasti meze kluzu R_e . V oblasti nízkocyklové únavy jsou hodnoty napětí stále velmi vysoké proto dochází k výrazné plastické deformaci, zatímco vysokocyklové únava vykazuje minimum plastických deformací díky výrazně menším hodnotám zatížení a dochází k transkrystalickému lomu. Při dalším postupu směrem doprava se křivka opět stává téměř horizontální a hodnota napětí se blíží k mezi únavy, což je hodnota, u které se předpokládá teoreticky nekonečný únavový život a nastává při počtech cyklů mezi 10^7 a 10^9 . Oblast za tímto počtem cyklů se nazývá gigacyklová únava a ta je charakteristická vznikem poškození kvůli nehomogenitám v materiálu na krystalické úrovni. Experimentálně je tato oblast téměř neprozkoumaná. [3] [6]



Obr. 3: Oblasti Wöhlerovy křivky [3]

2.2.2 Matematický popis

Pro možnou předpověď únavové životnosti z naměřených experimentálních dat je třeba matematicky popsat vztah mezi zatížením a počtem cyklů. Nejjednodušší a nejjednodušší model je takzvaný mocninný zákon (2), který popisuje lineární část Wöhlerovy křivky v logaritmických souřadnicích, kde N je počet cyklů, σ_a je amplituda napětí a C a w jsou empirické konstanty určené regresí naměřených dat.

$$N \cdot \sigma_a^w = C \quad (2)$$

Další matematický model popisující lineární část křivky je Basquinův model (3), který lze získat přepočtem z mocninného vztahu (2). Proměnné N a σ_a jsou stejné a b a σ_f' jsou opět empiricky určené konstanty.

$$\sigma_a = \sigma_f' \cdot (2N)^b \quad (3)$$

Kromě matematických modelů popisující pouze lineární oblast S-N křivky existují i modely s více parametry, které zohledňují zakřivení v oblasti přechodu mezi kvazistatickou a vysokocyklovou únavou a v oblasti meze únavy. Jedním z těchto modelů je Kohout-Věchet (4), který je použitý pro regresí naměřených dat v této práci.

$$\sigma_a = A \cdot \left(\frac{N + B}{N + C} \right)^\beta \quad (4)$$

2.3 Faktory ovlivňující únavu

Na tvar Wöhlerovy křivky má vliv spoustu faktorů, které mohou urychlovat nebo zpomalovat vznik a šíření poškození. Pro referenční křivku daného materiálu se obvykle používá jednoosé střídané zatížení ($R = -1$) na hladkých leštěných vzorcích. Při zjišťování vlivu konkrétního faktoru je poté důležité co nejlépe eliminovat vliv všech ostatních faktorů a sledovat změny oproti referenční křivce.

2.3.1 Střední hodnota napětí

Významný vliv na životnost materiálu při cyklickém zatěžování má střední hodnota napětí σ_m . Pro tahová střední napětí platí, že únavovou životnost snižují, zatímco tlaková zabraňují rychlejšímu šíření trhliny a mohou tedy životnost prodlužovat. Pro popis existuje několik matematických modelů:

Goodman

$$\sigma_{a,ekv} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{R_m}} \quad (5)$$

Gerber

$$\sigma_{a,ekv} = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m}\right)^2} \quad (6)$$

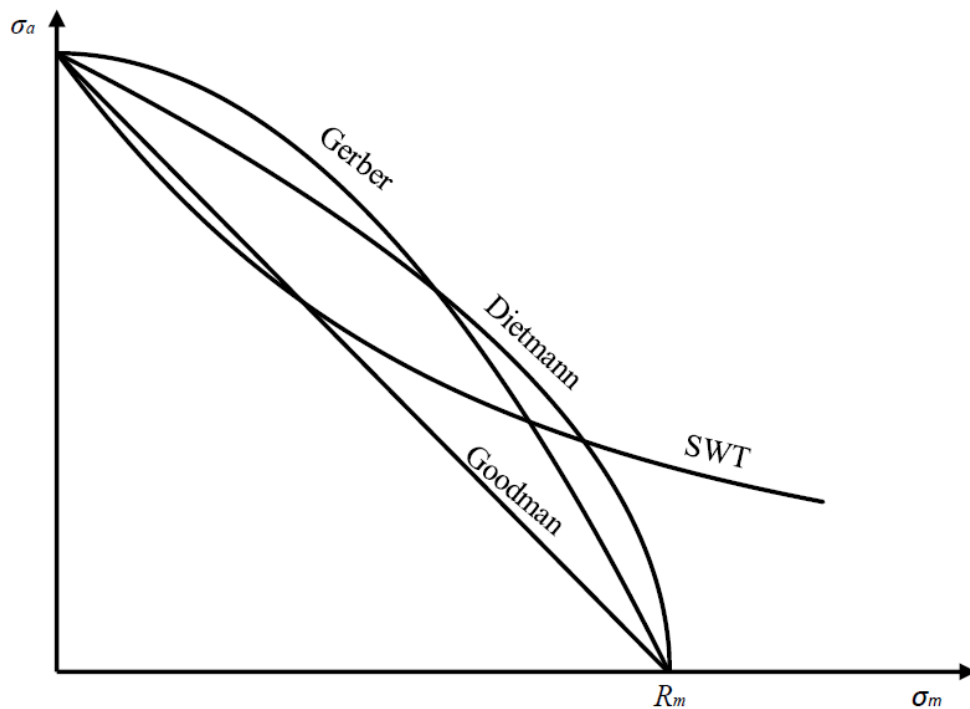
Dietmann

$$\sigma_{a,ekv} = \frac{\sigma_a}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_m}{R_m}}} \quad (7)$$

SWT

$$\sigma_{a,ekv} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m) \cdot \sigma_a} \quad (8)$$

Ke znázornění tohoto vlivu se nejčastěji používá Haighův nebo Smithův diagram. Na Obr. 4 jsou křivky výše uvedených modelů. [6]



Obr. 4: Matematické modely popisující vliv středního napětí v Haighově diagramu. [6]

2.3.2 Absolutní velikost tělesa

Zvětšováním velikosti součásti dochází ke snižování meze únavy. Při homogenní napjatosti (zatížení tahem-tlakem) je to dáno statistickým faktorem, čím větší je namáhaný objem, tím je větší pravděpodobnost, že se v něm nachází slabé místo (nehomogenita materiálu). Pro korekci meze únavy se používá součinitel velikosti $\varepsilon_v < 1$. Velikost má vliv i při nehomogenním rozložení napětí při namáhání ohybem nebo krutem. Při takovém zatížení je napětí v ose součásti nulové a na povrchu maximální. K poruše dojde tehdy, jakmile v dané hloubce pod povrchem dojde k překročení meze únavy. Pro větší tělesa k tomu tedy dojde při menším napětí na povrchu než u těles menších. [3]

2.3.3 Koncentrátory napětí

Koncentrátory napětí se rozumí místo na konstrukci, kde se vlivem geometrie součásti vyskytují při zatěžování napěťové špičky. Mohou to být otvory, rádiusy, zápichy a podobně. V takových místech poté dochází například k lokální plastizaci materiálu a k redistribuci napětí. To má negativní vliv na únavovou životnost a pokud lze, měla by se taková místa eliminovat.

Přesný vliv na mez únavy určíme z konkrétní geometrie vrubu a způsobu zatěžování. Poměr základní a redukované meze únavy se nazývá součinitel vrubu β . Ten je funkcí součinitele tvaru α , který je dán poměrem maximálního napětí ve vrubu a nominálního napětí (takové, které by bylo v součásti bez vrubu), a poloměru vrubu ρ . Níže jsou uvedeny příklady některých modelů. [3]

Neuber

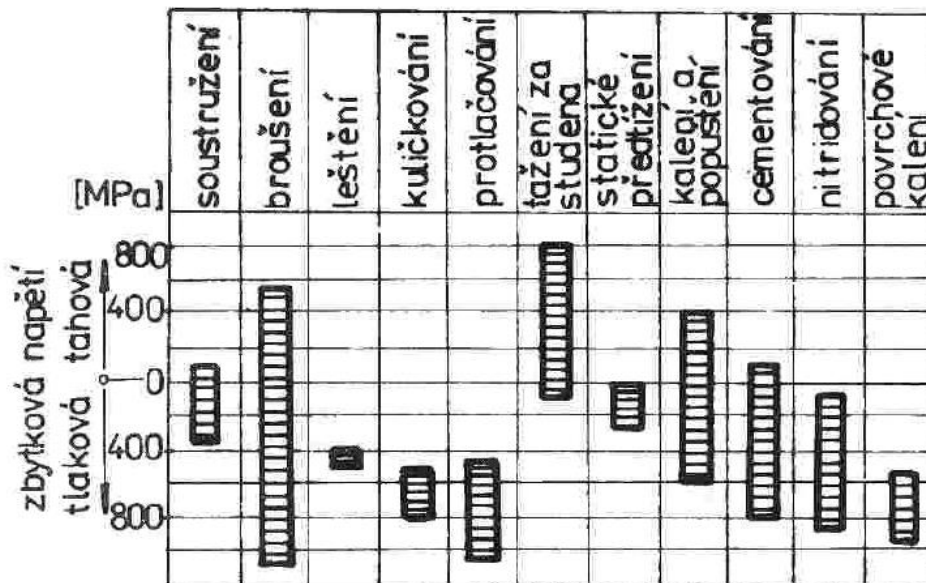
$$\beta = 1 + \frac{\alpha - 1}{1 + \sqrt{A/\rho}} \quad (9)$$

Peterson

$$\beta = 1 + \frac{\alpha - 1}{1 + a/\rho} \quad (10)$$

2.3.4 Jakost a úprava povrchu

K iniciaci únavové trhliny dochází často na povrchu součásti, a proto má na únavovou životnost významný vliv jeho kvalita a úprava. Jedná se především o mechanické, tepelné, chemicko-tepelné nebo elektrochemické úpravy. Vlivem technologie výroby může být dosaženo různé kvality povrchu a také zde mohou vznikat výrazná zbytková pnutí, která se projeví na únavové životnosti. Na Obr. 5 je přehled různých úprav povrchu a jejich vliv na vznik zbytkových pnutí na povrchu součásti. [3]



Obr. 5: Povrchové úpravy a jejich vliv na vznik zbytkových pnutí [3]

2.3.5 Ostatní

Na únavovou životnost má vliv spousta dalších faktorů, od způsobu zatěžování přes kvalitu vzorku až po provozní podmínky. Například při vyšších zatěžovacích frekvencích dojde k dosažení maximálního počtu cyklů za kratší časový úsek a tím pádem se snižuje doba provozu. Frekvence také souvisí s provozní teplotou vzorku, která také ovlivňuje

únavovou životnost. Teplota souvisí s relaxací zbytkových pnutí, s tečením materiálu nebo se vznikem míst lokální plastizaci materiálu.

Spousta vlivů se sebou úzce souvisí, což ztěžuje při experimentech omezení se pouze na jeden vliv a jeho zkoumání.

