



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OPTIMALIZACE STAVU ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI U  
PRUŽINOVÝCH OCELÍ TVÁŘENÝCH ZA STUDENA**

OPTIMIZATION OF THE RESIDUAL STRESSES IN COLD-FORMED SPRING STEELS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jan Kolmačka

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2017

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Jan Kolmačka**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Optimalizace stavu zbytkové napjatosti u pružinových ocelí tvářených za studena**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Optimalizace stavu zbytkové napjatosti u pružinových ocelí tvářených za studena, analýza procesních parametrů pro vybrané materiálové skupiny.

### **Cíle bakalářské práce:**

Analýza současného stavu techniky a srovnání různých výrobních procesů.

Analýza současného stavu měření zbytkové napjatosti.

Návrh parametrů pro testování a experimenty.

Zkouška mechanických vlastností s různými výrobními parametry.

Diskuze výsledků.

### **Seznam doporučené literatury:**

JECH, J. Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka. 4., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.

PTÁČEK, L. Nauka o materiálu I. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, tisk FINAL TISK Olomoučany, 2001, 1. vyd., 516 s. ISBN 80-7204-193-2.

PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, tisk FINAL TISK Olomoučany, 2001, 1. vyd., 360 s. ISBN 80-7204-130-4.

ŠUŠTARŠIČ, B. et al. Fatigue strength and microstructural features of spring steel. In: New trends in fatigue and fracture. Metz, 2010. [cit. 25. 10 2012]. Dostupné z:

<http://divk.inovacionicentar.rs/ivk/ivk11/027-034-IVK1-2011-BS-PB-WE-GG-AJ-BS.pdf>.

SEBASTIAN, D. et al., Fundamentals of Spring Design, SMI, OakBrook Illinois, 2000, p. SM-5.

KALPAKJIAN, S. Manufacturing Processes for Engineering Materials, Addison Wesley, Reading Massachusetts, 1985, p. 380.

HERTZBERG, R. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, John Wiley & Sons, New York, 1983, p. 481.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato práce se věnuje optimalizaci parametrů procesu uvolňování zbytkových napětí vysokopevnostních stabilizátorových tyčí a vlivu těchto parametrů na mez pevnosti v tahu, mez kluzu, hodnoty zbytkových napětí a korozní praskání. Studie popisuje jednotlivé výrobní procesy použité při výrobě stabilizátorových tyčí. Představeny jsou také metody pro měření zbytkové napjatosti.

### Klíčová slova

Zbytková napětí, vliv procesních parametrů, výrobní procesy, stabilizátorové tyče

## ABSTRACT

This research describes the optimization of the stress-relieving of high-strength stabilizer bars. The influence of process parameters on tensile strength, yield strength, residual stresses and stress corrosion cracking is investigated. This project describes production processes for stabilizer bars. Different techniques of the measurement of residual stresses are presented.

### Key words

Residual stress, influence of process parameters, production processes, stabilizer bars

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOLMAČKA, Jan. *Optimalizace stavu zbytkové napjatosti u pružinových ocelí tvářených za studena*. Brno 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 41 s. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Optimalizace stavu zbytkové napjatosti u pružinových ocelí tvářených za studena vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

2. května 2017

.....  
Datum

.....  
Jan Kolmačka

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Poděkování patří také Dr. Sergiu Macedovi a Ing. Štěpánovi Urbancovi, CSc. za možnost tříměsíční stáže ve vývojovém centru společnosti Mubea Fahrwerksfedern GmbH.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
ÚVOD.....	8
1 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ.....	9
2 ANALÝZA VÝROBNÍCH PROCESŮ.....	11
2.1 Stabilizátorové tyče .....	11
2.1.1 Funkce.....	12
2.2 Výrobní procesy použité při výrobě stabilizátorových tyčí .....	13
2.2.1 Indukční vytvrzování.....	14
2.2.2 Ohýbání.....	15
2.2.3 Brokování .....	16
3 MĚŘENÍ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI.....	17
3.1 Destruktivní metody .....	17
3.1.1 Štípací metoda .....	17
3.1.2 Metoda odstraňování vrstev .....	19
3.1.3 Metoda vrtání otvoru.....	20
3.1.4 Metoda uvolňování sloupku.....	20
3.2 Nedestruktivní metody .....	21
3.2.1 Rentgenová difrakční metoda.....	21
3.2.2 Neutronová difrakční metoda .....	24
4 UVOLŇOVÁNÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ .....	24
4.1 Vybavení .....	26
4.1.1 Komorová pec .....	26
4.1.2 Průběžná ohřívací pec.....	27
4.2 Vliv parametrů procesu na zbytkovou napjatost.....	28
4.3 Vliv parametrů procesu na hodnoty meze pevnosti v tahu a meze kluzu.....	31
5 KOROZNÍ PRASKÁNÍ.....	33
5.1 Vliv parametrů procesu na korozní praskání.....	34
ZÁVĚR .....	38
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	39
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	41

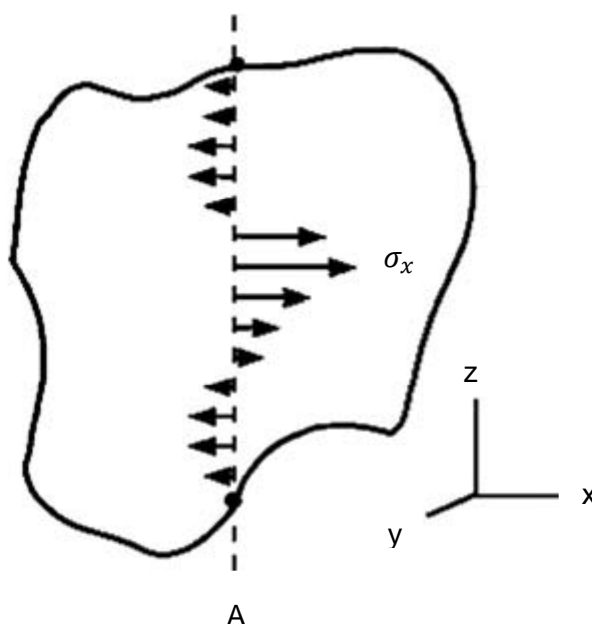
## ÚVOD

Stabilizátorové tyče jsou spolu s pružinami nejčastěji produkovány součástmi z pružinové oceli. Jejich výroba požaduje velmi důkladné zvolení výrobních procesů a jejich parametrů. Každý detail může mít velký vliv na životnost stabilizátorů, proto je nutné procesy řádně zkoumat a parametry regulovat na základě vědecky podložených informací. Tato studie popisuje základní procesy použité při výrobě se zaměřením na proces uvolňování zbytkových napětí s cílem optimalizace procesních parametrů. Optimalizací uvolňování zbytkových napětí lze dosáhnout požadovaných vlastností materiálu a ovlivnění odolnosti proti koroznímu praskání. Dvěma hlavními faktory ovlivňujícími uvolňování zbytkových napětí jsou teplota a čas. V důsledku maximalizace produktivity výroby je nutné provádět proces za co nejkratší dobu, tudíž byla optimalizována pouze vstupní teplota.

## 1 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ

Zbytková napětí jsou definována jako napětí, která zůstávají v součástech po odejmutí vnějšího zatížení [1].

Hodnota zbytkových napětí se liší v závislosti na poloze. Součet vnitřních sil působících na libovolný řez vedený tělesem je roven nule a také součet vnitřních momentů k libovolné ose je roven nule [2,3]. Jinými slovy, tahová zbytková napětí musejí být kompenzována zbytkovými napětími tlakovými [2]. Tato skutečnost je graficky znázorněna na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Silová a momentová rovnováha v libovolném řezu systémem [2].

Matematicky vyjádřeno na řezu AB (1.1 a 1.2) [2]

$$\int \sigma_x w(z) dz = 0 \quad (1.1)$$

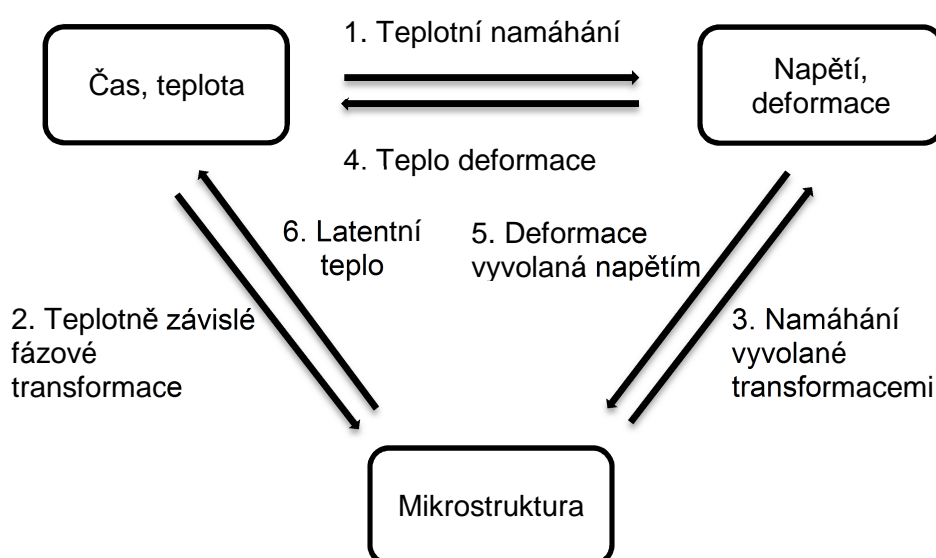
$$\int \sigma_x w(z) z dz = 0 \quad (1.2)$$

kde

$\sigma_x$  – napětí v ose x

$w(z)$  – šířka ve směru osy y jako funkce z

Fenomén zbytkových napětí je nezanedbatelný parametr a musí být brán v potaz. Výrobní procesy vnášejí do materiálu nová zbytková napětí a mají vliv na jejich rozložení. Zbytková napětí jsou výsledkem působení teploty, času, deformace a mikrostruktury materiálu. Jsou odpovědná za borcení mechanických komponentů během výroby i již komponentů vyrobených a také zvyšují náchylnost ke koroznímu praskání. Mají nezanedbatelný vliv na životnost, a jejich přítomnost má stejný vliv na chování součásti jako vnější působící napětí [1,2].



Obr. 1.2 Vztah mezi teplotou, napětím a mikrostrukturou [1].

Zbytková napětí mohou být rozdělena podle několika kritérií. Například, jak již bylo zmíněno, dle typu vnitřního napětí. Při tomto rozdělení rozlišujeme napětí **tahová** a **tlaková**. Nicméně, pokud zvážíme fyziku a chování pevných látek, nejvhodnější je rozdělení zbytkových napětí podle jejich dosahu, neboli dle objemu, ve kterém dosahují rovnováhy [2,4].

Zbytková napětí **I. druhu** (též makroskopická) jsou homogenní v makroskopické oblasti materiálu. V případě polykrystalických ocelí, makroskopická oblast odpovídá většímu počtu krystalů. Pokud je narušena vnitřní silová a momentová rovnováha, v případě existence zbytkových napětí I. druhu nastane změna makroskopických rozměrů tělesa [5].

Zbytková napětí **II. druhu** (také mikroskopická) jsou homogenní v menších oblastech materiálu. U polykrystalických ocelí, je možné definovat takovou oblast jako objem jednoho krystalu. Pokud je narušena silová a momentová rovnováha, nemusí nastat změna makroskopických rozměrů tělesa [3].

Zbytková napětí **III. druhu** jsou nehomogenní v oblastech materiálu, které svými rozměry odpovídají několika atomovým vzdálenostem. Pokud je narušena silová a momentová rovnováha, změna makroskopických rozměrů tělesa nenastane [3].

## 2 ANALÝZA VÝROBNÍCH PROCESŮ

### 2.1 Stabilizátorové tyče

Stabilizátorová tyč je speciálním typem pružiny, vyvinuté pro snížení možnosti převrácení vozidla při průjezdu zatáčkou, pro stabilizování vozidla jako celku a pro zlepšení jízdních vlastností a řízení [6].

