



Stanovení vlivu cyklického namáhání na sekundární vznik trhliny na výlisku

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Jan Otřísal**
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Otřísal**
Osobní číslo: **S16000294**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Stanovení vlivu cyklického namáhání na sekundární vznik
trhliny na výlisku**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Materiály používané pro výrobu výlisků v automobilovém průmyslu.
2. Základní metody deformační analýzy výlisků z plechů.
3. Základní pojmy v oblasti cyklického namáhání součástí a lomové mechaniky kovů.
4. Experimentální zjištění vlivu počáteční deformace materiálu na Wöhlerovu křivku únavy.
5. Vyhodnocení naměřených dat.
6. Závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] PÖHLANDT, K. *Materials Testing for the Metal Forming Industry*. Berlin: Springer-Verlag, 1989. s. 226. ISBN 3-540-50651-9.
[2] ASM HANDBOOK. *Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
[3] ASM HANDBOOK. *Volume 14B - Metalworking: Sheet Forming*. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2006. s. 924. ISBN-10: 0-87170-710-1.
[4] DAVIES, G. *Materials for Automobile Bodies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. s. 277. ISBN 0-7506-5692-1.
[5] HERTZBERG, R.W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. s. 786. ISBN 0-471-01214-9
[6] POLMEAR, I. *Ligth Alloy - From traditional Alloys to Nanocrystals*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. s. 421. ISBN 0-7506-6371-5.
[7] RŮŽIČKA, M., HANKE, M. a ROST, M. *Dynamická pevnost a životnost*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989. s. 212
[8] LUHMANN, T. et al. *Close Range Photogrammetry (principles, techniques and applications)*. Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. s. 510. ISBN 978-1870325-50-9.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2017**
Termín odevzdání diplomové práce: **1. února 2019**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce, kterým byl pan doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. za odborné vedení celé práce, cenné rady, věcné připomínky a především za neutuchající trpělivost. Dále děkuji celé mé rodině a přátelům za neuvěřitelnou podporu, které se mi dostávalo v průběhu celého studia.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21122/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

Anotace

Hlavním cílem této diplomové práce bylo posoudit vliv cyklického zatížení na vznik trhliny, která se objevuje na některých výtažcích během přepravy mezi výrobními závody společnosti ŠKODA AUTO a.s. Práce byla rozdělena do dvou samostatných částí, teoretické a praktické. V teoretické části jsou popsány základní principy tváření, tažení a únavového chování materiálu. Praktická část je věnována analýze možných příčin vzniku trhliny na výtažku pátých dveří automobilu Škoda Superb III. V rámci experimentu byly provedeny únavové cyklické zkoušky základního a deformovaného materiálu DC05+ZE50/50-BPO a mikroskopická analýza oblasti vzniku trhliny. Praktická část obsahuje metodické postupy všech zkoušek, které byly v rámci experimentu realizovány a zhodnocení získaných výsledků.

Klíčová slova:

tváření, tažení, cyklické zatížení, únava materiálu, kvalita vyráběných dílů

Anotation

The main aim of the master thesis was to find out the influence of cyclic loading on the crack formation that occurs on some drawn parts during the transportation between the manufacturing plants of the company ŠKODA AUTO a.s. The work was divided into two parts, theoretical and practical. In the theoretical part are described the basic principles of the forming technology, the drawing technology and the material fatigue. The practical part is dedicated to the analysis of possible causes of the crack formation on the drawn part of the fifth door of the Škoda Superb III. In the experiment were performed fatigue tests of samples from deformed and non-deformed material DC05+ZE50/50-BPO and microscopic analysis of the crack formation area on the drawn part. The practical part includes the methodical procedures of all the tests that were performed in the experiment and the evaluation of the results.

Keywords:

forming, drawing, cyclic loading, material fatigue, quality of manufactured parts

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých zkratk a symbolů	8
Úvod	10
Teoretická část	11
1 Tváření.....	11
1.1 Fyzikální podstata tváření.....	11
1.1.1 Napjatost při tváření.....	13
1.1.2 Deformace při tváření.....	14
1.2 Mezní stavy při tváření.....	15
1.2.1 Diagram mezních přetvoření.....	16
1.3 Tvářitelnost.....	17
1.3.1 Metalurgicko-fyzikální činitele.....	17
1.3.2 Termomechanické činitele.....	18
1.3.3 Stav napjatosti.....	19
1.3.4 Technologické podmínky zpracování.....	19
2 Tažení.....	20
2.1 Napjatost při tažení.....	20
2.2 Technologické parametry tažení.....	21
2.2.1 Tažná síla.....	21
2.2.2 Přidržovací tlak.....	22
2.2.3 Typ přístřihu a počet tahů.....	22
2.2.4 Mazání.....	23
2.3 Vady u výtažků.....	24
2.4 Nástroje pro tažení.....	25
3 Únavové chování materiálu.....	27
3.1 Cyklické zatížení.....	27
3.2 Rozdělení únavových procesů.....	28
3.3 Únavové křivky.....	29
3.3.1 Wöhlerova křivka.....	30
3.4 Únavové vlastnosti materiálu.....	32
3.5 Vznik únavového lomu.....	33
3.6 Faktory ovlivňující oblast únavové pevnosti.....	34
3.6.1 Vliv střední hodnoty napětí.....	34
3.6.2 Vliv koncentrátorů napětí.....	36