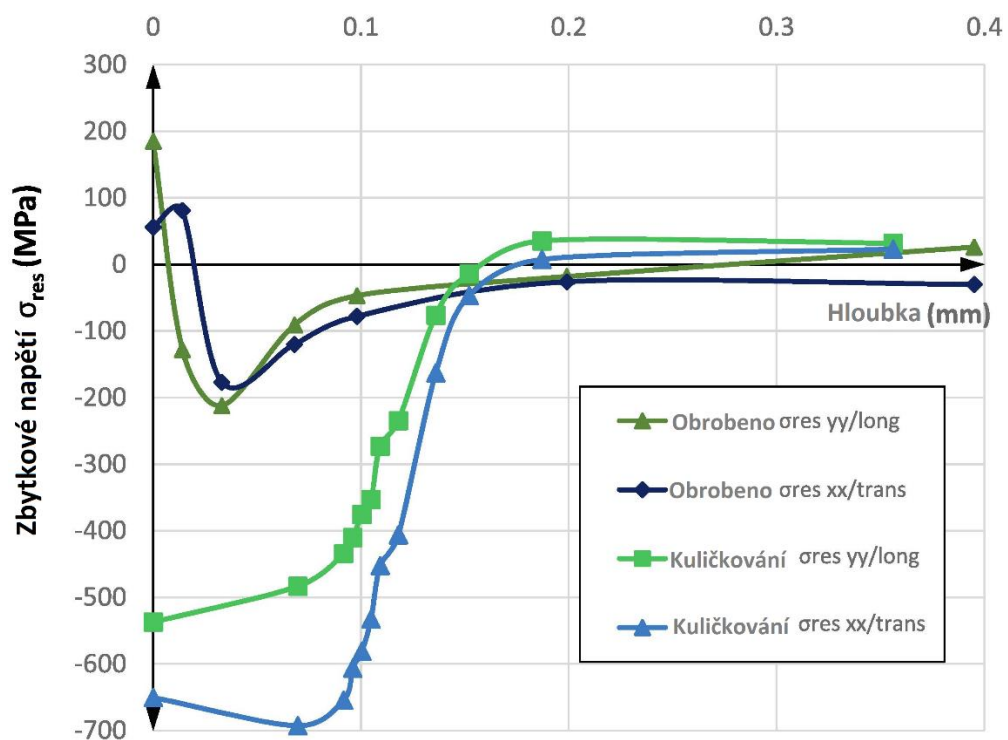
3 Zbytkové napětí

Napjatost v určitém bodě tělesa lze vyjádřit tenzorem druhého řádu, přičemž z momentové rovnováhy materiálového elementu plyne jeho symetrie, tedy 6 nezávislých složek. Pokud na součást (těleso) nepůsobí žádná vnější zatížení v podobě sil nebo momentů a vyskytují se v něm mechanická napětí, nazývají se tato napětí zbytková. Ta jsou způsobena nehomogenním rozložením deformací uvnitř materiálu. Podle velikosti oblasti, ve které se zbytkové napětí nemění, ho třídíme na zbytkové napětí prvního, druhého a třetího druhu (makroskopická, mikroskopická a submikroskopická). [5]

Zbytková napětí prvního druhu jsou homogenní v oblasti o velikosti více zrn materiálu a při jeho existenci dochází k makroskopickým změnám rozměrů tělesa. Pro účel zjištění vlivu zbytkových napětí na únavovou pevnost se omezím pouze na tento druh.

3.1 Vliv zbytkových napětí na životnost

Zbytková napětí vyskytující se v materiálu musí být vždy v celém objemu v rovnováze. Pro únavovou životnost je důležitý průběh napětí pod povrchem, protože to je místo, kde u nízkocyklové a vysokocyklové únavy dochází k iniciaci trhliny. Na Obr. 6 je vidět průběh zbytkového napětí po obrábění a po úpravě kuličkováním. Po obrábění jsou na povrchu zbytková pnutí tahová, zatímco po kuličkování jsou výrazně záporná. Na únavu mají zbytková napětí pod povrchem podobný vliv jako střední hodnota napětí při zatěžování, tedy kladná mají negativní vliv, protože urychlují iniciaci a růst trhliny, a záporná naopak pozitivní, protože růstu trhliny zabraňují. [1]



Obr. 6: Průběh zbytkových napětí pod povrchem tělesa, přeloženo z [11]

3.2 Mechanismy vzniku zbytkových napětí

Zbytková napětí se vyskytují v určitém množství téměř ve všech součástech. K jejich vzniku může docházet již při zpracování materiálu, výrobě polotovarů či při samotné výrobě součásti, ale také při zatížení během provozu.

Lze rozlišit několik mechanismů vzniku zbytkových napětí, které se liší způsobem vložení nehomogenity do materiálu (součásti), mechanická elasto-plastická deformace, lokální změny teplot (teplotní gradienty) nebo chemické procesy. [7]

3.2.1 Mechanické zatížení

Pokud při zatížení tělesa vnější silou dojde v části jeho průřezu k plastické deformaci, zatímco ve zbytku zůstane deformace elastická, dojde při odlehčení ke vzniku lokální trvalé plastické deformace, což zapříčiní nehomogenitu a vznik zbytkových napětí, aby v tělese byla zachována rovnováha. Mezi příklady vzniku patří válcování, tažení za studena, kuličkování, lisování nebo přetížení při provozu. Výsledná napětí pod povrhem mohou být jak záporná (např. kuličkování), tak kladná (např. tažení za studena) [3].

3.2.2 Tepelné zatížení

Při lokálním zahřívání součásti dochází k lokální změně objemu a při následném nerovnoměrném chladnutí vznikají v tělese nehomogenní deformace, a tedy i zbytková napětí. Příčinou vzniku zbytkových napětí tímto způsobem je například svařování, odlévání nebo kalení. Výsledná zbytková napětí pod povrhem bývají kladná, což má negativní vliv na únavovou životnost. Další tepelný proces ovlivňující zbytková napětí je žíhání na odstranění pnutí, které má za cíl vzniklá zbytková napětí eliminovat.

3.2.3 Chemické procesy

K vnesení nehomogenit do materiálu může docházet i vniknutím částic cizích látek například při absorpci nebo difuzi. Příkladem může být galvanické pokovování nebo koroze.

3.2.4 Kombinace vlivů

Mezi nejčastější výrobní technologie patří obrábění, kde vznik zbytkových napětí způsobuje jak plastické přetvoření materiálu, tak výrazné tepelné zatížení. Kombinací různých obráběcích parametrů můžou vznikat jak kladná, tak záporná zbytková napětí. Vliv různých typů frézování je popsán v [15].

3.3 Metody měření zbytkových napětí

Principem metod měření zbytkových napětí je zjištění deformace a následný dopočet mechanického napětí, protože napětí jako takové nelze měřit přímo. Tyto metody mohou být jak destruktivní, tak nedestruktivní. K destruktivním metodám se řadí většina mechanických metod, které jsou založeny na postupném porušování materiálu (narušení rovnováhy) a pozorování deformace, ke které dochází při přechodu do nového stavu rovnováhy. Mezi nedestruktivní metody patří například metody difrakční, které měří

deformaci krystalových mřížek. Jsou schopné měřit zbytková napětí na povrchu tělesa do hloubky řádově několika mikrometrů, pro získání zbytkových napětí ve větší hloubce je nutné postupně odebírat vrstvy materiálu tak, aby nedocházelo k ovlivnění stavu napjatosti, například pomocí postupného odleptávání. Dalšími příklady nedestruktivních metod jsou metody ultrazvukové, magnetické nebo optické. [7]

Konkrétní příklady mechanických metod pro měření zbytkových napětí:

- Odvrtávací metoda
- Metoda sloupku
- Dělicí metoda
- Metoda kontur

Tyto metody jsou detailně popsány v [7] a [16].

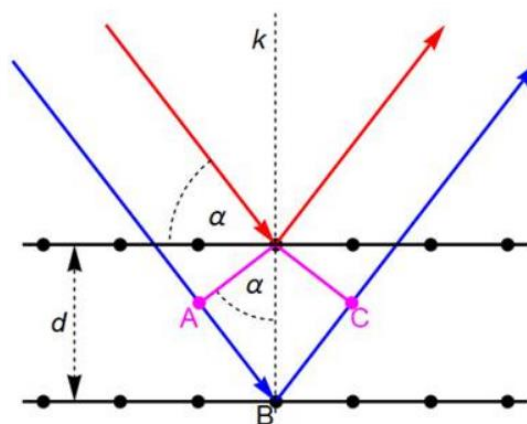
V této práci se detailněji budu zabývat difrakční analýzou, protože právě tato metoda byla použita pro získání zbytkových napětí v experimentální části této práce.

3.4 Difrakční analýza

Cílem této metody je určit mřížkové deformace a z nich přepočtem získat zbytková napětí. Toho se dosáhne ozařováním vzorku rentgenovým paprskem a pozorováním rozptylu záření na krystalové mřížce. Maximální hloubka měření tímto způsobem je 15-50 μm , takže tato metoda je vhodná primárně pro určení zbytkových napětí na povrchu tělesa, a ne pro získání celého průběhu pod povrchem. Protože v rámci této práce jsou důležitá právě zbytková napětí na povrchu, jelikož ta mají největší vliv na únavovou životnost, je tato metoda vhodná.

3.4.1 Braggova podmínka

Uvažujme dvě navzájem kolmé roviny v krystalickém materiálu. Při dopadu záření dochází k odrazu a vytvoření interferenčního maxima, pokud paprsky odražené od atomů v různých rovinách navzájem interferují. [19]



Obr. 7: Schéma dopadu paprsků na dvě rovnoběžné krystalické roviny [19]

Aby došlo k interferenci modrého a červeného paprsku, musí být vzdálenost $|AB| + |BC|$ rovna k -násobku vlnové délky záření. Zároveň platí $|AB| = |BC| = d \cdot \sin(\alpha)$. Braggův zákon lze potom psát ve tvaru:

$$2d \cdot \sin(\alpha) = k \cdot \lambda \quad (11)$$

3.4.2 Určení deformace a výpočet napětí

Pokud d_0 je vzdálenost krystalických rovin bez přítomnosti zbytkového napětí, pak je mřížková deformace ve dána vztahem

$$\varepsilon_{mř} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad (12)$$

kde $d_{\phi\psi}$ je naměřená vzdálenost krystalových rovin ve směru definovaném úhly ϕ a ψ , viz Obr. 8.

Základním vztahem pro výpočet tenzoru napětí je rozšířený Hookův zákon

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1 + \nu} \left[\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\nu}{1 - 2\nu} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \right] \quad (13)$$

kde E je Youngův modul pružnosti, ν je Poissonova konstanta a δ_{ij} je Diracovo delta.