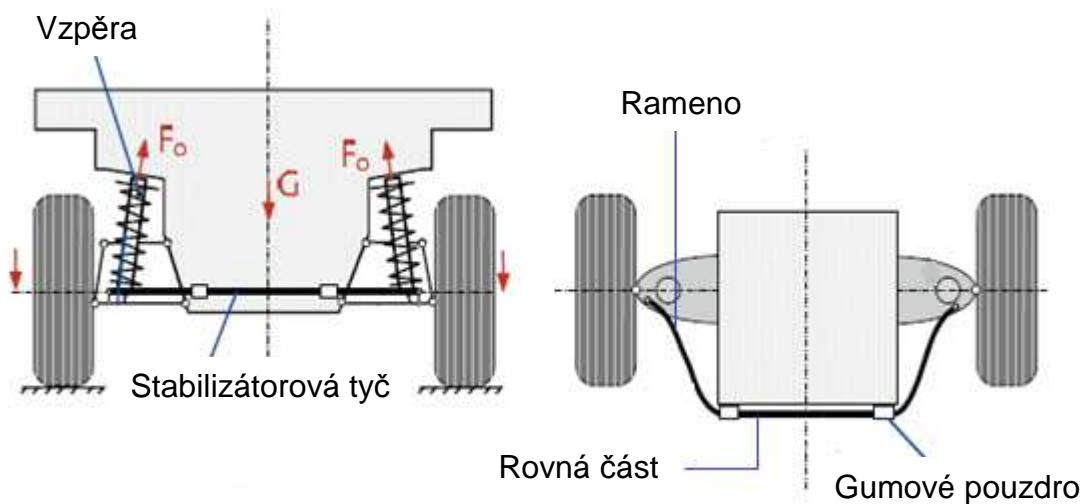
V současné době na poli automobilového průmyslu, společnosti investují značnou část prostředků na snížení hmotnosti svých vozidel. To platí také pro stabilizátorové tyče. Čím je stabilizátorová tyč lehčí, tím je lehčí i celý automobil a v důsledku toho spotřebovává méně paliva. Z důvodu velkého potenciálu k možnému odlehčení vzrostla obliba trubkových stabilizátorových tyčí. Potenciál redukce hmotnosti v tomto případě může být až 50% v porovnání se stabilizátorovými tyčemi z plného materiálu [7].



Obr. 2.1 Stabilizátorová tyč s montážními komponenty.

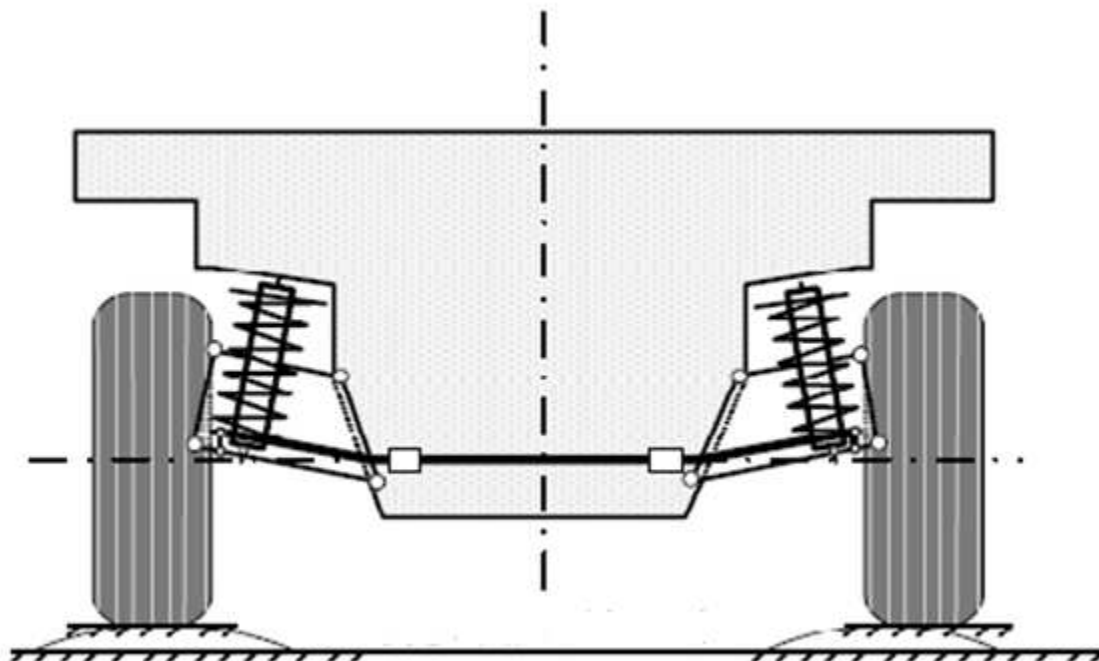
### 2.1.1 Funkce

Jede-li vozidlo po rovné silnici, stabilizátorová tyč zůstává v klidu a nijak se nedeformuje, viz obr. 2.2 [6].



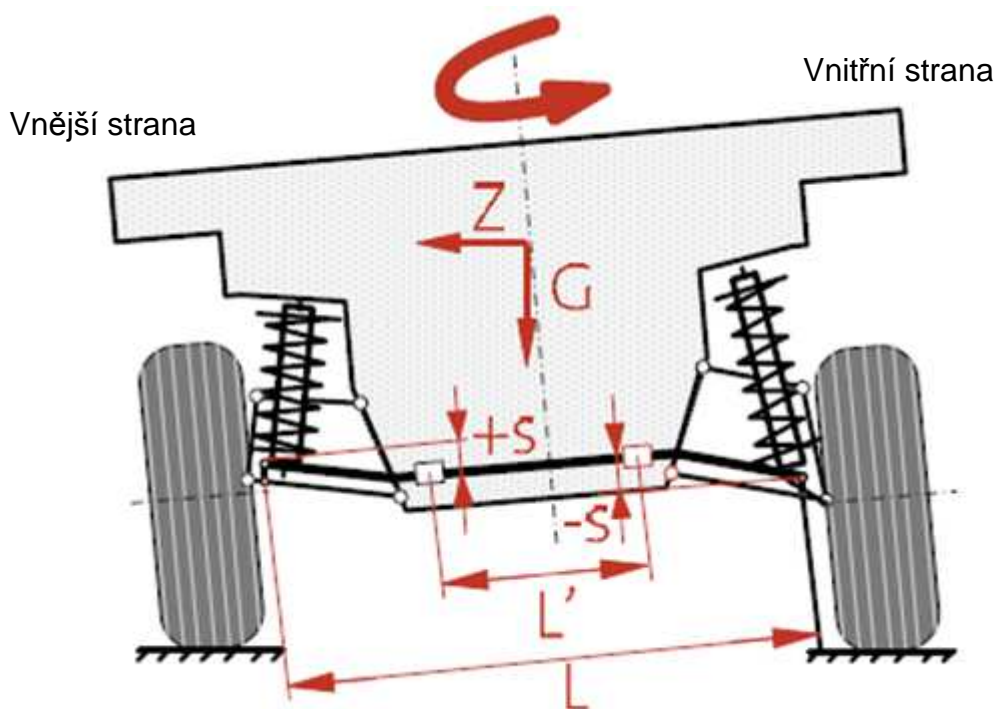
Obr. 2.2 Rovná cesta, stabilizátorová tyč je v klidu [7].

V momentě kdy automobil najede na výmol nebo nerovnost vozovky, pružiny v systému zavěšení se stlačí na stejnou úroveň na obou kolech. Stabilizátorová tyč rotuje v gumových pouzdrech (viz obr. 2.1) a nedeformuje se, viz obr. 2.3 [7].



Obr. 2.3 Rovná vozovka s výmolem [7].

Vozidlo má tendenci převrátit se pokud jeho pohyb není přímočarý, například během zatáček. Právě v průběhu zatáčení, pružina na vnitřní straně automobilu je protažena a pružina na vnější straně je stlačena. Vozidlo se snaží přetočit [6,8]. Ramena stabilizátorové tyče se pohybují v opačném směru a tento pohyb kroutí rovnou část a ohýbá tím pádem ramena tyče, viz obr. 2.4 [7].



Obr. 2.4 Stabilizátorová tyč během zatáčky vlevo [7].

## 2.2 Výrobní procesy použité při výrobě stabilizátorových tyčí

Základním stavebním kamenem výroby jak trubkových stabilizátorů tak stabilizátorů z plného materiálu jsou procesy:

- vytvrzování
- ohýbání
- uvolňování zbytkových napětí
- brokování
- montážní operace

Mezi montážní operace patří například formování konců stabilizátoru nebo práškové lakování. Další operace mohou být přidány v závislosti na konkrétní aplikaci [7].

### 2.2.1 Indukční vytvrzování

Indukční vytvrzování se skládá ze dvou operací.

První z nich je kalení. Kalení je druh tepelného zpracování, jehož cílem je získání určitých materiálových vlastností. Kalení je v metalurgii jedna z nejpoužívanějších metod pro vytvrzování ocelí a může být rozděleno na martenzitické a bainitické. Toto rozdělení závisí na převládající struktuře. Ve většině případů je požadovaná struktura martenzitická [9]. Během kalení je vzorek rychle ochlazen v kalícím mediu. Dvě nejčastěji používaná kalící media jsou voda a olej [10].

Po kalícím procesu je vzorek velmi tvrdý a křehký. Vysoká je také hodnota zbytkových napětí [10]. Z těchto důvodů musí následovat proces popouštění. Vzorek je zahřát na teplotu nižší než  $A_1$ , následuje výdrž na teplotě a ochlazování regulovanou rychlostí. Zbytková napětí mohou způsobit popraskání zakaleného vzorku. Popouštění by tedy mělo být provedeno ihned po procesu kalení [9]. Popouštění také zvyšuje tažnost a houževnatost materiálu, čehož se využívá při výrobě ocelových součástí [11].

V průběhu indukčního vytvrzování je vzorek zahříván s pomocí indukovaných proudů o střední až vysoké frekvenci (1000 – 15000 Hz nebo 150 kHz – 2 MHz). Induktorem je cívka, přes kterou tyč prochází, viz obr. 2.6. Střídavý proud přítomný v induktoru, indukuje v tyči magnetické pole a vznikají vírové proudy (Foucaultovy proudy) [9]. Během zahřívání probíhá krátká austenizace. Tyče jsou poté ochlazeny ve vodě. Ve druhé fázi jsou tyče opět indukčně zahřáty, tentokrát však na popouštěcí teplotu a následně ochlazeny ve vodě.

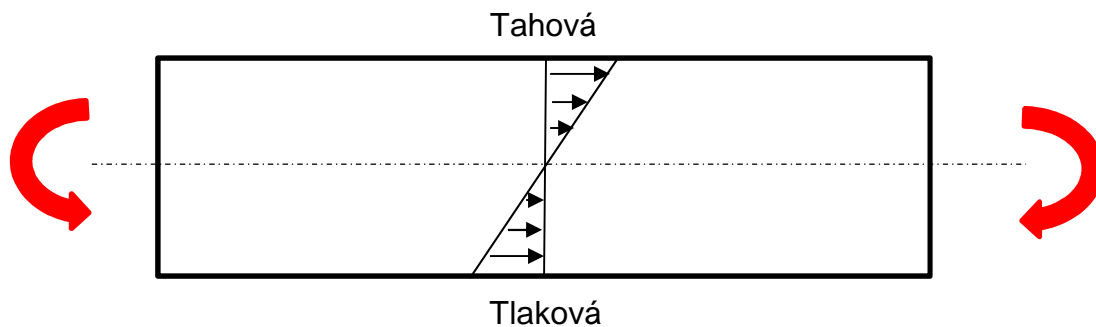


Obr. 2.6 Trubková tyč procházející sérií cívek [7].

Pro cyklicky namáhané součásti je nutné zajistit distribuci tlakových zbytkových napětí v nejvíce namáhané zóně, tedy v tenké povrchové vrstvě. Indukční vytvrzování splňuje tento předpoklad. Tlaková zbytková napětí jsou generována v tenké povrchové vrstvě díky martenzitické transformaci [9].