3.6.3 Vliv velikosti součásti	37
3.6.4 Vliv jakosti povrchu.....	37
3.6.5 Vliv frekvence zatěžování a okolního prostředí	38
Praktická část.....	40
4 Specifikace problému	40
5 Metodický postup prováděného experimentu.....	40
5.1 Statická zkouška tahem.....	41
5.2 Únavové cyklické zkoušky	43
5.2.1 Určení obecných únavových vlastností.....	43
5.2.2 Zatěžování vzorků odebraných z reálných součástí.....	51
5.3 Mikroskopická analýza problematické oblasti.....	55
5.3.1 Elektronová mikroskopie.....	55
5.3.2 Optická mikroskopie	57
Závěr.....	59
Použitá literatura	61
Seznam příloh	63

Seznam použitých zkratek a symbolů

A_g [%]	Homogenní tažnost
A_{80} [%]	Tažnost
b [-]	Exponent únavové životnosti
d [mm]	Průměr součásti
d_p [mm]	Průměr přístřihu plechu
f [Hz]	Frekvence
F [N]	Vnější zatěžující síla
F_a [N]	Amplituda cyklického zatížení
F_h [N]	Horní velikost cyklického zatížení
$F_{přid}$ [N]	Přidržovací síla
$F_{taž}$ [N]	Tažná síla
g [m·s ⁻²]	Gravitační zrychlení
m_n [-]	Součinitel tažení
m [kg]	Hmotnost
M_o [Nm]	Ohybový moment
N [-]	Počet kmitů do porušení součásti
N_c [-]	Počet kmitů odpovídající mezi únavy
N_N [-]	Počet kmitů odpovídající časované mezi únavy
R [-]	Koeficient nesouměrnosti kmitu
R_e [MPa]	Mez kluzu v tahu
R_m [MPa]	Mez pevnosti v tahu
R_n [-]	Normálová anizotropie
$R_{p0,2}$ [MPa]	Smluvní mez kluzu v tahu
R_{te} [mm]	Poloměr tažné hrany
s_o [mm]	Výchozí tloušťka polotovaru
t [s]	Čas
T_t [K]	Teplota tání
W_o [mm ³]	Modul průřezu v ohybu
z [mm]	Tažná mezera
Δl_{el} [mm]	Velikost elastického prodloužení
Δl_{pl} [mm]	Velikost plastického prodloužení
ε_a [-]	Celková amplituda poměrné deformace

ε_{ael} [-]	Elastická složka celkové amplitudy poměrné deformace
ε_{apl} [-]	Plastická složka celkové amplitudy poměrné deformace
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ [-]	Poměrná deformace ve směru hlavních os
η_p [-]	Součinitel jakosti povrchu
κ_σ [mm ⁻¹]	Gradient napětí
ρ [mm]	Poloměr vrubu
σ_a [MPa]	Amplituda cyklického zatížení
σ_c [MPa]	Mez únavy
σ_d [MPa]	Dolní hodnota cyklického zatížení
σ_F [MPa]	Fiktivní napětí cyklického zatížení
σ_h [MPa]	Horní hodnota cyklického zatížení
σ_m [MPa]	Střední hodnota cyklického zatížení
σ_N [MPa]	Časovaná mez únavy
σ_O [MPa]	Ohybové napětí
σ_c^* [MPa]	Mez únavy po povrchové úpravě
σ_f' [MPa]	Součinitel únavové pevnosti
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ [MPa]	Složky vektorů normálového napětí
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ [MPa]	Hlavní normálová napětí
τ_k [MPa]	Kritické smykové napětí
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ [MPa]	Složky vektorů smykového napětí
φ_b [-]	Skutečná deformace ve směru šířky plechu
φ_s [-]	Skutečná deformace ve směru tloušťky plechu
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ [-]	Skutečná deformace ve směru hlavních os

ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci

Úvod

Tváření je jednou z nejrozšířenějších technologií pro zpracovávání kovových materiálů, která se používá jak při přípravě polotovarů, tak při vlastních zpracovatelských operacích. Vzhledem k tomu, že se technologie tváření vyznačuje vysokou produktivitou, hospodárným využitím materiálu a možností automatizace výrobního procesu, nachází uplatnění především v sériové výrobě. Jednou z nejvýznamnějších oblastí, kde se v současnosti objevuje sériová výroba výlisků, je automobilový průmysl. Nejrozšířenějším způsobem tváření v automobilovém průmyslu je technologie tažení, která je využívána především při výrobě částí karoserie.