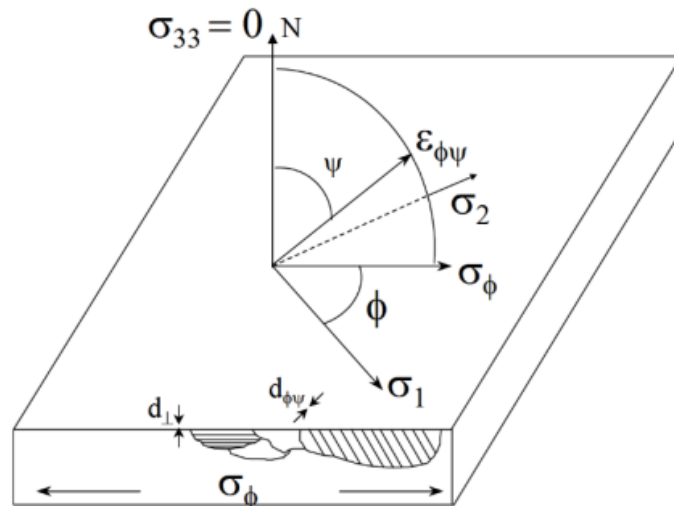
Transformací Hookova zákona do systému $\phi\psi$ dostaneme za předpokladu rovinné napjatosti na povrchu tělesa vztah pro výpočet deformace. [8]

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1}{2} s_2 (\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \psi + s_1 (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (14)$$

kde s_1 (15) a s_2 (16) jsou takzvané rentgenografické konstanty, které je vhodné určovat experimentálně pro každý systém rovin hkl samostatně kvůli elastické anizotropii. [8]

$$s_1 = -\frac{\nu}{E} \quad (15)$$

$$\frac{1}{2} s_2 = \frac{1 + \nu}{E} \quad (16)$$



Obr. 8: Schéma ukazující difrakční roviny rovnoběžné s povrchem a pod úhlem $\phi\psi$. Napětí σ_1 a σ_2 leží v rovině povrchu vzorku. [8]

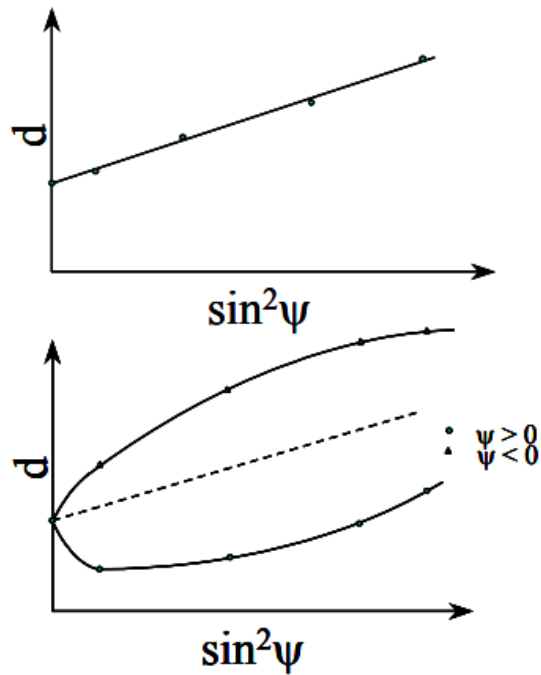
3.4.3 Metoda „ $\sin^2 \psi$ “

Nejpoužívanější metodou pro získání napětí je metoda $\sin^2 \psi$. Ta spočívá v realizaci několika měření mezikrystalických vzdáleností $d_{\phi\psi}$ při různém natočení úhlu ψ a konstantním úhlu ϕ . Tyto hodnoty jsou následně vyneseny do grafu d v závislosti na $\sin^2 \psi$. V případě nulového smykového napětí mezi rovinami dostaneme lineární závislost. Za předpokladu nulového napětí pro $\sin^2 \psi = 0$ lze poté napětí z grafu vypočítat pomocí gradientu křivky a materiálových konstant za použití vztahu (17), kde m je gradient křivky. [4], [8]

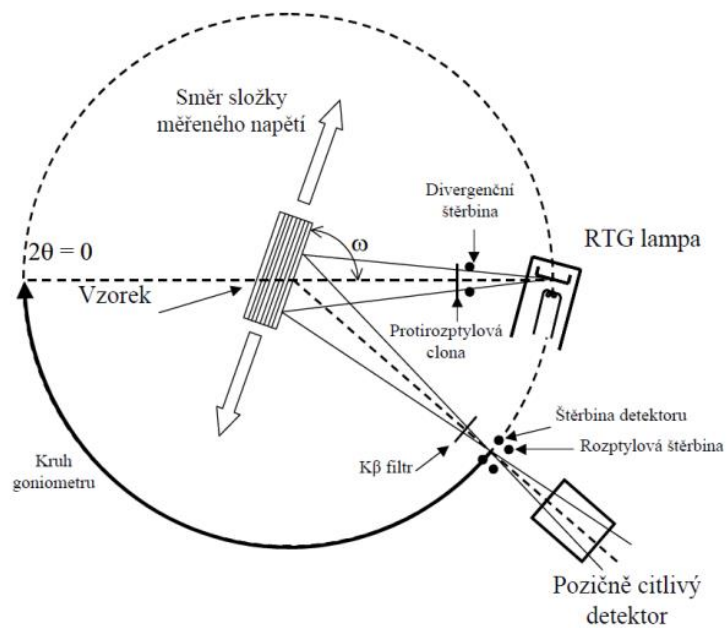
$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{E}{1 + \nu} \right) m \quad (17)$$

Kromě tohoto základního ideálního případu existují i složitější situace kdy v grafu závislosti d na $\sin^2 \psi$ nelze pozorovat lineární závislost. Jedním z těchto případů je závislost v podobě elipsy, což je zapříčiněno výskytem smykového napětí. V tomto případě je napětí určeno pomocí gradientu osy elipsy. Příklady lineární a eliptické závislosti jsou na Obr. 9.

Na Obr. 10 je znázorněno schéma standartního rentgenového difraktometru.



Obr. 9: Příklad regrese naměřených dat pomocí metody $\sin^2 \psi$ [8]



Obr. 10: Schéma laboratorního rentgenového difraktometru [7]

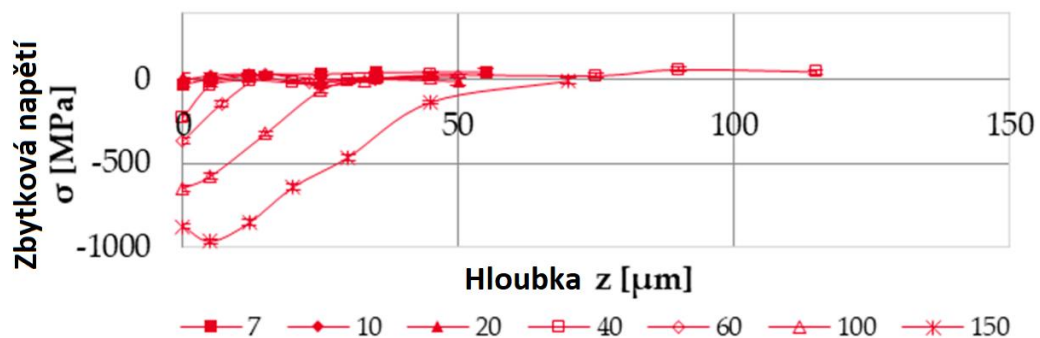
4 Existující metody korekce vlivu zbytkových napětí

Tato kapitola se zabývá rešerší existujících metod pro korekci vlivu zbytkových pnutí na Wöhlerovu křivku. Cílem je najít metodu vhodnou k aplikaci na experimentální část této práce. Důležité je, aby metoda pracovala primárně s absolutní hodnotou zbytkového napětí na povrchu tělesa, a ne s celým průběhem napětí pod povrchem, protože v experimentální části této práce byly změřeny právě hodnoty zbytkových pnutí do hloubky nepřesahující 50 μm .

4.1 Faktor intenzity napětí K

Prvním nalezeným způsobem pro předpověď únavové životnosti za přítomnosti zbytkových napětí je přes faktor intenzity napětí K . Tato metoda pracuje s rozložením zbytkového napětí pod povrchem tělesa a jeho redistribucí během růstu trhliny. Touto metodou se detailně zabývá [12], kde je popsána redistribuce zbytkového napětí pomocí MKP analýzy při růstu trhliny. Pracuje se zde ovšem s délkami trhlín v řádech milimetrů.

Tato metoda by měla malý přínos pro zjištění vlivu zbytkového napětí na vzorcích testovaných v této práci vzhledem k hloubce rozložení zbytkových pnutí v testovaných vzorcích. Ta dosahují významných hodnot jen do hloubky zhruba 50 μm . To je detailně analyzováno v [18], kde se popisuje rozložení zbytkových napětí po obrábění v materiálu 42CrMo4, což je stejný materiál použitý pro výrobu vzorků testovaných v této práci. Příklad průběhu zbytkových napětí pod povrchem je na Obr. 11.



Obr. 11: Průběh zbytkových napětí po obrábění materiálu 42CrMo4 pro různé hloubky řezu, přeloženo z [18]

Pro bližší analýzu této metody by bylo nutné provést dodatečná měření Parisovy křivky.

4.2 Analogie se středním napětím

Dalším přístupem pro korekci vlivu zbytkových napětí na Wöhlerovu křivku je analogický s korekcí středního napětí. Počítá s tím, že zbytková napětí pod povrchem mají při střídavém zatížení stejný vliv na únavu jako kdyby se jednalo a zatížení s nenulovým

středním napětím. Tahová zbytková v blízkosti povrchu urychlují iniciaci a růst trhliny, zatímco tlaková mají tendenci trhlínu uzavírat a tím zpomalovat její růst. V [9] je prezentován vztah (18) analogický s korekcí podle Morrow, která upravuje Basquinův model popisu Wöhlerovy křivky.

$$\sigma_a = (\sigma'_f - \sigma_m - \sigma_{res})(2N)^b$$

(18)

5 Analyzované datové sety

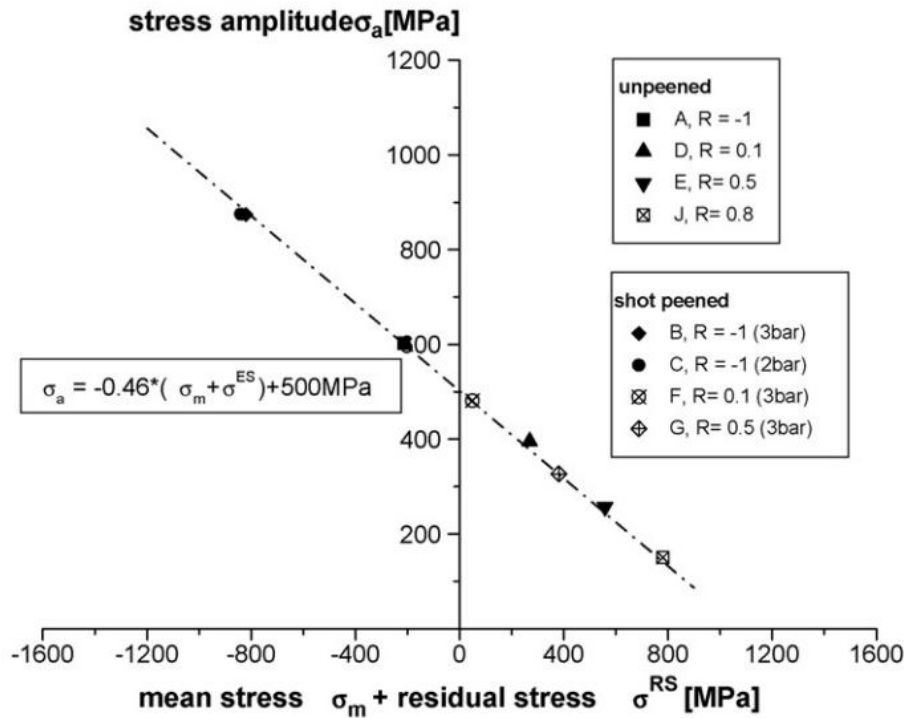
Cílem této kapitoly je nalézt datové sety vhodné pro porovnání s experimentálním měřením provedeným v této práci. Ideálně by se mělo jednat o nvrubované ocelové vzorky, do kterých byla vnesena a následně změřena zbytková pnutí. Vnesení zbytkových napětí může být například plastickou deformací při přetížení před samotným cyklickým zatížením výrobní technologií. Svařované vzorky nejsou pro účely této práce vhodné, protože vnášejí do problému mnoho dalších neznámých.

Článek [13] popisuje vliv počátečního přetížení a středního zatížení na únavový život v oblasti nízkocyklové únavy. Jedná se o vrubované vzorky a zbytková napětí byla určena numericky. V článku je porovnán únavový život při střídavém zatížení se zbytkovým pnutím a při nenulovém středním napětí bez zbytkových pnutí. Tabulka experimentálních výsledků je na Obr. 12. Tato data nejsou pro porovnání s experimentem prováděným v této práci příliš vhodná, protože se jedná o oblast nízkocyklové únavy a použité vzorky jsou s vrubem. Nicméně článek ukazuje, že analogie zbytkového napětí se středním napětím je při tahových zbytkových pnutích spíše konzervativní a při tlakových naopak nekonzervativní.