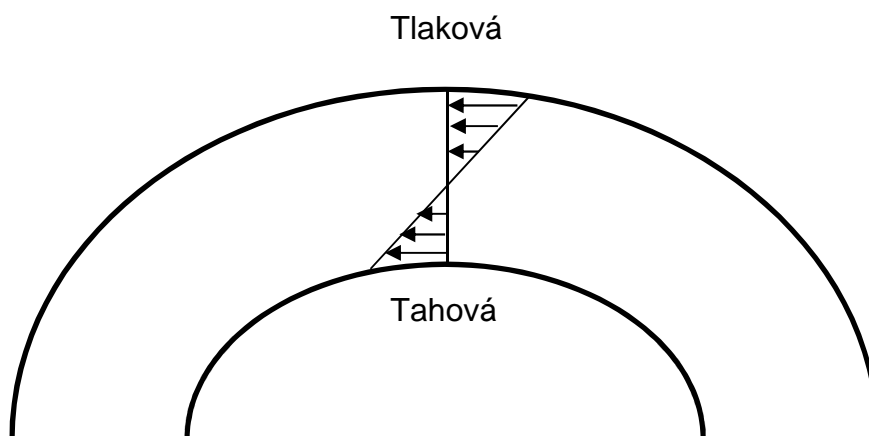
### 2.2.2 Ohýbání

Při ohýbání tyče je rozložení napětí znázorněno na obr. 2.10. Na vnějším povrchu tyče je napětí tahové a na vnitřním povrchu působí napětí tlakové. Toto rozložení vzniká díky ohybovému momentu.



Obr. 2.10 Rozložení napětí při procesu ohýbání.

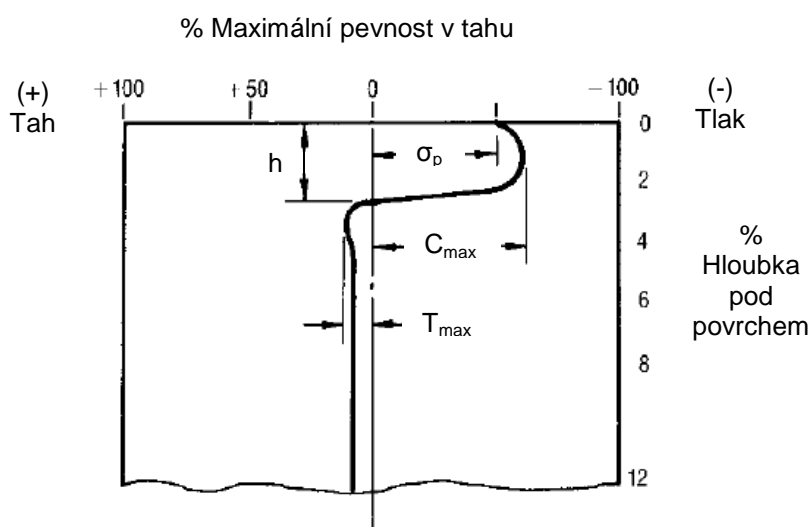
Po odejmutí vnějšího zatížení je stabilizátorová tyč ohnuta do požadovaného tvaru a zbytková napětí nyní působí v opačném směru než napětí přítomná při zatížení. Na vnitřní straně ohybu je nyní oblast s tahovými zbytkovými napětími a na vnější straně ohybu se nachází oblast tlakových zbytkových napětí, viz obr. 2.11. Právě tahová zbytková napětí na vnitřní straně ohybu jsou klíčová, z důvodu jejich vlivu na životnost, šíření trhlin, korozní praskání, penetraci vodíkem atd.



Obr. 2.11 Rozložení zbytkových napětí po ohybu.

### 2.2.3 Brokování

Brokování je proces, při kterém dochází ke tváření povrchu stabilizátorové tyče za studena. Na povrch dopadají velkou rychlostí kovové projektily [13]. Jako projektily, neboli bombardovací medium mohou být použity kuličky z vysokopevnostního materiálu. Když kulička zasáhne povrch vytvoří důlek. Při dopadu jsou vlákna materiálu namáhána tahem. V momentě kdy projektil opouští povrch, vlákna se snaží vrátit do své původní polohy a tvaru. Díky tomu je pomocí bombardovacího media vytvořena hemisféra vysoce stlačeného materiálu tvářeného za studena a vrstva tlakových zbytkových napětí pod povrchem materiálu. Tato skutečnost je znázorněna na obr. 2.12 [13,14].



Obr. 2.12 Rozložení zbytkových napětí při brokování [13].

kde  $\sigma_p$  – napětí na povrchu  
 $C_{max}$  – maximální hodnota tlakových zbytkových napětí  
 $h$  – hloubka dosahu tlakových zbytkových napětí  
 $T_{max}$  – maximální hodnota tahových zbytkových napětí.

Tahová zbytková napětí blíže středu součásti kompenzují tlaková zbytková napětí na povrchu. Celý systém tím zůstává v rovnováze.

Brokování je velmi oblíbený proces pro zvýšení únavové pevnosti komponentů. Další podstatnou výhodou je zastavování potenciálního vzniku trhlin. Pro zastavení vzniku trhlin díky přítomnosti zbytkových napětí platí:

- 1) trhlina se nebude šířit, pokud nejsou přítomna tahová zbytková napětí. Tento typ napjatost podporuje a způsobuje otevření a šíření trhliny.
- 2) trhlina se neotevře, pokud se nachází v oblasti s tlakovými zbytkovými napětími. Ty trhlinu tlačí na trhlinu a uzavírají ji.

Díky výše zmíněným faktorům má brokování významný vliv na životnost nejen stabilizátorových tyčí [13,15].

### 3 MĚŘENÍ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI

Pro měření zbytkové napjatosti bylo vyvinuto mnoho odlišných metod, zejména díky různorodé geometrii testovaných součástí. Metody mohou být rozděleny podle vlivu, který mají na měřené komponenty. Dle tohoto kritéria budou představeny metody destruktivní a nedestruktivní. Pro účely projektu byla pro měření zbytkových napětí použita metoda rentgenové difrakce. Z tohoto důvodu bude popsána podrobněji [1,16].

#### 3.1 Destruktivní metody

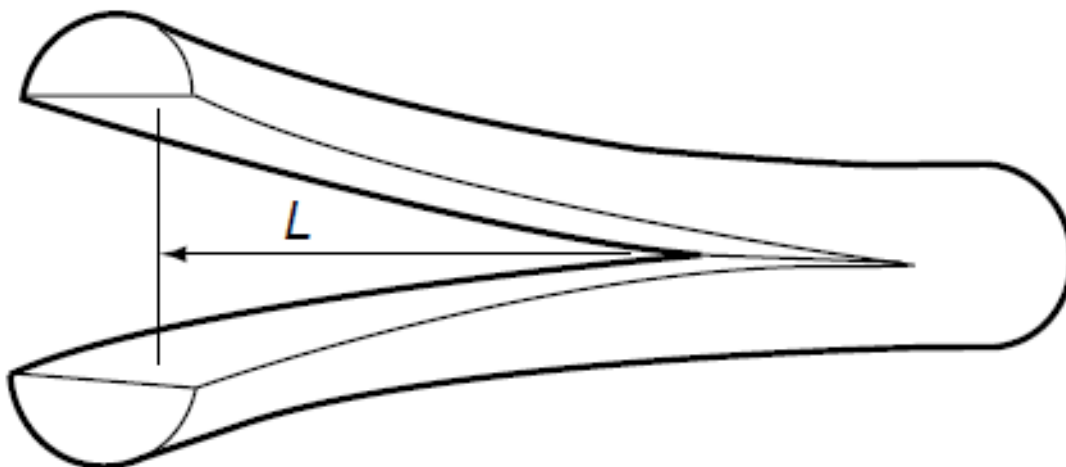
Destruktivní metody jsou aplikovány pokud je opodstatněné úplné nebo částečné zničení měřených součástí pro zjištění zbytkové napjatosti. Obvykle jsou tyto metody použity v případech, kdy testované vzorky tvoří jen malou část celkového vyrobeného množství a když tyto vzorky reprezentují i ostatní vyprodukované součásti. Jinými slovy, pokud se neliší stav zbytkové napjatosti mezi vzorky a zbytkem celkové produkce [1]. Výhodou destruktivních metod je široká aplikovatelnost výsledků a relativně jednoduché vybavení potřebné k měření [16].

Z široké škály destruktivních metod budou popsány metody:

- štípací metoda
- metoda odstraňování vrstev
- metoda vrtání otvoru
- metoda uvolňování sloupku

##### 3.1.1 Štípací metoda

Štípací metoda je využívána ve výrobě jako rychlý porovnávací test. Podstatou metody je vyhotovení hlubokého řezu do materiálu, viz obr. 3.1. Z případného otevírání nebo zavírání materiálu lze odhadnout přibližnou velikost zbytkových napětí. Chování materiálu po provedení řezu je možné vidět na obr. 3.2 [1,16].



Obr. 3.1 Hluboký řez materiálem [1]



Obr. 3.2 Chování materiálu po provedení řezu [16]

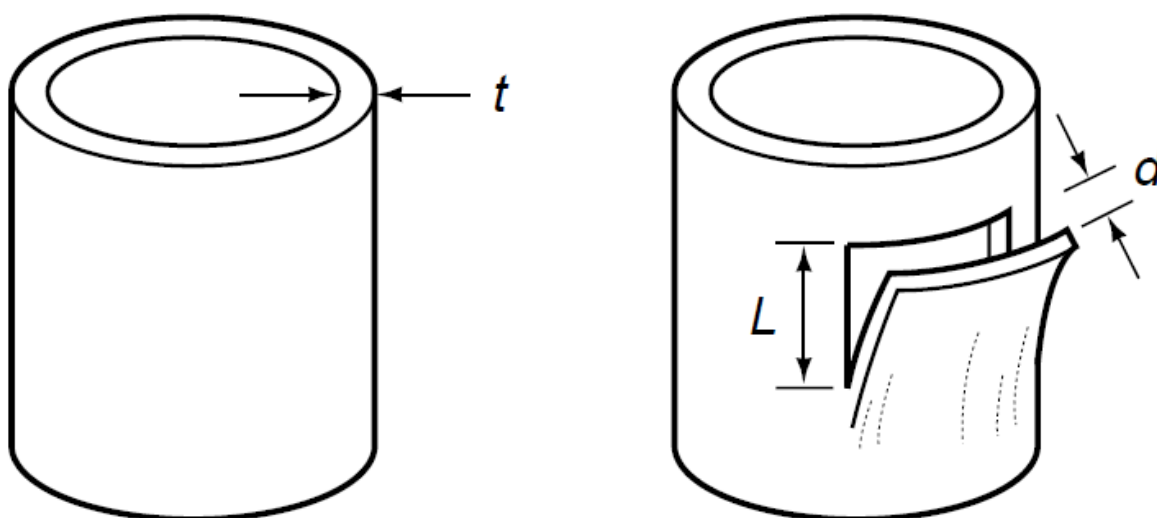
Štípací metoda je často užívána pro měření zbytkové napjatosti v tenkostěnných trubkách. Existuje možnost měřit jak napětí podélná, tak i napětí obvodová [16].

Podélná napětí v tenkostěnné trubce (viz obr. 3.3) lze vypočítat jako [1]:

$$\sigma = \frac{Etd}{L^2} \quad (1.3)$$

kde

- E – Youngův modul
- t – tloušťka stěny
- L – délka řezu
- d – vychýlení



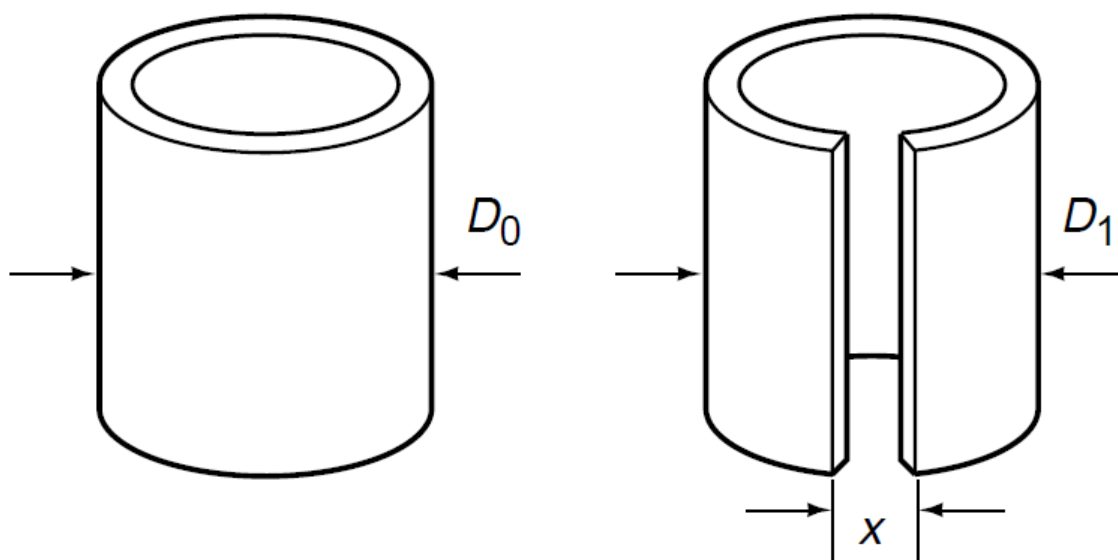
Obr. 3.3 Způsob měření podélných zbytkových napětí [1].

Obvodová napětí jsou měřitelná z vychýlení  $x$  (viz obr. 3.4) a vypočitatelná z [1]:

$$\sigma = Et \left( \frac{1}{D_0} - \frac{1}{\left(\frac{x}{\pi} + D_0\right)} \right) \quad (1.4)$$

kde

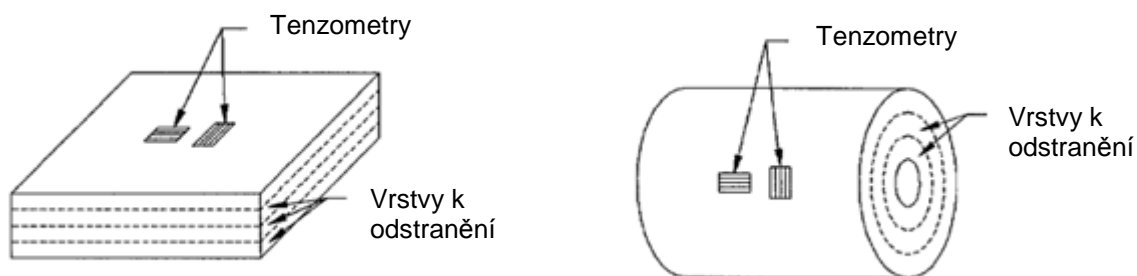
- E – Youngův modul
- t – tloušťka stěny
- $D_0$  – počáteční průměr
- $x$  – vychýlení



Obr. 3.4 Metoda pro měření obvodových zbytkových napětí [1].

### 3.1.2 Metoda odstraňování vrstev

Metoda k měření zbytkové napjatosti využívá principu postupného odstraňování vrstev. Tenzometry měří na povrchu testovaného vzorku deformace, které jsou vyvolány právě odstraňováním vrstev z povrchu protilehlého k měřenému povrchu. Umístění tenzometrů a princip metody je zobrazen na obr. 3.5 [16].



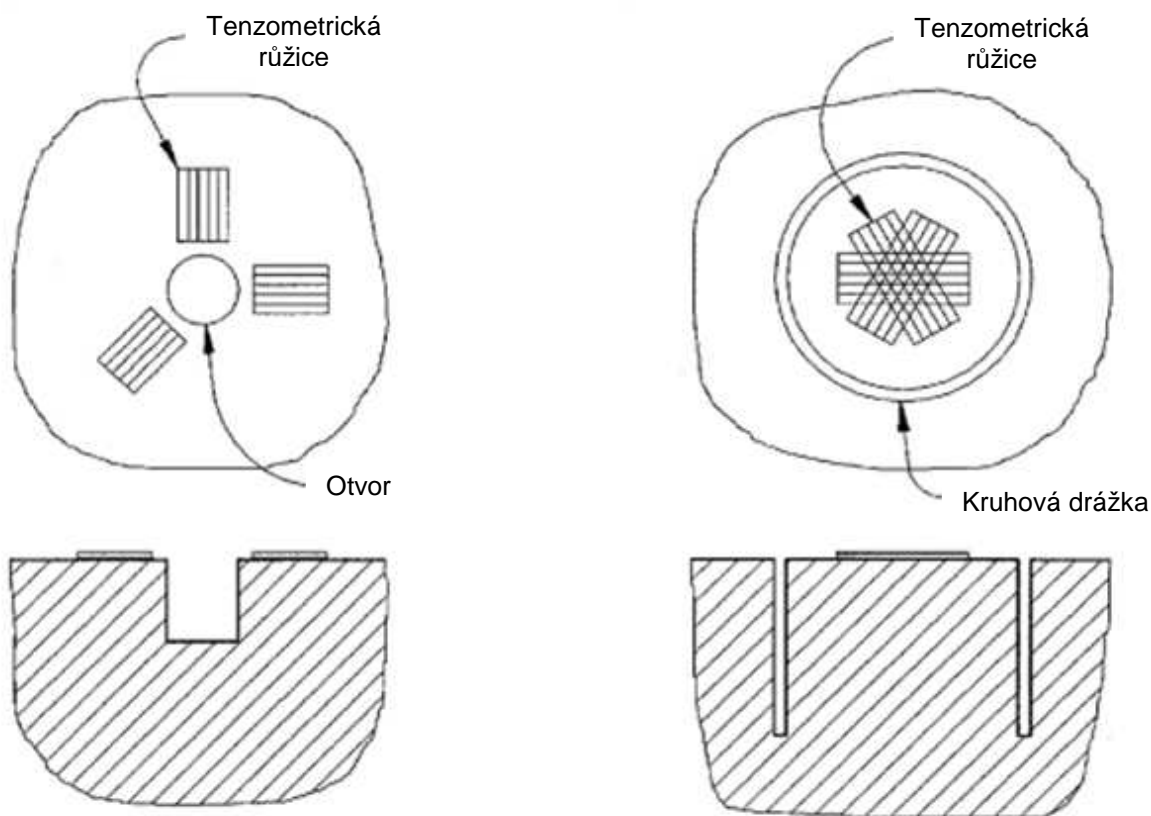
Obr. 3.5 Metoda odstraňování vrstev [16].

### 3.1.3 Metoda vrtání otvoru

Podstatou metody je vyvrtání malého otvoru do povrchu vzorku a následné měření deformací na okolním povrchu s pomocí tenzometrických růžic. Hloubka měření odpovídá průměru vrtané díry. Metoda vrtání otvoru je jedním z nejvíce praktikovaných způsobů měření zbytkové napjatosti. Její přednosti jsou zejména rychlost, spolehlivost a poměrně nízká cena. Existují však také nevýhody. Je například nutné vyvarovat se oblastí s napětím vyšším než je jedna třetina hodnoty meze kluzu materiálu. Takové napětí může iniciovat vznik plastické deformace při vrtání otvoru což má za následek vliv na správnost měření [1].

### 3.1.4 Metoda uvolňování sloupku

Metoda uvolňování sloupku je obdobnou verzí metody vrtání otvoru s tím rozdílem, že při této metodě se zbytková napětí měří z centrální oblasti. Kolem centrální oblasti je vyvrtána kruhová drážka. Výhoda metody oproti metodě předchozí spočívá v zisku většího množství povrchových deformací a možnosti měření ve větší hloubce. Metoda však mnohem více poškozuje testovaný vzorek [16].



Obr. 3.6 Porovnání metod vrtání otvoru a uvolňování sloupku [16].

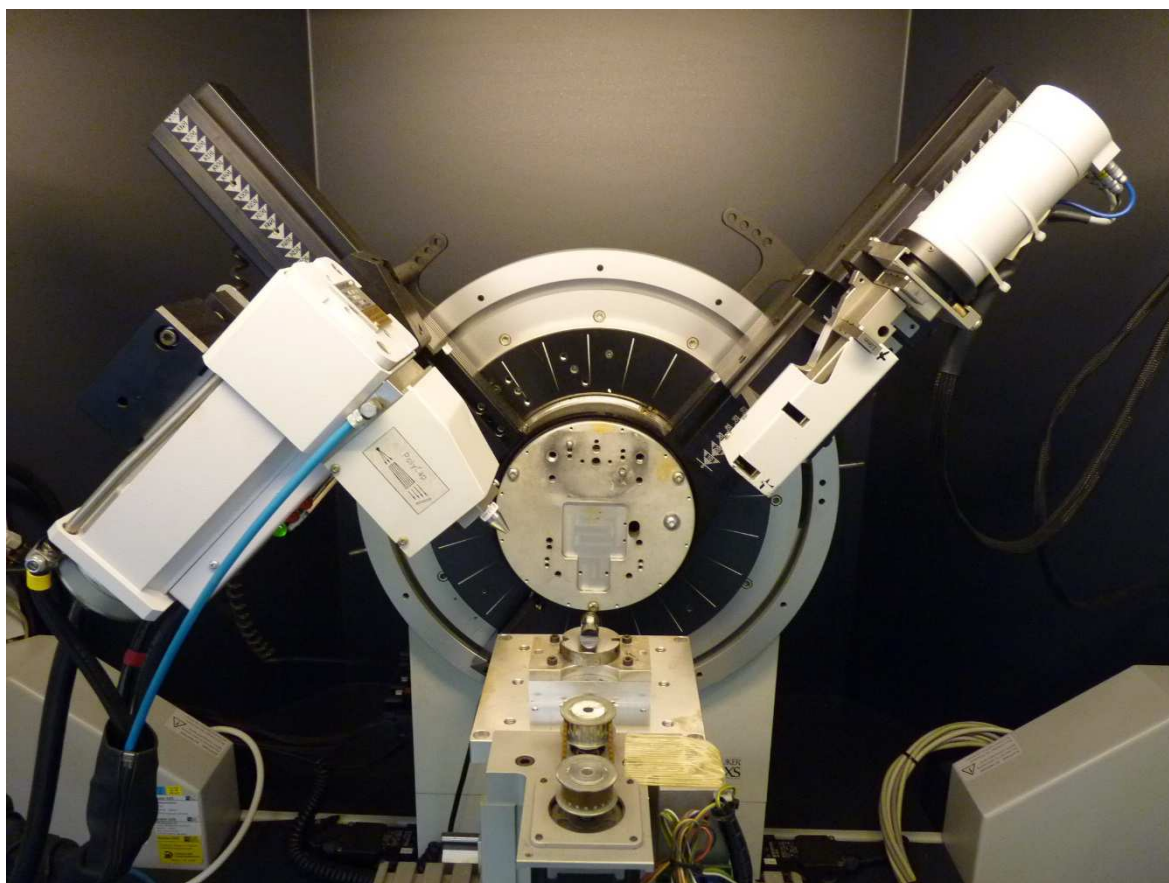
### 3.2 Nedestruktivní metody

Když je zbytkové napětí o velikosti nižší než mez kluzu materiálu přítomno v součásti, ta se elasticky deformuje. Elastická deformace vzdálenosti atomových rovin v krystalech je základem nedestruktivních metod [1,17]. V této kapitole budou popsány dvě difrakční metody, a to:

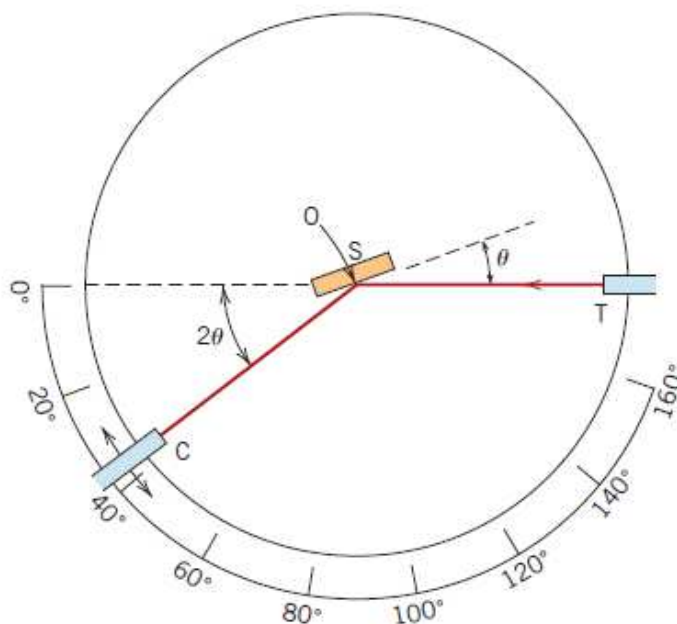
- rentgenová difrakční metoda
- neutronová difrakční metoda

#### 3.2.1 Rentgenová difrakční metoda

Metoda rentgenové difrakce je v současné době jeden z nejčastěji používaných způsobů měření zbytkové napjatosti, zejména u většiny polykrystalických materiálů. Metoda je extrémně spolehlivá. Mezi její nepopsatelné výhody patří rychlost a aplikovatelnost na širokou škálu geometrií vzorků. Další z výhod je odolnost proti vlivu parametrů jako je tvrdost nebo stupeň tváření za studena na samotné výsledky měření. Existují různé typy difraktometrů. Nejobvyklejší je přenosný difraktometr a difraktometry, které jsou nepřenosné a umístěné v laboratoři, viz obr. 3.7 [1,3,18].