Specimen Number	Nominal Mean Stress (Notch Root) (MPa)	Residual Stress (MPa)	Fatigue life (Cycles)	Average Life (Cycles)
1	0	0	1010	943
2	0	0	907	
3	0	0	910	
4	0	1130	1228	1108
5	0	1130	1037	
6	0	1130	1058	
7	376 (1130)	0	581	496
8	376 (1130)	0	467	
9	376 (1130)	0	439	
10	0	-1130	1159	1120
11	0	-1130	971	
12	0	-1130	1229	
13	-376 (-1130)	0	3325	3086
14	-376 (-1130)	0	3156	
15	-376 (-1130)	0	2776	

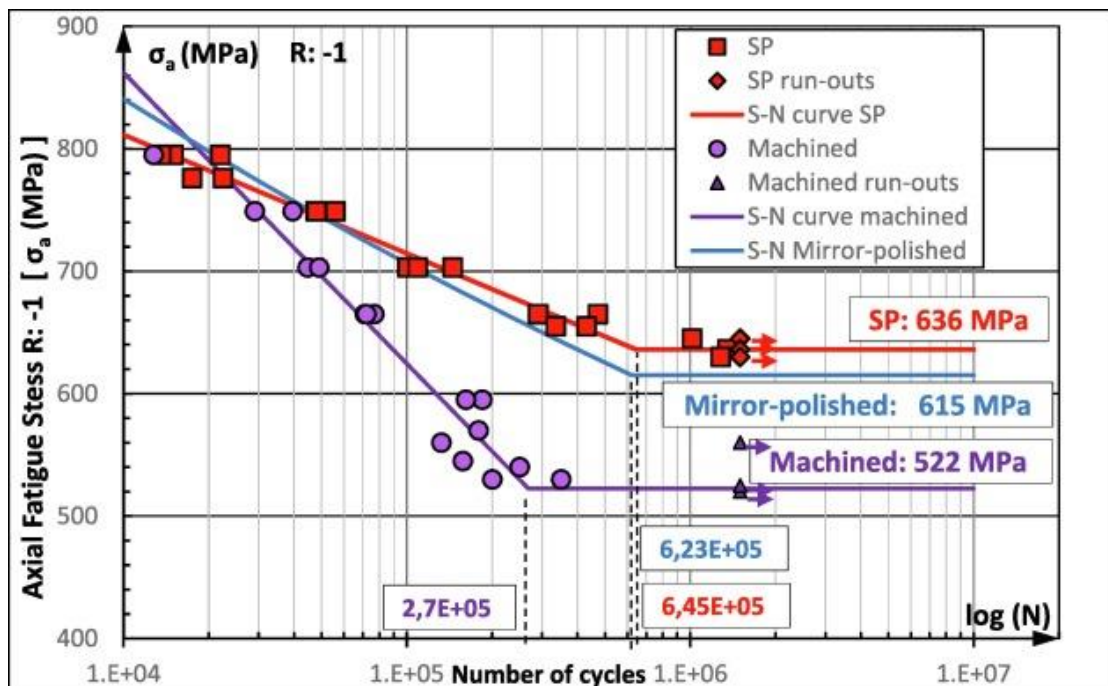
Obr. 12: Tabulka experimentálních výsledků z [13]

Článek [14] popisuje vliv zbytkových pnutí a středního zatížení na únavovou pevnost cementovaných vrubovaných vzorků. Data naměřená v tomto článku opět nejsou ideální pro porovnání s experimenty v této práci kvůli dodatečné tepelné úpravě a geometrii s vrubem. Graf z tohoto článku, který je na Obr. 13, ukazuje, že vliv středního napětí je stejný jako vliv zbytkového napětí, protože obě křivky leží na stejné přímce.



Obr. 13: Haighův diagram porovnávající vliv zbytkových pnutí a středního napětí [14]

Další články jako [1] nebo [11] se zabývají primárně vzorky s úpravou kuličkováním jejím vlivem na zvýšení únavové pevnosti. Ukazuje se zde, že kuličkování vnáší do materiálu výrazná tlaková zbytková pnutí, což způsobuje značné zvýšení únavové pevnosti, jak je vidět na Obr. 14, kde je fialově vyznačena S-N křivka obrobených vzorků a červeně S-N křivka kuličkových vzorků.



Obr. 14: Wöhlerovy křivky obrobených a kuličkových vzorků [11]

Článek [2] se zabývá posouzením vlivu středního a zbytkového napětí na mez únavy kalené, temperované nízkolegované oceli. Je zde navrženo několik konceptů hodnocení vlivu zbytkových napětí, které pracují zejména se změnou zbytkových napětí během zatěžování a jsou analogické k vlivu středního napětí. Na Obr. 15 a Obr. 16 jsou tabulky naměřených zbytkových napětí před zatížením a po zatížení, včetně porovnání. Je vidět, že zbytková napětí během zatížení relaxují, tedy jejich absolutní hodnota se snižuje, což ovlivňuje únavovou životnost. Pro analogii se středním napětím to znamená proměnnou hodnotu středního napětí. Je proto potřeba pracovat s efektivní hodnotou zbytkových napětí na povrchu, která je odlišná od hodnoty před zatěžováním a je závislá na době a způsobu zatěžování. Relaxaci zbytkových napětí ovlivňuje také teplota.

Zustand	$\sigma_{EL}(0)$ N/mm ²	$\sigma_{EQ}(0)$ N/mm ²
A1	- 162 ± 103	- 294 ± 89
A2	- 268 ± 28	- 402 ± 25
A2M		
B1	224 ± 47	- 196 ± 45
B2	493 ± 45	10 ± 12

Obr. 15: Zbytková napětí před zatížením [2]

Zustand	$\sigma_{EL}(N_G)$ N/mm ²	$\sigma_{EQ}(N_G)$ N/mm ²	$\Delta\sigma_{EL}$ N/mm ²	$\Delta\sigma_{EL}$, abgeschätzt N/mm ²	$\Delta\sigma_{EQ}$ N/mm ²
A1	- 167 ± 32	- 275	- 5	- 1	19
A2	- 152 ± 24	- 236 ± 68	116	*	166
A2M	- 377 ± 25	- 338 ± 38	- 134	- 161	64
B1	56 ± 58	- 205 ± 49	- 168	- 117	- 9
B2	395 ± 31	- 11 ± 11	- 98	- 145	- 1

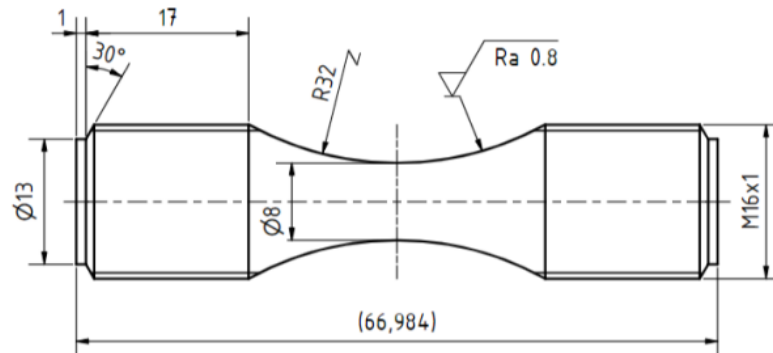
* nicht abschätzbar, da für den Stauchbereich keine Daten vorliegen.

Obr. 16: Tabulka znázorňující změny zbytkových napětí během zatížení [2]

6 Experimentální část

6.1 Vzorky

Pro experimentální část bylo vyrobeno osm sérií vzorků se stejnou geometrií a různými obráběcími parametry. Cílem bylo dosáhnout různých drsností povrchů a zároveň různých zbytkových napětí na povrchu vzorků. Proto nebyl výsledný povrch po obrábění nijak upravován (broušení, leštění). Výkres vzorku je na Obr. 17.



Obr. 17: Výkres vzorku

Všechny série byly vyrobeny na VŠB Ostrava ze stejného materiálu 42CrMo4+QT, jehož vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 1. Polotovár byla za tepla válcovaná, kalená a temperovaná tyč o průměru 35 mm. Prvních pět sérií A25-A29 bylo vyrobeno v lednu 2022, zbývající 3 série A35-A37 v červenci 2022. U všech sérií byla během hrubování použita řezná kapalina Decocut 1040. Proměnné parametry obrábění byly otáčky (řezná rychlost), rychlost posuvu, hloubka řezů, rádius špičky nože a použití chladicí kapaliny při obrábění na čisto. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulkách Tab. 2 a Tab. 3.

Tab. 1: Materiálové parametry

Mez pevnosti R_m	Mez kluzu R_e	Tažnost A5	Kontrakce Z	Velikost zrna
1097 MPa	1001,5 MPa	16,5 %	62,5 %	8

Tab. 2: Parametry obrábění – série A25-A29

Série		A25	A26	A27	A28	A29
Otáčky	[min^{-1}]	2 984	3 000	3 979	2 500	3 000
Řezná rychlost na $D = 8 \text{ mm}$	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	75	75,4	100	62,8	75,4
Posuv na otáčku	[mm]	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1
Chladicí kapalina	ANO/NE	ANO	NE	ANO	NE	NE
Rádius špičky nože	[mm]	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4
Hloubka řezu 1 (poslední řez)	[mm]	0,05	0,1	0,1	0,05	0,1
Hloubka řezu 2 (druhý od konce)	[mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Hloubka řezu 3 (třetí od konce)	[mm]	0,15	0,1	0,1	0,15	0,1

Tab. 3: Parametry obrábění – série A35-A37

Série		A35	A36	A37
Otáčky	[min^{-1}]	3 979	3 979	3 979
Řezná rychlost na $D = 8 \text{ mm}$	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	100	100	100
Posuv na otáčku	[mm]	0,05	0,05	0,05
Chladící kapalina	Y/N	Y	Y	Y
Rádus špičky nože	[mm]	0,8	0,4	0,4
Hloubka řezu 1 (poslední řez)	[mm]	0,1	0,05	0,1
Hloubka řezu 2 (druhý od konce)	[mm]	0,2	0,15	0,2
Hloubka řezu 3 (třetí od konce)	[mm]	0,2	0,3	0,2

6.2 Měření drsnosti

U všech sérií byla předepsána drsnost $Ra = 0,8 \mu\text{m}$ v blízkosti kritického průřezu. Té mělo být dosaženo použitím různých výrobních parametrů. Cílem bylo nalézt takové výrobní podmínky, aby bylo možné dosáhnout požadované drsnosti bez dalšího broušení. To se ovšem zcela nedařilo, takže výsledné drsnosti jsou obvykle horší.

Bylo provedeno několik různých měření drsnosti vždy na dvou až čtyřech různých vzorcích z každé série. První měření proběhlo na VŠB Ostrava, krátce po jejich výrobě, další na ČVUT v Praze na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie a třetí na Univerzitě Mondragon pod vedením Dr. Alaitz Zabaly. Dále bylo Ing. Tomášem Vrbatou provedeno 3D plošné měření drsnosti, které popisuje v [17].

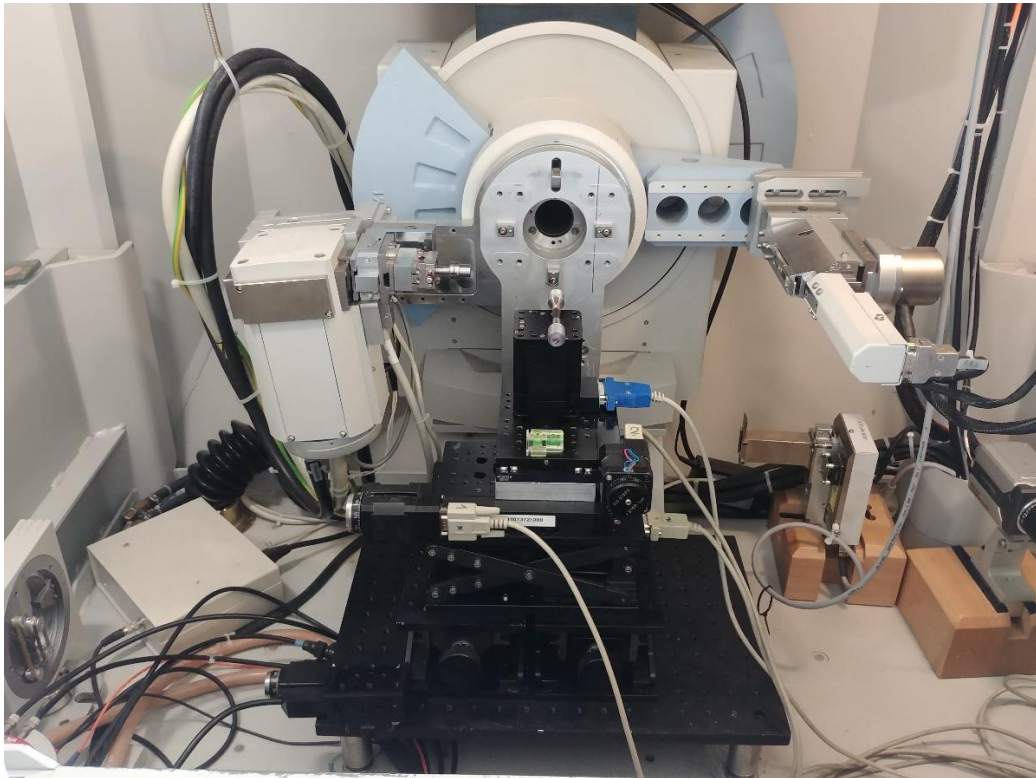
Výsledné hodnoty parametrů Ra všech sérií, které jsou dány průměrem všech měření, jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4: Průměrné hodnoty drsností jednotlivých sérií

	A25	A26	A27	A28	A29	A35	A36	A37
$Ra [\mu\text{m}]$	1.255	0.521	1.066	1.38	0.674	0.908	1.052	1.171

6.3 Měření zbytkových napětí

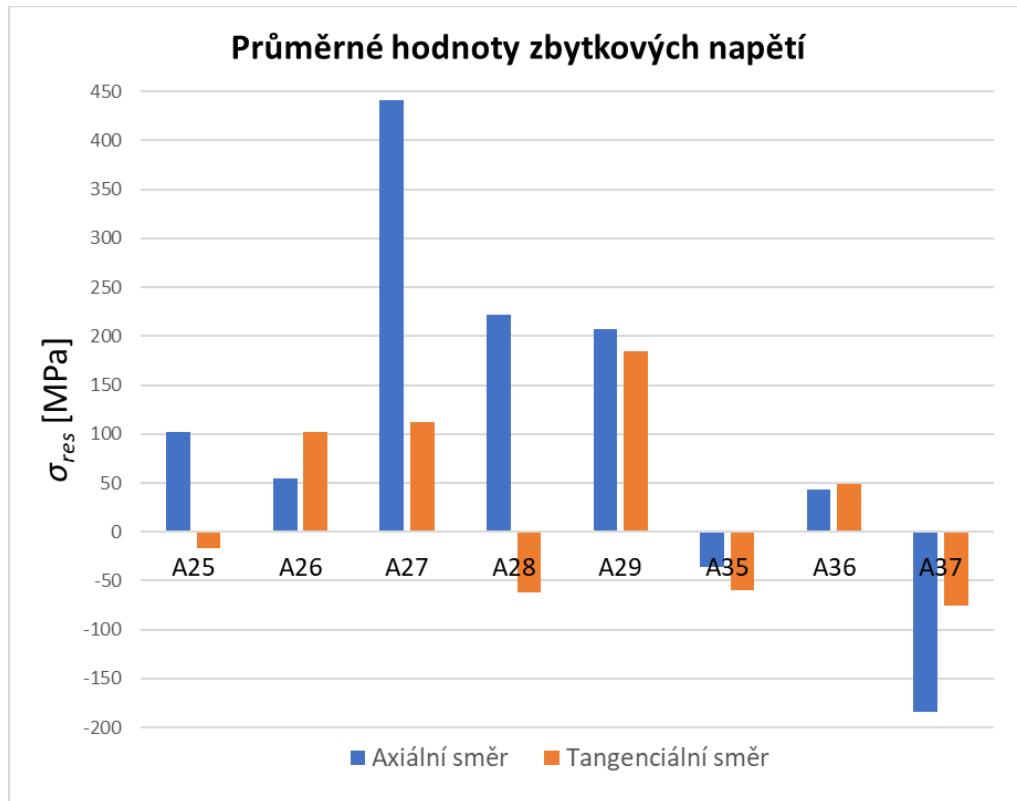
Před únavovými zkouškami bylo změřeno zbytkové napětí vyskytující se několik mikrometrů pod povrchem vzorků. Měření bylo provedeno Ing. Jiřím Čapkem, Ph.D. na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT. Zbytková napětí byla měřena rentgenovou difrakční metodou blíže popsanou v kapitole 3.4. Pro měření byl použit difraktometr X'Pert PRO MPD (PANalytical), schéma měření je možné vidět na Obr. 18. Zbytková pnutí byla měřena vždy na dvou (série A25-A29) nebo na třech (série A35-A37) vzorcích z každé série v axiálním a tangenciálním směru. Zbytková napětí byla měřena a zprůměrována po celém obvodu v místě kritického průřezu. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5. Na Obr. 19 je vidět graf průměrných hodnot zbytkových napětí pro každou sérii v axiálním a tangenciálním směru.



Obr. 18: Schéma měření zbytkových napětí

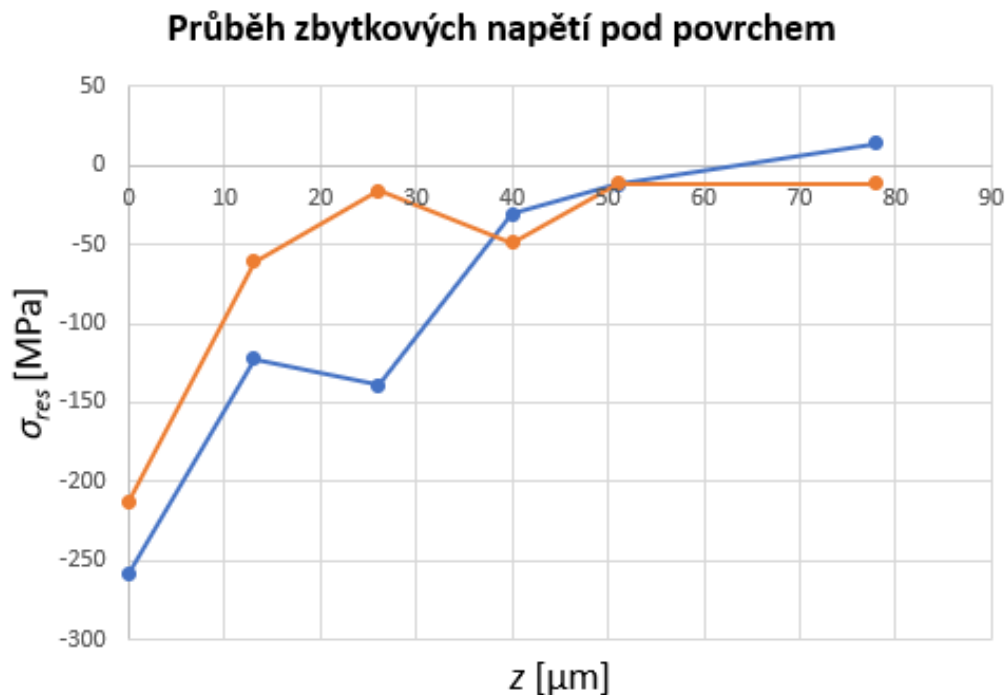
Tab. 5: Výsledky měření zbytkových napětí

Označení		Axiální směr		Tangenciální směr	
Série	Vzorek	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]
A25	1	75	13	-58	16
	2	128	18	24	21
A26	1	7	6	9	17
	2	103	19	195	28
A27	1	443	35	113	22
	2	440	13	112	40
A28	1	199	15	-31	24
	2	244	23	-92	21
A29	1	216	10	97	16
	2	198	18	271	27
A35	1	59	19	-96	9
	2	-143	7	-80	17
	3	-23	16	-4	17
A36	1	25	18	-14	18
	2	99	25	92	30
	3	5	19	68	27
A37	1	-63	18	-12	15
	2	-359	22	-148	19
	3	-130	14	-68	14



Obr. 19: Průměrné hodnoty zbytkových napětí

Dodatečně byla ještě vyrobena další série vzorků A38 s výrobními parametry shodnými se sérií A35 a bylo na ní provedeno měření průběhu zbytkových pnutí pod povrchem.



Obr. 20: Průběh zbytkových napětí pod povrchem

Na všech měřených sériích byla patrná rozdílná kvalita povrchu v různých částech, kdy bylo možné pozorovat lesklé a matné oblasti. Nejvýrazněji byly tímto postižené série A35, A36 a A37 (viz Obr. 21). Zbytková napětí byla proto u vybraných vzorků série A38 změřena v obou oblastech a byl zjištěn výrazný rozdíl v jejich hodnotách (viz Tab. 6), což vnáší další případné nepřesnosti do analyzovaných dat.

Tab. 6: Zbytková napětí na lesklém a matném povrchu

	σ_{zb} axiální směr [MPa]	σ_{zb} tangenciální směr [MPa]
A38 lesklý povrch	-257 ± 63	-72 ± 165
A38 matný povrch	38 ± 155	-42 ± 114



Obr. 21: Rozdílná kvalita povrchu na sérii A36

6.4 Měření únavy

Měření únavy bylo provedeno v laboratořích odboru pružnosti a pevnosti ČVUT v Praze na měřícím zařízení AMSLER HFP10. Jedná se o rezonanční pulsátor, vzorek je tedy zatěžován silou kmitající vlastní frekvencí soustavy, která je dána její tuhostí a hmotností. Hmotnost se dá upravit přidáním či odebráním závaží (hmotnost vzorku je oproti zbytku soustavy zanedbatelná), proměnný člunek v tuhosti soustavy je potom právě měřený vzorek, při poklesu frekvence zatěžování dochází tedy zároveň k poklesu tuhosti vzorku – vzniku trhliny. Pro měření všech sérií byl použit maximální počet závaží, aby vlastní frekvence byla co nejvyšší a průběh zkoušky byl co nejkratší.