Obr. 3.7 Laboratorní difraktometr použitý pro účely projektu.

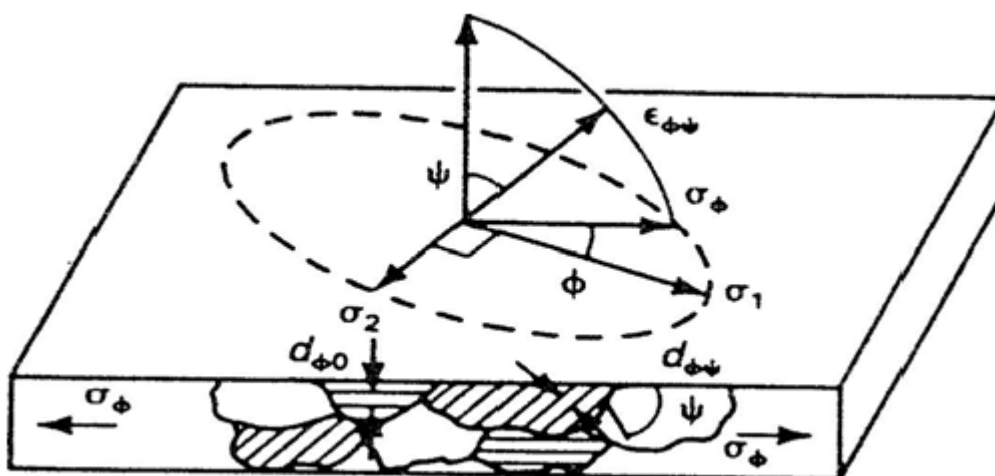


Obr. 3.8 Schéma rentgenového difraktometru [19].

kde

- T – zdroj rentgenových paprsků
- C – detektor
- S – vzorek
- O – osa rotace

Rentgenový paprsek proniká jen do velmi malé hloubky materiálu, přesněji řečeno do hloubky menší než 0,025 mm. Z tohoto důvodu lze objem, na kterém probíhá difrakce paprsků znázornit jako povrch namáhaný rovinným napětím (viz obr. 3.9). Rovinné napětí je popsáno dvěma hlavními napětími,  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$ . V tomto případě, normálové napětí kolmé na povrch není přítomno [1,18,20].



Obr. 3.9 Model použitý pro výpočet zbytkové napjatosti [20].

Vektor deformace  $\varepsilon_{\phi\psi}$  je vyjádřen jako [18]:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{\phi} \sin^2 \psi - \left(\frac{\nu}{E}\right) (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1.5)$$

kde  $E$  – Youngův modul  
 $\nu$  – Poissonova konstanta  
 $\psi$  – úhel k normále povrchu  
 $\sigma_{\phi}$  – zbytkové napětí

Kovy se skládají z velkého množství krystalů nebo malých zrn a jsou orientovány náhodně. Avšak, pouze krystaly splňující Braggův zákon umožňují difrakci rentgenových paprsků [18,19]:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (1.6)$$

kde  $\lambda$  – vlnová délka rentgenových paprsků  
 $n$  – řád interference, většinou roven 1  
 $d$  – vzdálenost mezi atomovými rovinami  
 $\theta$  – difrakční úhel

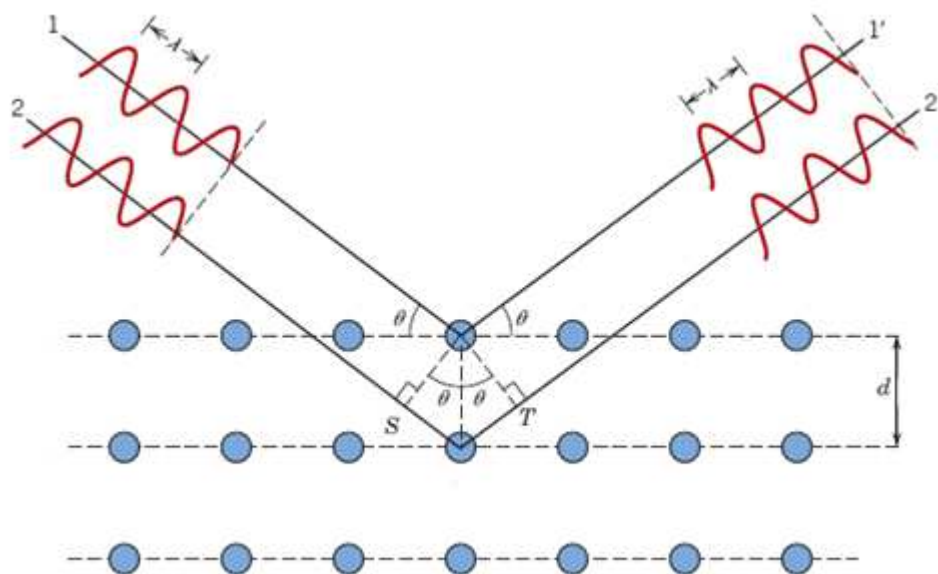
Vektor deformace  $\varepsilon_{\phi\psi}$  lze také zapsat jako funkci vzdáleností atomových rovin [18]:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad (1.7)$$

kde  $d_0$  – vzdálenost při nezatíženém stavu  
 $d_{\phi\psi}$  – vzdálenost pro libovolnou orientaci, viz obr. 3.9

Následuje substituce rovnice 1.7 do rovnice 1.5. Vzdálenost atomových rovin pro libovolnou orientaci  $d_{\phi\psi}$  je možné zapsat jako funkci elastických constant v krystalografickém směru (hkl) použitým při měření zbytkové napjatosti a jako funkci přítomných napětí [18]:

$$d(\phi, \psi) = \left(\frac{1 + \nu}{E}\right)_{hkl} \sigma_{\phi} d_0 \sin^2 \psi - \left(\frac{\nu}{E}\right) d_0 (\sigma_1 + \sigma_2) + d_0 \quad (1.8)$$



Obr 3.10 Difrakce rentgenových paprsků [19].

### 3.2.2 Neutronová difrakční metoda

Princip neutronové difrakční metody je podobný jako princip metody využívající difrakce rentgenových paprsků. Měřena je vzdálenost mezi atomovými rovinami ovlivněna přítomností zbytkových napětí. Výhodou metody neutronové difrakce je hloubka možného měření. Paprsek neutronů umožňuje získat dat z hloubky několika desítek milimetrů. Nevýhodami jsou dlouhý čas měření a nutnost provedení měření v jaderném reaktoru, což může být značně komplikované. Nicméně i přes tyto nevýhody, metoda je používána například pro zjištění zbytkové napjatosti v ocelových svarech [1,17].

## 4 UVOLŇOVÁNÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ

Uvolňování zbytkových napětí je klíčovým procesem při výrobě součástí z pružinové oceli. Cílem procesu je zbavení se nahromaděných zbytkových napětí, která vznikla v materiálu vlivem předchozích výrobních operací. Uvolňování zbytkových napětí lze rozdělit do tří fází:

- 1.) **Zahřátí** součásti na teplotu nižší než je teplota  $A_{c1}$
- 2.) **Výdrž** na teplotě. Doba udržování teploty musí být dostatečně dlouhá pro potřebné zredukování zbytkové napjatosti.
- 3.) Následné **ochlazení** vzorku. Ochlazování musí být kontrolované, rovnoměrné a jako ochlazovací medium je nutné zvolit vzduch. Pokud je zvoleno jiné ochlazovací medium nebo ochlazování není rovnoměrné, zbytková napětí jsou znovu zavedena do materiálu [21,22,23,24,25].

Stěžejní parametry ovlivňující proces jsou **teplota**, **čas** a **čas na teplotě**. Běžné rozsahy teplot jsou:

- 55°C to 650°C pro nelegované a nízkolegované oceli
- 600°C to 700°C pro rychlořeznou nástrojovou ocel [21].

Tepelný efekt parametrů uvolňování zbytkové napjatosti lze vyjádřit pomocí **Larson-Millerovy rovnice** [22]:

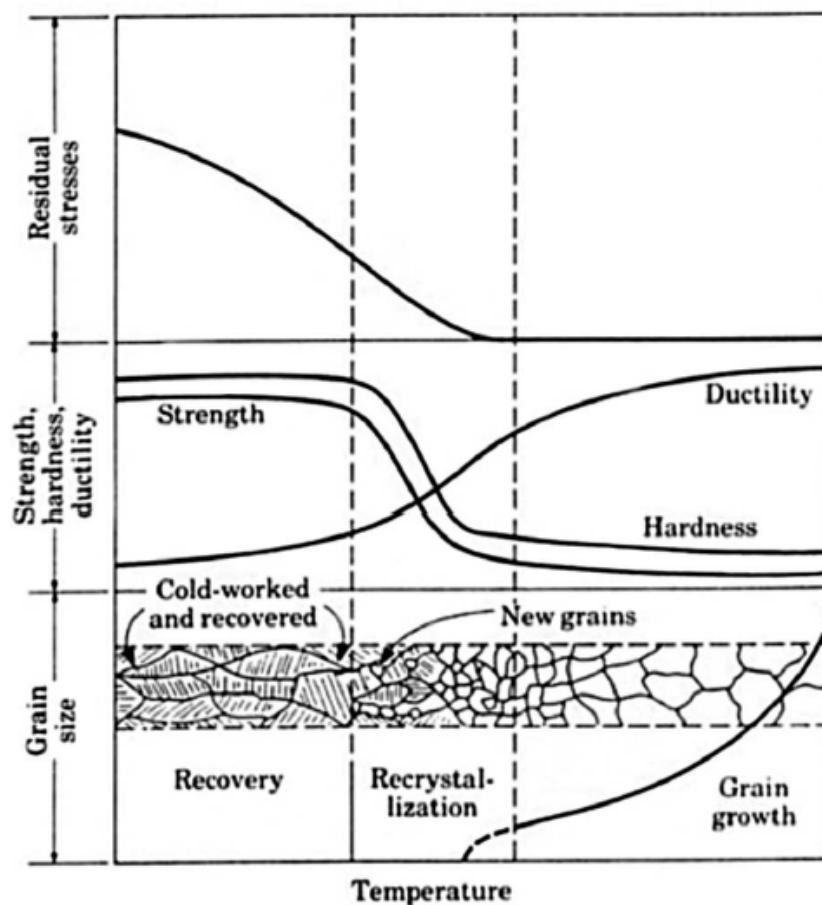
$$P = T(C + \log t) 10^{-3} \quad (1.9)$$

kde  $T$  – teplota [K]  
 $t$  – čas [h]  
 $C$  – konstanta

Konstanta  $C$  je získána pomocí rovnice [22]:

$$C = 21,3 - 5,8(\% \text{ obsahu uhlíku v oceli}) \quad (1.10)$$

Pro úplné uvolnění zbytkových napětí, je třeba materiál dostatečně zahřát pro dosažení úplné rekrytalizace. Rekrytalizace snižuje pevnost materiálu, což může vyvolat komplikace při aplikaci součástí. Nicméně proces uvolňování zbytkové napjatosti při zvýšené teplotě umožňuje odstranění většiny zbytkových napětí bez výrazné degradace pevnosti. Během procesu nenastávají žádné změny mikrostruktury [21].



Obr. 4.1 Vliv rekrytalizace na materiálové vlastnosti [21].

## 4.1 Vybavení

Pece používané pro uvolňování zbytkových napětí lze rozdělit na dva typy [23]:

- 1.) komorová pec
- 2.) průběžná ohřívací pec

### 4.1.1 Komorová pec

Komorová pec se skládá z ohřevného systému komory, izolované komory a dveří umožňujících přístup do komory. Komorové pece nacházejí využití zejména při tepelném zpracování nižšího počtu komponentů a také pokud geometrie nebo velikost součásti neumožňuje zpracování v peci průběžné ohřívací. Komorové pece jsou vhodné pro použití v prototypové výrobě, díky možnosti změny cyklů tepelného zpracování a díky ekonomice procesu pro malé série výrobků [23].



Obr. 4.2 Komorová pec v prototypové výrobě

#### 4.1.2 Průběžná ohřivací pec

Složení průběžné ohřivací pece je stejné jako složení pece komorové. Když se vzorek pohybuje pecí, probíhají nepřerušované cykly. Průběžné ohřivací pece umožňují výbornou opakovatelnost těchto časově a teplotně závislých cyklů. Jsou tudíž snadno automatizovatelné a vhodné pro seriovou výrobu [23].