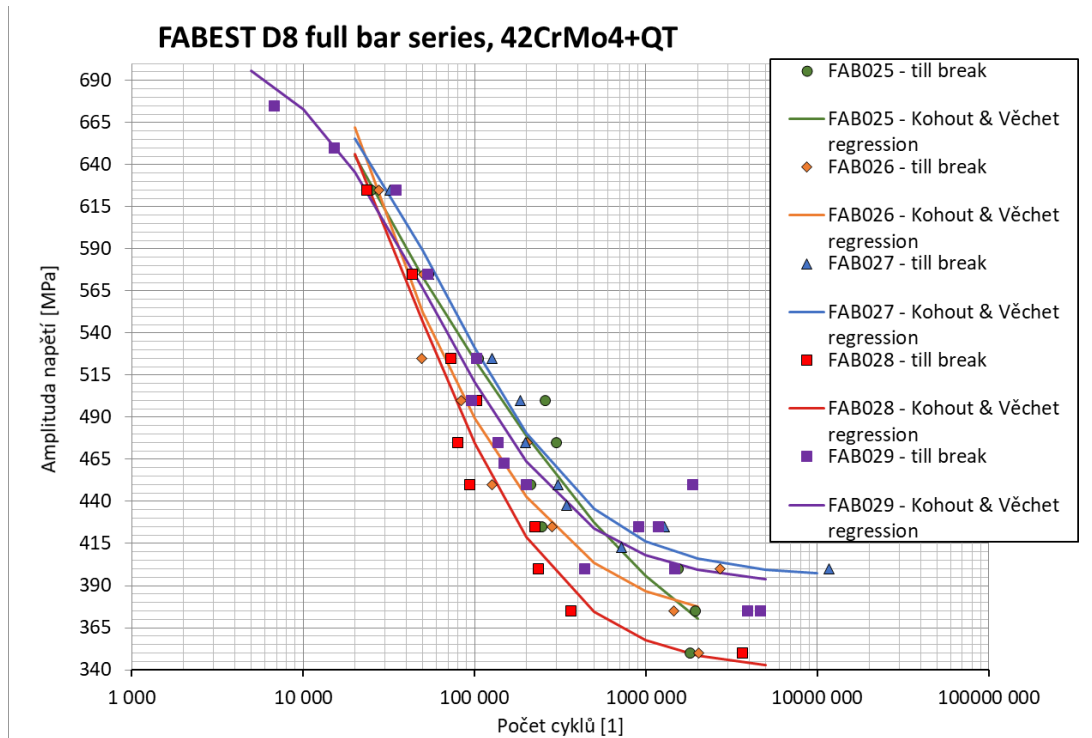
Před upnutím do měřícího zařízení byly vzorky v nejužším bodě přeměřeny posuvným měřítkem na třech místech po obvodu a výsledný průřez byl stanoven jako průměr těchto tří hodnot. Dále byly vzorky v rámci dalšího výzkumu očištěny a nastříkány barvou s danou emisivitou pro účely měření teplotní odezvy při zatížení pomocí termokamery.

Vzorky byly vystaveny jednoosému symetrickému harmonickému zatížení ve směru osy vzorku. Amplituda síly byla určena výpočtem z požadované amplitudy napětí a průřezu

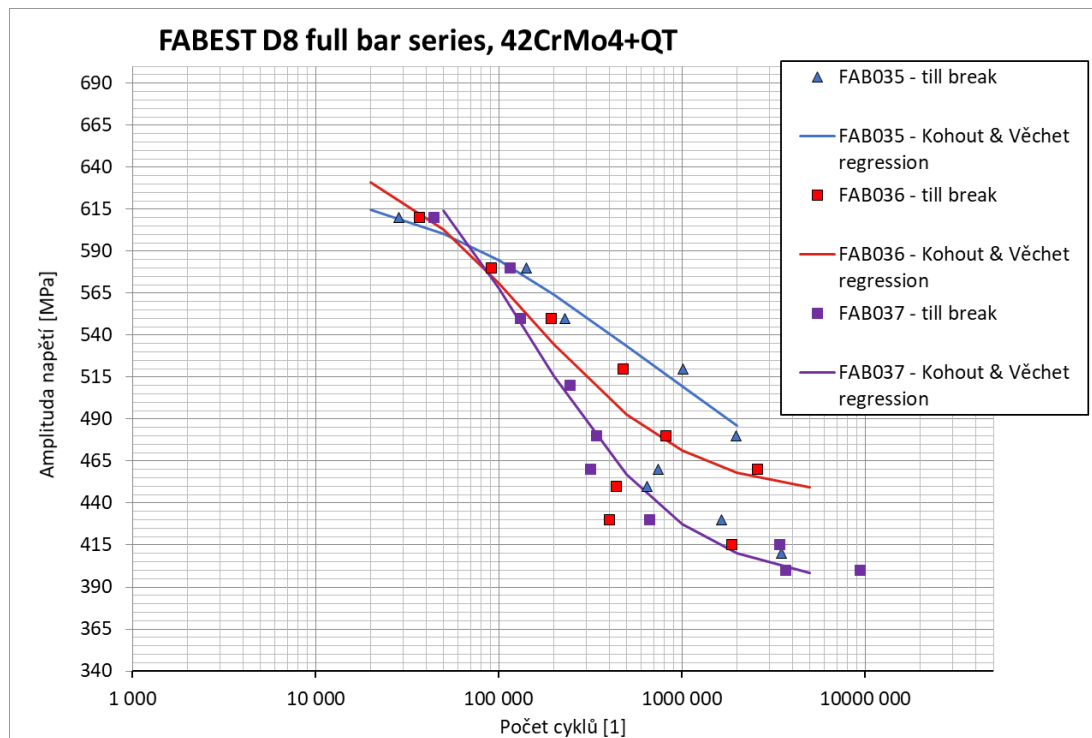
vzorku, střední síla byla nulová. Primární kritérium pro skončení testu bylo pokles vlastní frekvence o 22 Hz (cca 15 %). Další kritéria byla změna dynamického nebo statického zatížení o 0,5 kN (cca 2 %), což mohlo být způsobeno například náhlou změnou frekvence zatížení a následnou neschopností řízení stroje udržet síly v požadovaných mezích. Poslední kritérium bylo dosažení 10^7 cyklů, kdy byla zkouška ukončena manuálně a vzorek byl označen jako run-out.

Po zkoušce byly vzorky vizuálně kontrolovány a zaznamenávala se přítomnost a poloha únavové trhliny. Pokud nebyla trhlina viditelná, byla provedena kapilární zkouška nebo inspekce pod mikroskopem.

Na Obr. 22 a Obr. 23 jsou vidět Wöhlerovy křivky jednotlivých sérií získané regresí naměřených dat Kohout-Věchetovým modelem.



Obr. 22: Výsledky únavových experimentů, série A25-A29



Obr. 23: Výsledky únavových experimentů, série A35-A37

7 Výsledky

V experimentální části bylo na osmi sériích s různými výrobními parametry provedeno měření zbytkových napětí a následné měření únavy.

U sérií A25-A29 byla naměřena výrazná tahová zbytková pnutí, nejvyšší u série A27, kde dosahují téměř 450 MPa. Tlaková zbytková pnutí byla naměřena u sérií A35 a A37, nejvýraznější u série A37, kde v průměru dosahují téměř -200 MPa, nejnižší naměřená je ovšem pod -350 MPa.

Z naměřených Wöhlerových křivek je vidět, že nejnižší životnosti dosahuje série A28 a následně A26. Naopak nejvyšší životnosti dosahuje série A35 a následně A36. Podle předpokladů analogie zbytkových pnutí a středního zatížení je překvapující, že série A27 s tahovým zbytkovým pnutím výrazně vyšším, než u ostatních sérií není viditelná výrazně snížená životnost. Dále série A37, u které jsou nejvýraznější tlaková zbytková pnutí, nedosahuje životnosti vyšší než série ostatní, což také neodpovídá analogii se středním napětím.

Ve výsledcích hraje výraznou roli vliv rozdílné drsnosti u jednotlivých sérií, jak ukazuje Ing. Tomáš Vrbata ve své práci [17]. Pro další analýzu je třeba tento vliv co nejlépe eliminovat, aby bylo možné správně posoudit vliv zbytkových napětí.

7.1 Eliminace vlivu drsnosti

Na základě parametrů drsnosti R_z byla provedena korekce získaných únavových křivek podle [20]. Pomocí vztahu (19) byl pro každou sérii vypočítán koeficient snížení meze únavy, který byl následně normalizován podle koeficientu získaného pro referenční sérii hladkých vzorků A03 a na jejich základě byly poté upraveny únavové křivky.

Mez únavy pro všechny vzorky byla počítána jako hodnota napětí při dosažení půl milionu cyklů. Tato hodnota byla vybrána na základě tvarů únavových křivek, kde kolem půl milionu cyklů dochází ke zlomu. Tato smluvní mez únavy byla upravena pomocí vypočítaného koeficientu k_R tak, aby se únavová křivka protínala v bodě amplitudy napětí rovné mezi pevnosti, protože při takovém zatížení uvažujeme vliv drsnosti nulový, viz Obr. 24. U série A35 nebylo ovšem možné korekci provést, protože nebylo dostatečné množství validních dat v oblasti meze únavy z důvodu poškození vzorků v oblasti závitu při únavových zkouškách.

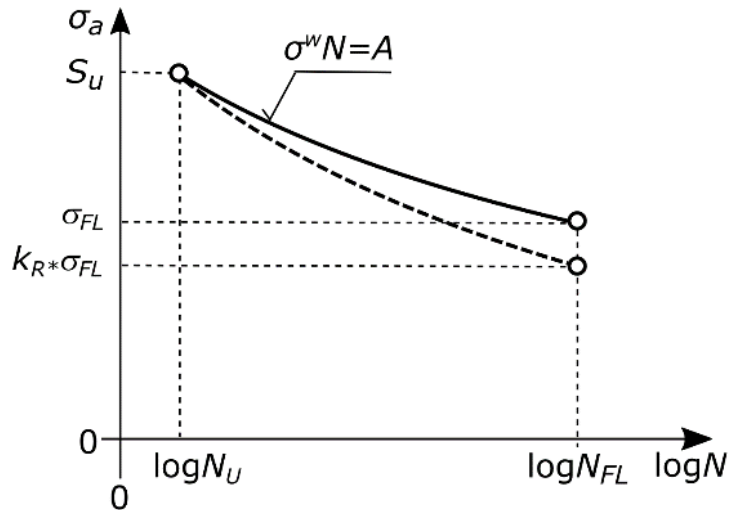
Na Obr. 25 a Obr. 26 jsou vyobrazeny grafy naměřených a korigovaných únavových křivek. Při analýze budu pracovat s korigovanými únavovými křivkami s eliminovaným vlivem drsnosti povrchu.

$$k_R = 1 - 0,22 \cdot \log(R_z) \cdot \log(2 \cdot R_m/400)$$

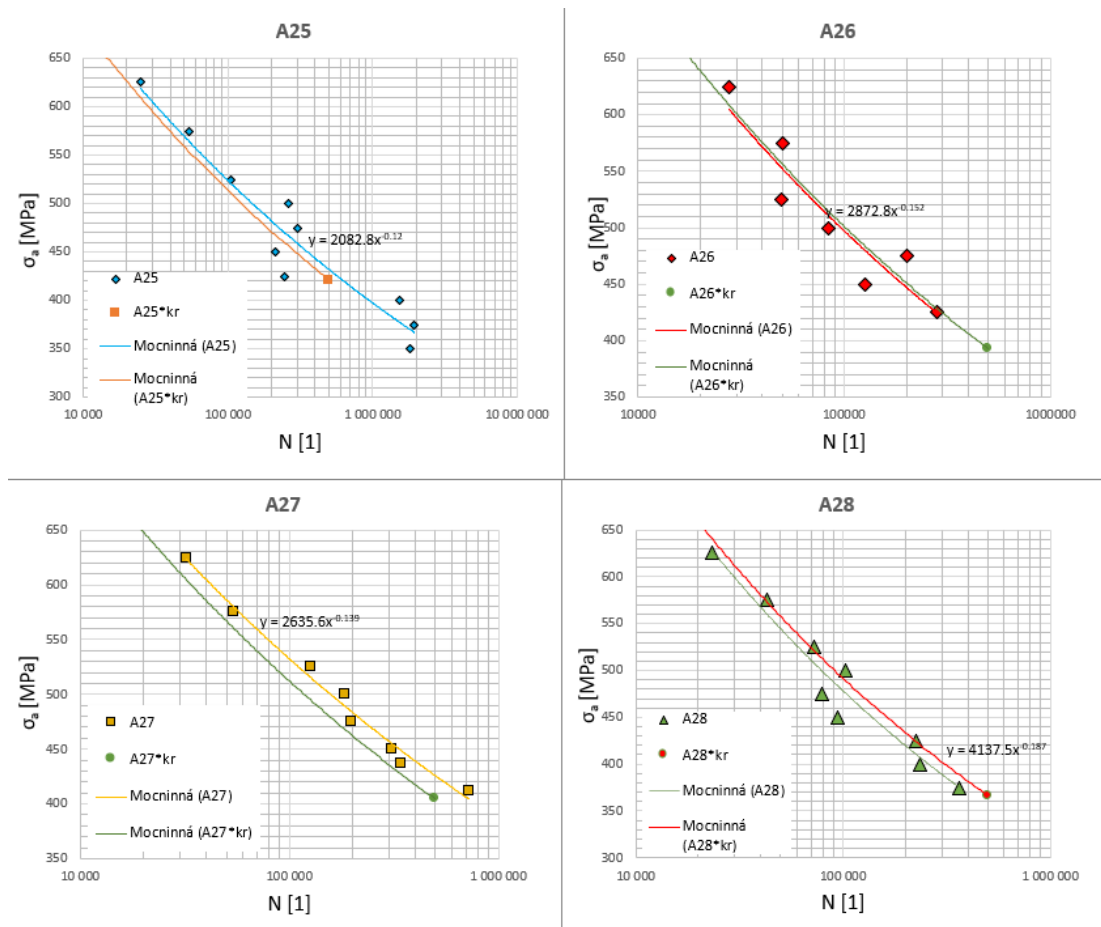
(19)