Obr. 4.4 Starší model průběžné ohřivací pece.

## 4.2 Vliv parametrů procesu na zbytkovou napjatost

K uvolňování zbytkové napjatosti ze stabilizátorových tyčí se používají parametry:

Tabulka 4.1

Teplota	Čas
250°C	22 min

Výše uvedené parametry jsou platné pro nový model průběžné ohřívací pece ze seriové výroby.

Pro některé modely stabilizátorových tyčí je možné použít i starší model pece. Pro tuto pec jsou parametry následující:

Tabulka 4.2

Teplota	Čas
250°C	40 min

Rozdíl v parametrech je dán stavbou pece. Parametry odpovídají nejvyšším možným rychlostem pecí pro dosažení maximální produktivity. Efekt na stabilizátory pro oba typy pecí je však shodný.

Pro testování byly zvoleny parametry:

Tabulka 4.3

Teplota	Čas
230°C	22 min
240°C	22 min
250°C	22 min

Při testech byly vzorky nařezány z nejrizikovějších oblastí stabilizátorových tyčí. Ty jsou zvýrazněny na obr. 4.5.



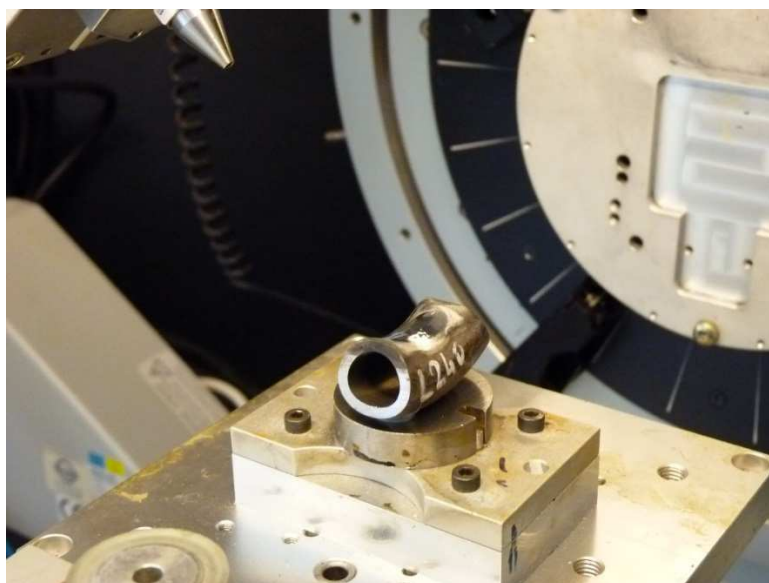
Obr 4.5 Kritické oblasti z hlediska zbytkové napjatosti.

Vzorky byly odebrány z obou ramen stabilizátorových tyčí, tzn. z každého stabilizátoru byly testovány dva vzorky. Pro všechny testované teploty byly zvoleny dvě stabilizátorové tyče. Pro porovnání byly testovány i vzorky ze dvou tyčí ještě před samotným procesem uvolňování zbytkových napětí.



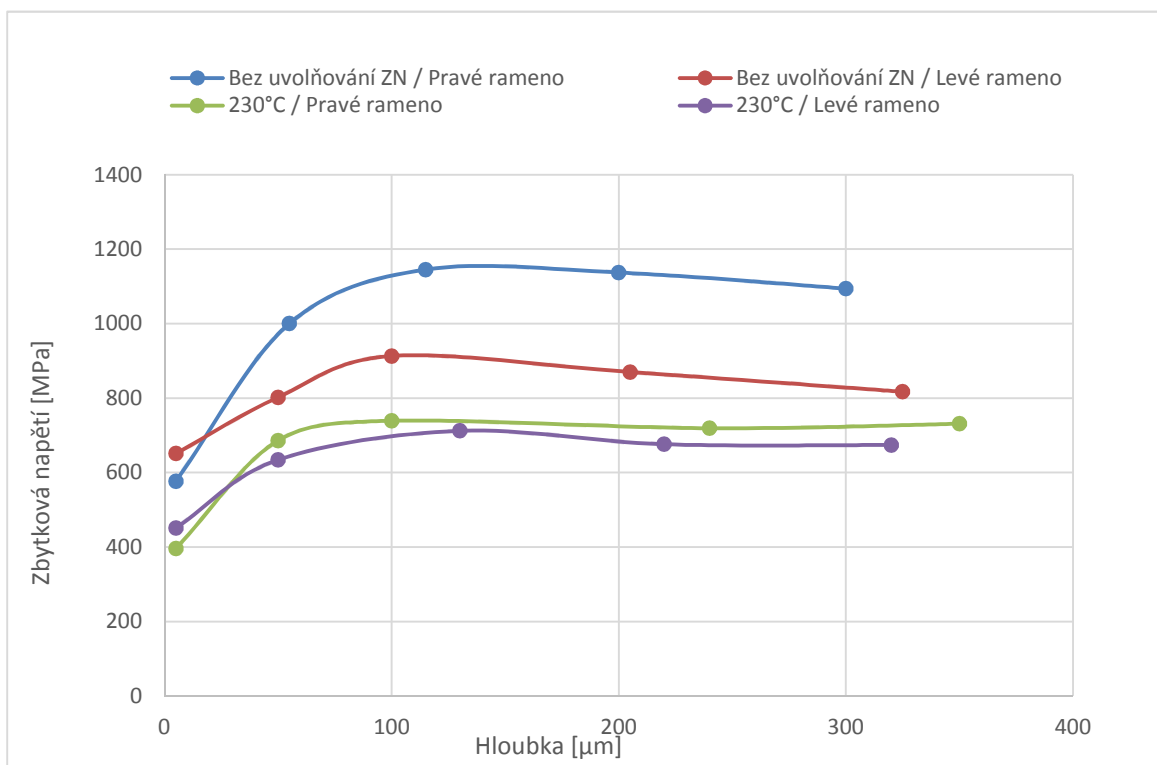
Obr 4.6 Vzorky po odřezání ze stabilizátorových tyčí.

Zbytková napětí byla změřena s využitím rentgenové difrakční metody. Cílem celého měření bylo vyšetřit průběh tahových zbytkových napětí v různých hloubkách. Pro vytvoření ideálních podmínek při měření jsou jednotlivé vrstvy vzorku odleptávány z vnitřního povrchu s využitím technologie elektrolytického odleptávání. V hloubce **150 – 300  $\mu\text{m}$**  nesmí hodnota zbytkových napětí překročit **800 MPa**.

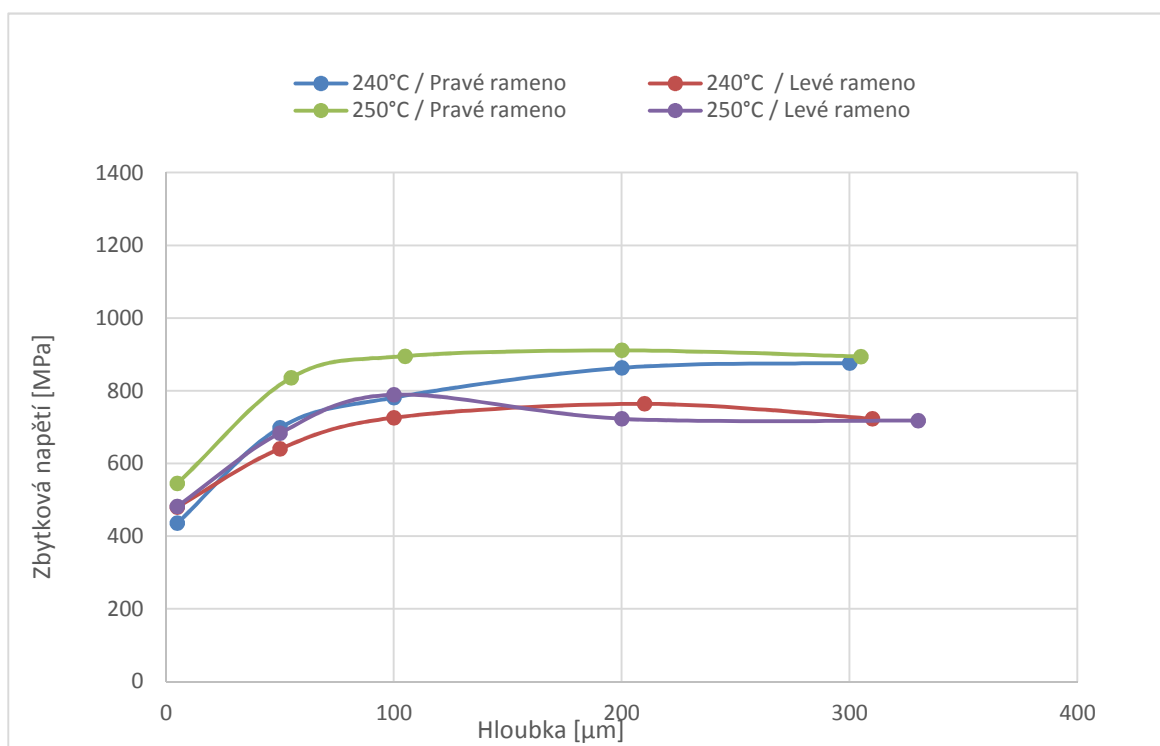


Obr. 4.7 Vzorek připevněný na laboratorním difraktometru

Získané profily zbytkových napětí jsou následující:



Obr. 4.8 Hodnoty tahových zbytkových napětí pro vzorky před procesem uvolňování zbytkových napětí a po uvolňování při teplotě 230°C.



Obr 4.9 Hodnoty tahových zbytkových napětí pro vzorky po uvolňování při teplotách 240°C a 250°C.

Závěr měření:

Ve sledovaném intervalu 150 – 300  $\mu\text{m}$  je hodnota zbytkových napětí pro stabilizátory bez uvolňování zbytkových napětí mnohonásobně vyšší, než je 800 MPa.

Stabilizátory, pro které byla použita teplota 230°C odpovídají požadavkům. Hodnota zbytkových napětí je nižší než 800 MPa.

Pro stabilizátory, uvolňované za teplot 240 a 250°C jsou hodnoty zbytkové napjatosti nižší než 800 MPa pro vzorky odebrané z levých ramen stabilizátorů. Zbytková napětí pro vzorky nařezané z ramen pravých přesahují hodnotu 800 MPa rozdílem lišícím se do 100 MPa. Tento rozdíl zbytkových napětí může být způsoben nerovnoměrným řezem při přípravě vzorků.

Všechny zvolené teploty pro proces uvolňování zbytkových napětí vyhovují.

**4.3 Vliv parametrů procesu na hodnoty meze pevnosti v tahu a meze kluzu**

Pro měření byly nařezány vzorky z rovné části stabilizátorové tyče o rozměrech:

Tabulka 4.4

Délka	Vnější průměr tyče	Tloušťka stěny
700 mm	20, 6 mm	2, 7 mm

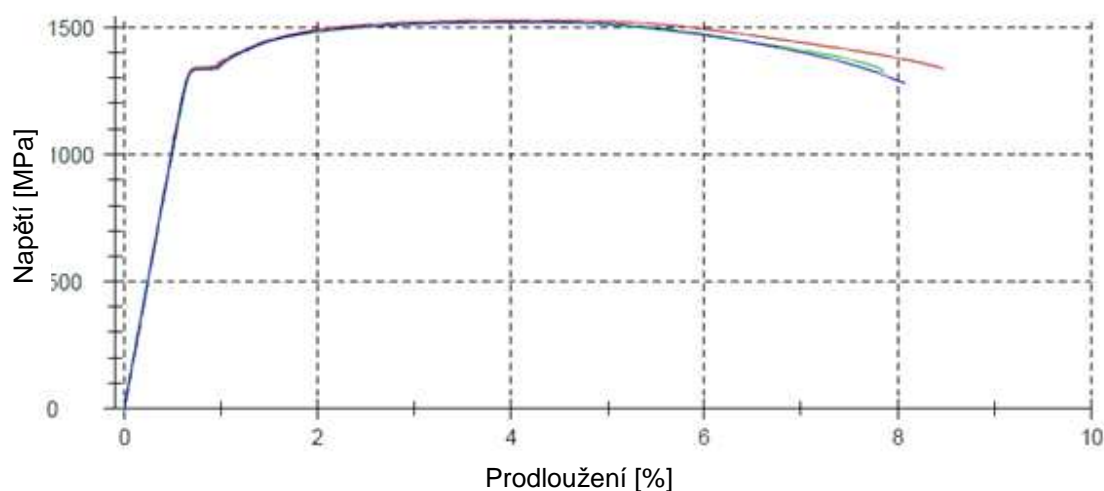
Měření byla provedena na stroji Zwick/Roell a výsledky následně vyhodnoceny v programu testXpert II.



Obr 4.11 Tahová zkouška a operace stroje Zwick/Roell.

Tabulka 4.5 Výsledky měření

Tepnota uvolňování napětí [°C]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]
x	1387	1676
x	1409	1673
x	1394	1675
230	1333	1560
230	1348	1560
230	1331	1562
240	1346	1540
240	1338	1537
240	1335	1539
250	1343	1528
250	1334	1519
250	1333	1521



Obr. 4.12. Ukázka průběhu tahové zkoušky pro zvolenou teplotu 250°C.

Závěry měření:

Požadovaná hodnota meze pevnosti v tahu je  $1530 \text{ MPa} \pm 15 \text{ MPa}$  a meze kluzu  $1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ . Z tabulky naměřených hodnot je jasně viditelné, že hodnoty meze pevnosti jsou příliš vysoké pro stabilizátory bez uvolňování zbytkových napětí a pro stabilizátory uvolňované při teplotě 230°C.

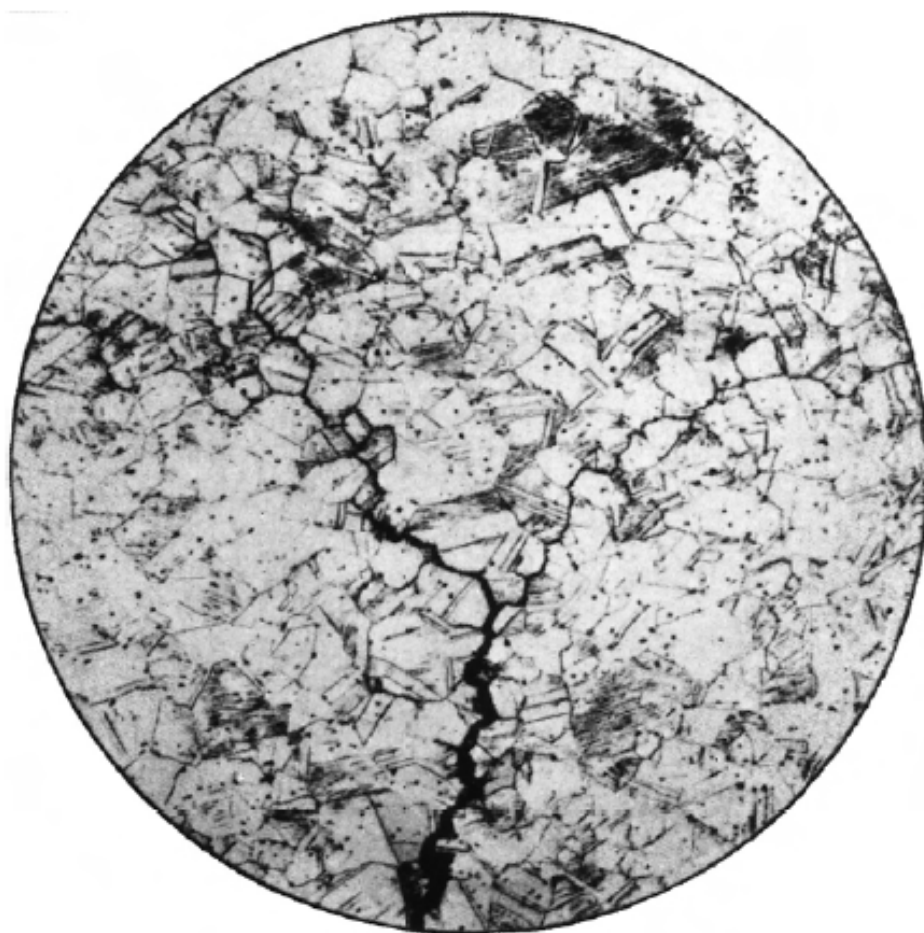
Stabilizátory, pro které byla použity teploty 240 a 250°C odpovídají intervalu meze pevnosti v tahu  $1530 \text{ MPa} \pm 15 \text{ MPa}$ .

Stabilizátory, pro které bylo provedeno uvolňování zbytkových napětí na třech zvolených teplotách splňují požadavek meze kluzu v intervalu  $1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ .

## 5 KOROZNÍ PRASKÁNÍ

Korozní praskání popisuje vznik a šíření trhlin v kovech a slitinách za současného působení tahových zbytkových napětí a korozního prostředí [26].

Jedním z faktorů ovlivňujících korozní chování materiálu je **vodíková křehkost**. Díky penetraci materiálu vodíkem dochází v kovech i slitinách ke snižování tvárnosti a pevnosti v tahu. Vodík je velmi malý atom. Snadno prochází mezi atomy kovu v krystalu, a proto je jeho difuze rychlejší než je tomu u větších atomů [19]. Difunduje do oblastí s vysokou hodnotou tahových zbytkových napětí. Jeho vliv je nejvýraznější u vysokopevnostních ocelí, tedy ocelí s pevností v tahu vyšší než 1240 MPa [27]. Zvýšení pevnosti v tahu vede k vyšší náchylnosti materiálu k vodíkové křehkosti. Vedle toho, hrozí riziko vzniku křehkého lomu i u tvárného materiálu, i při působení napětí nižšího než je mez kluzu materiálu [9,19]. Trhliny vznikají v oblastech s nejvyšší hodnotou tahových zbytkových napětí [24].



Obr. 5.1 Korozní praskání v mosazi [16]

### 5.1 Vliv parametrů procesu na korozní praskání

Testování vlivu změny teploty uvolňování napětí na korozní praskání stabilizátorových tyčí bylo provedeno s využitím cyklických testů. Při měření proběhla simulace vodíkové křehkosti, za použití korozního media. Jako korozní medium byla použita kyselina chlorovodíková, která byla aplikována po dostatečně dlouhou dobu a před samotným testováním očištěna.

Parametry testování byly následující:

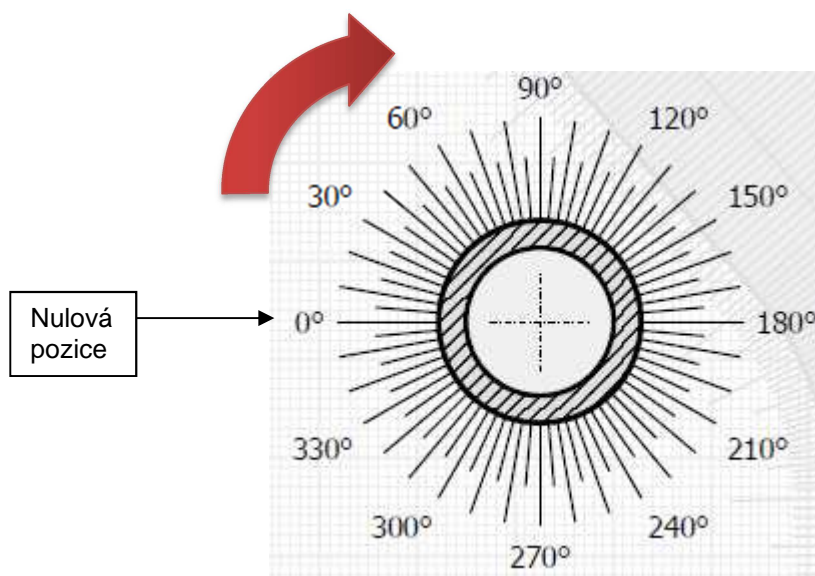
Tabulka 5.1 Charakteristiky získané měřením

Parametry	Značení	Jednotka
Počet cyklů	N	[-]
Číslo ohybu vzniku trhliny	B1 - B8	[-]
Lokální úhel vzniku trhliny	$\alpha$	[°]
Délka do místa vzniku trhliny	L	[mm]

Délka do místa vzniku trhliny je definována jako vzdálenost od počátečního bodu stabilizátorové tyče do bodu, ve kterém vznikla trhlina.

Lokální úhel vzniku trhliny znázorňuje skutečnost, zda-li trhlina vznikla na vnitřním nebo vnějším ohybu. Na povrchu vnitřního ohybu je definována nulová pozice (viz obr 5.2). Odchylka úhlu od nulové pozice je poté hledaný lokální úhel. Úhel 180° odpovídá vnějšímu ohybu tyče.

Všechny trhliny, které se objevily při testování byly kolmé na pomyslnou střednici stabilizátorové tyče a jejich vznik začal na povrchu vnějšího průměru.



Obr. 5.2 Postup zjištění hodnoty lokálního úhlu. Červená šipka naznačuje směr měření hledaného úhlu.

Pro lepší znázornění polohy místa vzniku trhliny byly ohyby testovaných stabilizátorů očíslovány, a to následovně:



Obr. 5.3 Označení jednotlivých míst ohybu

Tabulka 5.2 Charakteristiky odvozené z parametrů v tab. 5.1

Parametry	Značení	Jednotka
Redukované napětí Von Mises na vnějším průměru	$\sigma_{eq,o}$	[MPa]
Redukované napětí Von Mises na vnitřním průměru	$\sigma_{eq,i}$	[MPa]
Globální úhel vzniku trhliny	$\beta$	[°]
Směrodatná odchylka počtu cyklů	s	[-]
Počet cyklů, které bude fungovat nejméně 90% vyrobených stabilizátorů	R90%	[-]

Globální úhel vzniku trhliny je možné vypočítat pomocí koeficientů, lišících se pro každý jednotlivý ohyb. K výpočtu je použit lokální úhel vzniku trhliny. Globální úhel slouží jako porovnání vzniku trhlin pro celý stabilizátor.

Směrodatná odchylka počtu cyklů byla spočítána pomocí logaritmicko-normálního rozdělení.

Během testování byly získány hodnoty:

Tabulka 5.3 Stabilizátory **bez uvolňování zbytkových napětí**

Vzorek	N	Ohyb	$\alpha$	$\beta$	L	$\sigma_{eq,o}$	$\sigma_{eq,i}$
1	19591	B4	355	199	357	723	389
2	15007	B7	0	0	960	737	493
3	18739	B5	325	169	800	750	452
4	12372	B3	335	359	273	729	419
5	6859	B3	345	9	274	724	409
6	15438	B2	335	335	182	749	393
7	17803	B6	325	349	861	743	429
8	15673	B4	325	169	355	721	453

**s = 0,146**

**R90% = 9450**

Tabulka 5.4 Teplota uvolňování zbytkových napětí **230°C**

Vzorek	N	Ohyb	$\alpha$	$\beta$	L	$\sigma_{eq,o}$	$\sigma_{eq,i}$
1	20499	B6	355	19	865	701	406
2	19843	B6	340	4	875	740	417
3	24345	B6	340	4	869	727	422
4	19781	B4	355	199	355	717	390
5	18815	B4	230	74	355	592	520
6	15128	B4	335	179	353	729	443
7	19907	B6	330	354	871	720	427
8	17136	B6	340	4	871	721	420

**s = 0,06****R90% = 16140**Tabulka 5.5 Teplota uvolňování zbytkových napětí **240°C**

Vzorek	N	Ohyb	$\alpha$	$\beta$	L	$\sigma_{eq,o}$	$\sigma_{eq,i}$
1	15324	B3	295	319	283	745	403
2	17591	B3	305	329	282	758	419
3	16944	B6	340	4	877	744	419
4	15560	B6	340	4	871	721	420
5	16733	B6	330	354	871	731	463
6	17581	B5	325	169	790	724	456
7	16689	B5	330	174	791	728	451
8	16320	B3	335	359	276	736	422

**s = 0,02****R90% = 15531**Tabulka 5.6 Teplota uvolňování zbytkových napětí **250°C**

Vzorek	N	Ohyb	$\alpha$	$\beta$	L	$\sigma_{eq,o}$	$\sigma_{eq,i}$
1	15007	B6	345	9	867	725	416
2	9982	B4	335	179	353	729	443
3	19293	B3	320	344	278	745	423
4	19715	B3	305	329	280	748	420
5	16183	B3	0	24	275	720	392
6	15733	B3	355	19	275	722	398
7	14797	B3	345	9	273	730	408
8	15909	B5	345	189	783	734	420

**s = 0,09****R90% = 11897**

Závěr měření:

Rozhodujícími faktory při vyhodnocení výsledků jsou směrodatná odchylka počtu cyklů ( $s$ ) a počet cyklů, které bude fungovat nejméně 90% vyrobených stabilizátorů (R90%). Směrodatná odchylka počtu cyklů musí být nižší než **0,2**. Počet cyklů, které bude fungovat nejméně 90% vyrobených stabilizátorů musí být co možná nejvyšší.