Tab. 7: Přehled vypočítaných koeficientů k_R

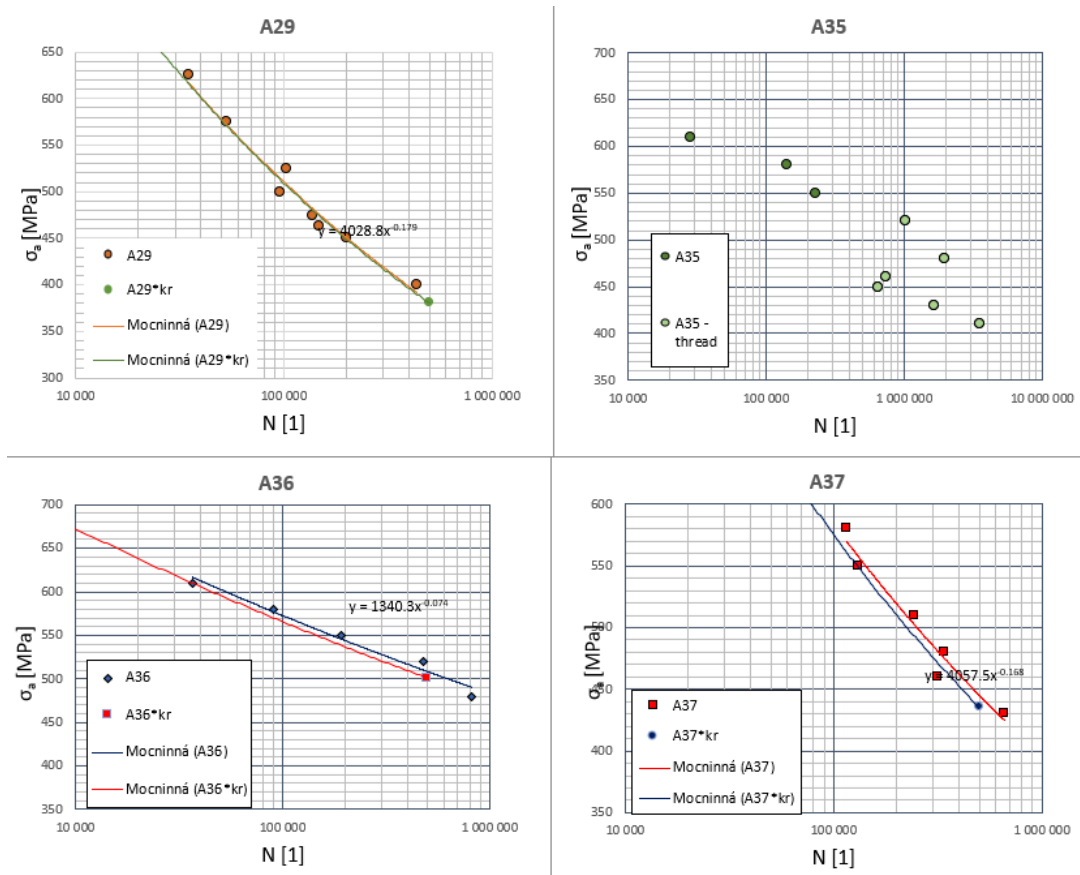
	A03	A25	A26	A27	A28	A29	A35	A36	A37
R_z [μm]	4,6	6,215	4,322	8,544	3,115	5,298	4,034	5,401	6,458
$k_R/k_{R,A03}$ [1]	1	0,976	1,005	0,951	1,031	0,989	1,01	0,987	0,973



Obr. 24: Postup při úpravě únavových křivek [20]



Obr. 25: Korekce únavových křivek



Obr. 26: Korekce únavových křivek

7.2 Analýza naměřených dat

Pro analýzu vlivu zbytkových napětí na únavu volím postup, při kterém porovnám smluvní meze únavy (amplituda napětí při 500 000 cyklech) naměřených sérií vzorků v závislosti na zbytkových napětích naměřených na povrchu vzorků v axiálním a tangenciálním směru (viz kapitola 6.3).

Po vynesení získaných hodnot do grafu závislosti meze únavy na zbytkových napětích (Obr. 27) je na první pohled viditelný lineární trend, ze kterého vybočují hodnoty pro sérii A36, které se nacházejí výrazně mimo od ostatních sérií. To může být dáno nepřesným změřením zbytkových napětí, což je způsobeno rozdílnou kvalitou povrchu, jak je popsáno v kapitole 6.3 (viz Obr. 21). Z toho důvodu tuto sérii nezahrnu do další analýzy.

Byla provedena lineární regrese závislosti meze únavy na zbytkových pnutích v axiálním (20) a tangenciálním (21) směru (viz Obr. 28). Z této regrese je patrné, že výraznější vliv na mez únavy má zbytkové napětí v axiálním směru, tedy ve směru zatěžování vzorků. Klesající trend je analogický s vlivem středního napětí na únavu, kdy výrazná tlaková pnutí mez únavy snižují a tlaková naopak zvyšují.

Lineární regrese pro zbytková napětí v axiálním směru:

$$\sigma_c = 412,86 - 0,1105 \cdot \sigma_{zb} \quad (20)$$

Lineární regrese pro zbytková napětí v tangenciálním směru:

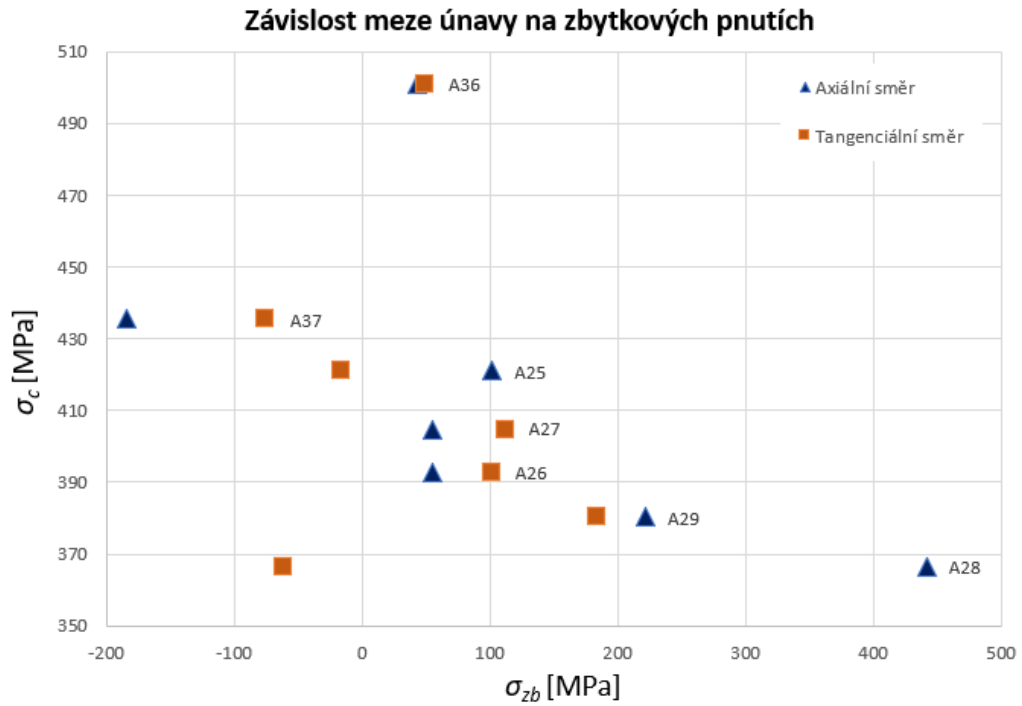
$$\sigma_c = 403,63 - 0,0859 \cdot \sigma_{zb} \quad (21)$$

Tato lineární závislost může být analogická s korekcí vlivu středního napětí podle Goodmana, která je popsána v kapitole 2.3.1, viz Obr. 4.

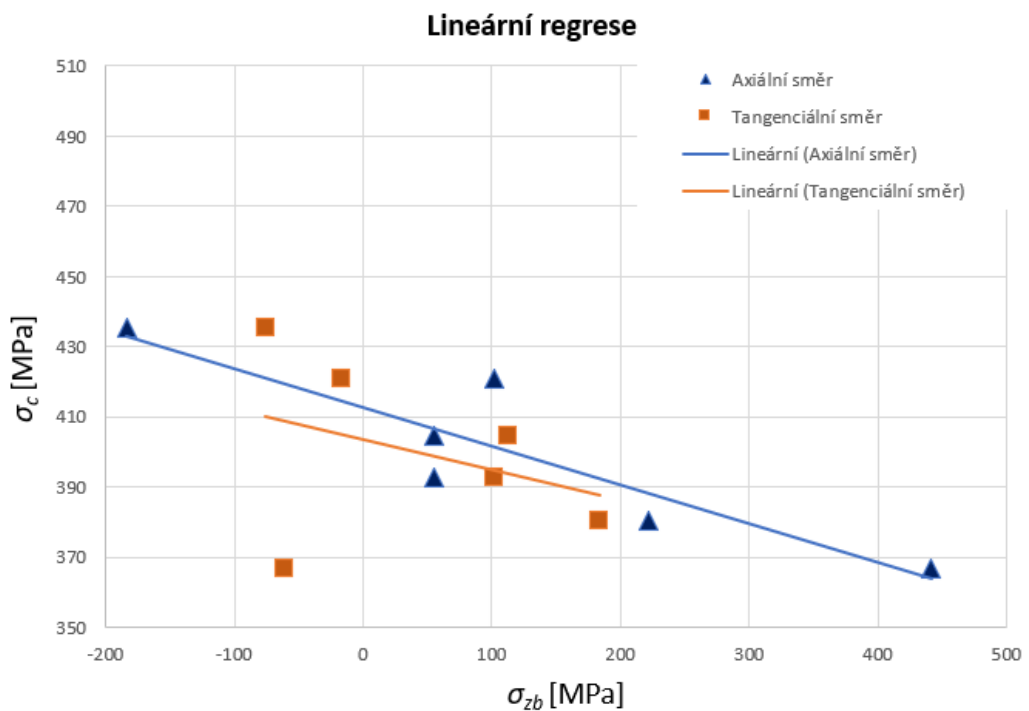
Jako možný popis vlivu zbytkových pnutí na únavu tedy navrhuji použít lineární funkci pro redukci meze únavy ve tvaru

$$\sigma_c^X = \sigma_c - k_{zb} \cdot \sigma_{zb} \quad (22)$$

kde σ_c je mez únavy materiálu, k_{zb} je koeficient přímky, který je třeba kalibrovat pro daný materiál a σ_{zb} je zbytkové napětí ve směru zatěžování součásti. Tahová zbytková napětí se uvažují kladná, takže mez únavy snižují, zatímco tlaková jsou záporná a tím pádem mez únavy zvyšují.