Kriterium směrodatné odchylky splňují všechny zvolené teploty. Nejnižší výsledné směrodatné odchylky měly teploty 230 a 240°C. Tyto dvě teploty mají také nejlepší naměřené hodnoty R90%.

Teplota 250°C má v porovnání s teplotami 230 a 240°C velmi nízkou hodnotu R90%. Tato hodnota je porovnatelná s R90% pro stabilizátory bez uvolňování zbytkové napjatosti. Teplota 250°C proto není pro tento proces vhodná.

Z hodnot napětí Von Mises na vnějším a vnitřním průměru stabilizátoru není možné vyvodit užitečné závěry. Tyto hodnoty jsou obvykle porovnávány s hodnotami získanými až po operaci brokování, kdy jsou odvozeny potřebné závěry.

Vliv zvolených teplot pro proces uvolňování zbytkových napětí byl popsán individuálně u každého provedeného měření. Shrnutí zjištěných poznatků je znázorněno v tabulce 5.7

Tabulka 5.7 Zhodnocení výsledků

Teplota	Zbytková napětí	Mez pevnosti v tahu	Mez kluzu	Korozní praskání
Bez uvolňování ZN	Nevyhovující	Nevyhovující	Nevyhovující	Nevyhovující
230°C	Vyhovující	Nevyhovující	Vyhovující	Vyhovující
240°C	Vyhovující	Vyhovující	Vyhovující	Vyhovující
250°C	Vyhovující	Vyhovující	Vyhovující	Nevyhovující

V důsledku všech uskutečněných testů byla jako nová teplota pro proces uvolňování zbytkových napětí zvolena teplota **240°C**.

## ZÁVĚR

Výroba stabilizátorových tyčí a pružin se skládá z více výrobních procesů. Jednotlivé procesy ovlivňují vlastnosti materiálu a distribuci zbytkových napětí a proto musí být vhodně zvoleny a aplikovány se správnými vstupními parametry.

Práce je zaměřena na uvolňování zbytkových napětí, s cílem optimalizace celé operace a zkoumání vlivu zvolené teploty na vybrané charakteristiky. Vyšetřován byl dopad změny teploty na hodnoty zbytkových napětí ve stabilizátorových tyčích, mez pevnosti v tahu, mez kluzu a korozní praskání.

Původní provozní teplotou byla teplota 250°C. Stabilizátory uvolňované při této teplotě splnily požadavky na mez pevnosti v tahu, mez kluzu a hodnotu zbytkové napjatosti, ale prokázaly se jako nevyhovující z důvodu zvýšené náchylnosti ke koroznímu praskání. Dalšími zvolenými teplotami pro testování byly teploty 230°C a 240°C. Stabilizátory uvolňované při teplotě 230°C neobstály při tahové zkoušce, kdy vzorky odebrány z těchto stabilizátorů dosahovaly příliš vysokých hodnot meze pevnosti v tahu. Bylo zjištěno, že nejpříznivější vliv na testované charakteristiky měla zvolená teplota 240°C. Tyto stabilizátory byly velmi odolné vůči koroznímu praskání, při tahové zkoušce splňovaly všechny požadované limity a velikost zbytkových napětí byla přijatelná.

Tato studie ukazuje důležitost procesu uvolňování zbytkových napětí. Skutečnost vyplývá z testů, kdy pro každé provedené měření byly použity také vzorky ze stabilizátorů před uvolňováním zbytkových napětí. Vzorky neobstály v žádném z testů. Výsledky měření prokázaly, že stabilizátory bez uvolňování zbytkových napětí měly nepřijatelně vysokou mez pevnosti v tahu, mez kluzu, zbytková napětí a výrazně sníženou odolnost vůči koroznímu praskání.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] TOTTEN, G., HOWES, M. a INOUE, T. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2002, 465 s. ISBN: 0-87170-729-2
- [2] HOSFORD, W. F., *Mechanical Behavior of Materials: Second Edition*. New York: Cambridge University Press, 2010, 415 s. ISBN: 978-0-521-19569-0.
- [3] KRAUS, I. *Úvod do strukturní rentgenografie*. Praha: Academia, 1985, 232 s. ISBN: 21-014-85.
- [4] KESAVAN NAIR, P. a VASUDEVAN, R. *Residual stresses of types II and III and their estimation*. Sadhana Vol. 20, Issue 1. Springer India [online], 1995, s. 39-55. Dostupné z:  
<http://link.springer.com.rp1.ensam.eu/article/10.1007/BF02747283#aboutcontent>
- [5] HAUK, V. *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods*. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1997, 637 s. ISBN: 0 444 82476 6
- [6] BHARANE, P., TANPURE, K., PATIL, A. a KERKAL, G. *Design, Analysis and Optimization of Anti – Roll Bar*. Int. Journal of Engineering Research and Applications. Vol 4. Issue 9 [online], 2014, s. 137 – 140. ISSN: 2248-9622. Dostupné z:  
[http://www.ijera.com/papers/Vol4\\_issue9/Version%204/T4904137140.pdf](http://www.ijera.com/papers/Vol4_issue9/Version%204/T4904137140.pdf)
- [7] MUBEA. *Stabilizer bars*. Mubea Akademia.
- [8] GENTA, G. a MORELLO, L. *The Automotive Chassis Volume 1: Components Design*. Springer [online], 2009, 621 s. ISBN: 978-1-4020-8674-8. Dostupné z:  
<http://link.springer.com.rp1.ensam.eu/book/10.1007/978-1-4020-8676-2>
- [9] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, tisk FINAL TISK Olomoučany, 2001, 2. opr. a rozš. vyd., 385 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [10] BUDYNAS, R.G. a NISBETT, J.K. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Companies, Inc., 2011, 1071 s. ISBN: 978-0-07-107783-5
- [11] TOTTEN, G. *Steel heat treatment, metallurgy and technologies, Second Edition*. Taylor & Francis Group, LLC, 2007, 821 s. ISBN-13: 978-0-8493-8455-4.
- [12] CANALE, L.C.F., MESQUITA, R.A. a TOTTEN, G. *Failure Analysis of Heat Treated Steel Components*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2008, 629 s. ISBN-13: 978-0-87170-868-7.
- [13] CHAMPAIGNE, J. Shot Peening Overview. The Shot Peener [online]. 2001, 37 s. Dostupné z: <http://www.shotpeener.com/library/detail.php?anc=2001012&keyword=shot+peening+overview+champaigne>
- [14] WOHLFAHRT, H. *The Influence of Peening Conditions on the Resulting Distribution of Residual Stress*. The Shot Peener [online]. 1984. Dostupné z: <http://www.shotpeener.com/library/detail.php?anc=1984068&keyword=wohlfahrt+peening>

- [15] HARADA, Y., KOSAKA, H. A ISHIHARA, M. *Effect of Shot Peening on Fatigue Strength of High-Toughness Spring Steel*. Steel Research International Vol. 84, Issue 12. Steel Research International [online], 2013, s. 1333-1339. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/srin.201300109/full>
- [16] SCHAJER, G.S. *Destructive Methods for Measuring Residual Stresses: Techniques and Opportunities*. Experimental and Applied Mechanics, Volume 6. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. New York: Springer [online], 2011, s. 221-229. Dostupné z: [http://link.springer.com.rp1.ensam.eu/chapter/10.1007/978-1-4419-9792-0\\_39](http://link.springer.com.rp1.ensam.eu/chapter/10.1007/978-1-4419-9792-0_39)
- [17] KRAUS, I. *Současný stav metody difrakčního měření makroskopických napětí*. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 31, No. 6. Jednota českých matematiků a fyziků [online], 1986, s. 326-337. Dostupné z: <http://dml.cz/dmlcz/138443>
- [18] PREVEY, P.S. *X-ray Diffraction Characterization of Residual Stresses Produced by Shot Peening*. Lambda Research [online]. Dostupné z: <http://www.lambdatechs.com/documents/202.pdf>
- [19] CALLISTER, JR., W.D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007, 720 s. ISBN-13: 978-0-471-73696-7
- [20] PREVEY, P.S. *X-ray Diffraction Residual Stress Techniques*. Lambda Research [online]. Dostupné z: <http://www.lambdatechs.com/documents/200.pdf>
- [21] HERRING, D.H. *Stress Relief*. The Herring Group, Inc. [online]. Dostupné z: <http://www.heat-treat-doctor.com/documents/Stress%20Relief.pdf>
- [22] HERRING, D.H. *Stress Relief* [online]. Dostupné z: [http://www.fastener-world.com.tw/0\\_magazine/ebook/pdf\\_download/FW\\_141\\_E\\_306.pdf](http://www.fastener-world.com.tw/0_magazine/ebook/pdf_download/FW_141_E_306.pdf)
- [23] ASM INTERNATIONAL. *Heat Treating*. ASM Handbook Volume 4. USA: ASM International [online], 1991. ISBN 0-87170-379. Dostupné z: <http://products.asminternational.org.rp1.ensam.eu/hbk/index.jsp>
- [24] BOYER, H.E. *Practical Heat Treating*. USA: American Society for Metals, 1984, 223 s. ISBN 0-87170-178-2.
- [25] JAMES, M.R. *Relaxation of Residual Stresses An Overview* [online]. Dostupné z: <http://www.shotpeener.com/library/pdf/1987127.pdf>
- [26] VANDER VOORT, G.F. *Embrittlement of Steels, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, Vol 1, ASM Handbook, ASM International, 1990, s. 689–736. Dostupné z: <http://products.asminternational.org.rp1.ensam.eu/hbk/index.jsp>
- [27] ASM INTERNATIONAL. *Hydrogen Damage and Embrittlement, Failure Analysis and Prevention*, Vol 11, ASM Handbook, ASM International, 2002, s. 809–822. Dostupné z: [http://products.asminternational.org.rp1.ensam.eu/hbk/do/section/content/V11\\_20\\_02/D07/A05/s0091458.htm?anchor=top&highlight=true&start=0](http://products.asminternational.org.rp1.ensam.eu/hbk/do/section/content/V11_20_02/D07/A05/s0091458.htm?anchor=top&highlight=true&start=0)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
ZN	[MPa]	Zbytková napětí

Symbol	Jednotka	Popis
B1-B8	[-]	Číslo ohybu vzniku trhliny
C	[-]	Konstanta
D <sub>0</sub>	[mm]	Počáteční průměr
E	[Pa]	Youngův modul
L	[mm]	Délka řezu
L	[mm]	Délka do místa vzniku trhliny
N	[-]	Počet cyklů
P	[-]	Larson-Millerův parametr
T	[K]	Teplota
R90%	[-]	Počet cyklů, které bude fungovat nejméně 90% vyrobených stabilizátorů
d	[mm]	Vychýlení
d	[nm]	Vzdálenost mezi atomovými rovinami
d <sub>0</sub>	[nm]	Vzdálenost pro libovolnou orientaci
d <sub>φψ</sub>	[nm]	Vzdálenost při nezátíženém stavu
n	[-]	Řád interference
s	[-]	Směrodatná odchylka počtu cyklů
t	[mm]	Tloušťka stěny
t	[h]	Čas
w(z)	[-]	Šířka ve směru osy y jako funkce z
v	[-]	Poissonova konstanta
x	[mm]	Vychýlení
z	[-]	Vzdálenost na ose z
θ	[°]	Difrakční úhel
α	[°]	Lokální úhel vzniku trhliny
β	[°]	Globální úhel vzniku trhliny
ε <sub>φψ</sub>	[-]	Deformace
λ	[nm]	Vlnová délka rentgenových paprsků
σ <sub>eq,i</sub>	[MPa]	Redukované napětí Von Mises na vnitřním průměru
σ <sub>eq,o</sub>	[MPa]	Redukované napětí Von Mises na vnějším průměru
σ <sub>x</sub>	[-]	Napětí v ose x
σ <sub>1,2</sub>	[Pa]	Hlavní napětí
σ <sub>φ</sub>	[Pa]	Zbytkové napětí
ψ	[°]	Úhel k normále povrchu