Obr. 27: Závislost meze pevnosti na zbytkovém napětí na povrchu



Obr. 28: Lineární regrese získaných dat

8 Závěr

Cílem této práce bylo určit vliv zbytkových napětí v součásti na její únavovou pevnost provedením únavových experimentů a následnou aplikací navržených výpočetních postupů a jejich ověření. V úvodní části je přehled teoretického pozadí problematiky materiálové únavy a zbytkového napětí, jeho vzniku a měření. Dále byly uvedeny dvě metody korekce vlivu zbytkových napětí na únavu, korekce přes faktor intenzity napětí K a analogie se středním napětím. Pro účely této práce byla jako vhodnější metoda zvolena analogie se středním napětím, protože metoda přes K faktor pracuje s rozložením zbytkového napětí do výrazně větší hloubky, než je rozložení pnutí v testovaných vzorcích. Vhodnější postup je počítat s konkrétní hodnotou zbytkového napětí blízko povrchu součásti. Pro bližší analýzu metody přes K faktor by bylo nutné dodatečné změření Parisovy křivky testovaných vzorků.

V kapitole 5 je přehled datových setů, které potvrzují analogii zbytkového napětí se středním napětím, tedy že tlaková zbytková pnutí mají pozitivní vliv na únavu, zatímco tahová negativní. Nicméně žádný z prezentovaných datových setů nebyl z různých důvodů vhodný k přímému porovnání s experimenty prováděnými v této práci.

V experimentální části je uveden detailní postup prováděných únavových experimentů a přehled měření drsnosti a zbytkových pnutí společně s výsledky. V následující kapitole je diskuse získaných dat a výsledků.

Byla prověřena možná lineární závislost mezi zbytkovým pnutím na povrchu součásti a mezí únavy. Z naměřených dat vyplývá, že výraznější vliv na mez únavy mají zbytková pnutí ve směru zatěžování, tedy v tomto případě ve směru axiálním. Tato lineární závislost je analogická s vlivem středního napětí a korekcí podle Goodmana, nicméně koeficienty přímky se od této korekce liší. Otázkou je, jak moc přesná a validní byla naměřená data vzhledem ke kvalitě povrchu zkoušených vzorků a různým hodnotám zbytkových pnutí v různých místech. Pro popis vlivu zbytkových pnutí byla navržena lineární funkce redukcující mez únavy materiálu.

Seznam zkratk a symbolů

Označení	Popis	Jednotka
A	Koeficient Kohout-Věchet modelu	[MPa]
b	Exponent únavové životnosti	[1]
B	Koeficient Kohout-Věchet modelu	[1]
C	Koeficient mocninného zákona/Kohout-Věchet modelu	[1]
d	Vzdálenost krystalických rovin	[m]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
k	Přirozené číslo	[1]
k_R	Koeficient eliminace vlivu drsnosti	[1]
k_{zb}	Koeficient korekce meze únavy vlivem zbytkových pnutí	[1]
K	Faktor intenzity napětí	[MPa \sqrt{m}]
N	Počet cyklů	[1]
R	Koeficient asymetrie	[1]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
w	Exponent mocninného zákona	[1]
α	Úhel dopadu záření, součinitel tvaru	[°], [1]
β	Exponent Kohout-Věchet modelu, součinitel vrubu	[1]
δ_{ij}	Diracovo delta	[1]
$\varepsilon_{mř}$	Mřížková deformace	[1]
λ	Vlnová délka	[m]
ν	Poissonova konstanta	[1]
ρ	Poloměr vrubu	[mm]
σ_a	Amplituda napětí	[MPa]
σ_m	Střední hodnota napětí	[MPa]
σ_h	Horní (maximální) hodnota napětí	[MPa]
σ_d	Dolní (minimální) hodnota napětí	[MPa]
σ_c, σ_{FL}	Mez únavy	[MPa]
σ_{res}	Zbytkové napětí	[MPa]
$\Delta\sigma$	Rozkmit napětí	[MPa]
σ'_f	Součinitel únavové pevnosti	[MPa]

Seznam použité literatury

- [1] McCLUNG, R. C. *A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 30, 2007, 173-205.
- [2] BOMAS, H.; LINKEWITZ, C.; MAYR, P.: *Bewertung des Einflusses von Eigen- und Mittelspannungen auf die Dauerfestigkeit des Stahls 42CrMo4 im vergüteten Zustand*. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 29, 1998, 270-276.
- [3] RŮŽIČKA, M., HANKE, M., ROST, M. *Dynamická pevnost a životnost*. Praha: České vysoké učení technické, 1987.
- [4] KRAUS, Ivo a Nikolaj GANEV. *Difrakční analýza mechanických napětí*. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01366-9.
- [5] GANEV, N. KRAUS, I. *Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí*. Materials Structure, vol. 9, number 2. Praha: České vysoké učení technické, 2002.
- [6] MŽOUREK, M., *Mean stress effect on the S-N curve*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, 2020.
- [7] BURKET, T., *Analýza metod pro měření zbytkových napětí a vhodnost jejich použití*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2021.
- [8] FITZPATRICK, M. E. *Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction*. Measurement Good Practice Guide No. 52: National Physical Laboratory UK, 2015. ISSN 1744-3911.
- [9] LANDGRAF, R. W., CHERNENKOFF, R. A. "Residual Stress Effects on Fatigue of Surface Processed Steels," *Analytical and Experimental Methods for Residual Stress Effects in Fatigue*. ASTM STP 1004. R. L. Champoux, L H. Underwood, and L A. Kapp, Eds.. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988, pp. 1-12.
- [10] STEPHENS, R. I., FATEMI, A., STEPHENS, R. R. a H. O. FUCHS. *Metal fatigue in engineering*. 2nd ed. New York: Wiley, 2001. A Wiley-Interscience publication. ISBN 0-471-51059-9.
- [11] LEGUINAGOICOA, N., ALBIZURI, J., LARRAÑAGA, A. *Fatigue improvement and residual stress relaxation of shot-peened alloy steel DIN 34CrNiMo6 under axial loading*. International Journal of Fatigue. Elsevier, 2022.
- [12] ROBERTS, Jeffrey Lynn, *Residual Stress Effects on Fatigue Life via the Stress Intensity Parameter*, K. PhD diss., University of Tennessee, 2002.
https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/2196



- [13] BASSINDALE, C., MILLER, R. E., WANG, X. *Effect of single initial overload and mean load on the low-cycle fatigue life of normalized 300 M alloy steel*. International Journal of Fatigue. Elsevier, 2019
- [14] KRUG, T., LANG, K., FETT, T., LÖHE, D. *Influence of residual stresses and mean load on the fatigue strength of case-hardened notched specimens*. Materials Science and Engineering. Elsevier, 2006.
- [15] Adnen LAAMOURI, Farhat GHANEM, Chedly BRAHAM, Habib SIDHOM. *Influences of up-milling and down-milling on surface integrity and fatigue strength of X160CrMoV12 steel*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology - Vol. 105, p.1209-1228 – 2019
- [16] DLHÝ, Pavol. *Residual lifetime of parts with residual stress*. Brno, 2022. Available also at: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/143863>. Doctoral Thesis. Vysoké učení technické v Brně, Středoevropský technologický institut VUT, Central European Institute of Technology BUT. Supervisor Luboš Náhlík.
- [17] VRBATA, T. *Surface roughness and its impact on fatigue life*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, 2023.
- [18] ZIELINSKI, T.; VOVK, A.; RIEMER, O.; KARPUSCHEWSKI, B. *An Investigation on Internal Material Loads and Modifications in Precision Turning of Steel 42CrMo4*. Micromachines 2021, 12, 526. <https://doi.org/10.3390/mi12050526>
- [19] Braggův zákon :: MEF. *Fyzika :: MEF* [online]. Copyright © 2006 [cit. 17.02.2023]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1683-bragguv-zakon>
- [20] MŽOUREK, M., PAPUGA, J., NESLÁDEK, M., MATUŠŮ M., ČAPEK J., MÁRA V., *Fatigue Damage Analysis On 42CrMo4+QT Via Critical Volume Approach*. Procedia Structural Integrity, Volume 42, pages 457-464, 2022.

Seznam obrázků

Obr. 1: Harmonický průběh zatížení v čase [3].....	- 5 -
Obr. 2: Experimentální data zanesená v S-N křivce [10]	- 6 -
Obr. 3: Oblasti Wöhlerovy křivky [3]	- 7 -
Obr. 4: Matematické modely popisující vliv středního napětí v Haighově diagramu. [6].-	9 -
Obr. 5: Povrchové úpravy a jejich vliv na vznik zbytkových pnutí [3]	- 10 -
Obr. 6: Průběh zbytkových napětí pod povrchem tělesa, přeloženo z [11].....	- 12 -
Obr. 7: Schéma dopadu paprsků na dvě rovnoběžné krystalické roviny [19].....	- 14 -
Obr. 8: Schéma ukazující difrakční roviny rovnoběžné s povrchem a pod úhlem $\phi\psi$. Napětí σ_1 a σ_2 leží v rovině povrchu vzorku. [8].....	- 16 -
Obr. 9: Příklad regrese naměřených dat pomocí metody $\sin 2\psi$ [8]	- 17 -
Obr. 10: Schéma laboratorního rentgenového difraktometru [7]	- 17 -
Obr. 11: Průběh zbytkových napětí po obrábění materiálu 42CrMo4 pro různé hloubky řezu, přeloženo z [18]	- 18 -
Obr. 12: Tabulka experimentálních výsledků z [13]	- 20 -
Obr. 13: Haighův diagram porovnávající vliv zbytkových pnutí a středního napětí [14] -	21 -
Obr. 14: Wöhlerovy křivky obrobených a kuličkováných vzorků [11].....	- 21 -
Obr. 15: Zbytková napětí před zatížením [2].....	- 22 -
Obr. 16: Tabulka znázorňující změny zbytkových napětí během zatížení [2]	- 22 -
Obr. 17: Výkres vzorku.....	- 23 -
Obr. 18: Schéma měření zbytkových napětí	- 25 -
Obr. 19: Průměrné hodnoty zbytkových napětí	- 26 -
Obr. 20: Průběh zbytkových napětí pod povrchem	- 26 -
Obr. 21: Rozdílná kvalita povrchu na sérii A36.....	- 27 -
Obr. 22: Výsledky únavových experimentů, série A25-A29	- 29 -
Obr. 23: Výsledky únavových experimentů, série A35-A37	- 29 -
Obr. 24: Postup při úpravě únavových křivek [20].....	- 31 -
Obr. 25: Korekce únavových křivek	- 31 -
Obr. 26: Korekce únavových křivek	- 32 -
Obr. 27: Závislost meze pevnosti na zbytkovém napětí na povrchu.....	- 34 -
Obr. 28: Lineární regrese získaných dat	- 34 -

Seznam tabulek

Tab. 1: Materiálové parametry.....	- 23 -
Tab. 2: Parametry obrábění – série A25-A29	- 23 -
Tab. 3: Parametry obrábění – série A35-A37	- 24 -
Tab. 4: Průměrné hodnoty drsností jednotlivých sérií	- 24 -
Tab. 5: Výsledky měření zbytkových napětí	- 25 -
Tab. 6: Zbytková napětí na lesklém a matném povrchu	- 27 -
Tab. 7: Přehled vypočítaných koeficientů k_R	- 31 -