Automobilový průmysl se obecně vyznačuje vysokými nároky na kvalitu vyráběných dílů a s tím související výrobní proces. Vyráběné výlisky zpravidla nikdy neslouží jako finální produkt, například u částí karoserií následují vždy po tažení povrchové úpravy a příslušné montážní operace. Musí být tedy zajištěno, aby na vstupu každé dílčí operace byla součást, která splňuje předepsané požadavky. Z tohoto důvodu je v současnosti při neustálé optimalizaci výrobních procesů věnována pozornost nejen produktivitě práce, ale i kvalitě vyráběných dílů.

Společnost ŠKODA AUTO a. s. je jednou z mnoha společností, kde je neustálá snaha o zlepšování kvality vyráběných součástí, přičemž tento proces začíná již u vývoje produktu a končí při předání zboží zákazníkovi. Vzhledem k tomu, že výrobní proces je ovlivněn celou řadou faktorů, není vždy jednoduché odhadnout všechny problémy, které se mohou u vyráběných dílů ve vztahu ke kvalitě objevit. Jedním z takových problémů, kterým se zabývá i tato diplomová práce je vznik trhliny na výtažku pátých dveří automobilu Škoda Superb III. Vzniklé trhliny se na některých součástech objevují při transportu mezi výrobním závodem v Mladé Boleslavi, kde dochází k výrobě výtažku a následné povrchové úpravě a výrobním závodem v Kvasinách, ve kterém jsou kompletovány celé automobily. Během transportu jsou díly vystaveny působení cyklického namáhání, které je vyvoláno charakterem přepravy a způsobem zavěšení jednotlivých dílů. Z tohoto důvodu byla uvážena možnost, že vznik trhlín na součástech by mohl být způsoben tímto cyklickým zatížením. Hlavním cílem této diplomové práce je posoudit vliv cyklického zatížení na vznik trhliny, případně odhalit jinou konkrétní příčinu jejího vzniku.

Teoretická část

1 Tváření

Tváření lze obecně definovat jako technologii, při které dochází ke změně tvaru a vlastností výchozího polotovaru působením vnějšího silového nebo energetického účinku. Základním principem většiny tvářecích operací je vznik plastických deformací bez porušení soudržnosti tvářeného materiálu. V současné době existuje velké množství způsobů tváření, které bývají nejčastěji klasifikovány podle teploty, při které tvářecí proces probíhá nebo podle působení vnějších sil.

Rozdělení technologie tváření podle teploty:

- a) Tváření za tepla - tvářecí teploty nad rekrystalizační teplotou ($0,7 \cdot T_t$)
- b) Tváření za studena - tvářecí teploty pod rekrystalizační teplotou ($0,4 \cdot T_t$)
- c) Tváření za poloohřevu - kompromis mezi tvářením za tepla a za studena, tvářecí teploty $0,3 \cdot T_t$ až $0,4 \cdot T_t$

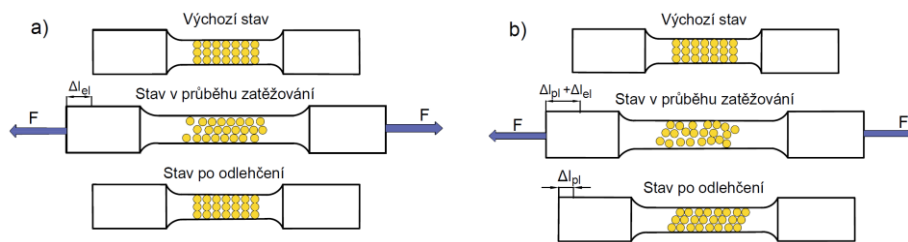
Rozdělení technologie tváření podle působení vnějších sil:

- a) Objemové tváření - deformace nastává ve směru všech tří os souřadného systému
- b) Plošné tváření - deformace nastává ve směru dvou os souřadného systému

1.1 Fyzikální podstata tváření

Při tváření je nutné vyvinout na tvářený materiál dostatečně velkou sílu, která vyvolá v materiálu plastické deformace a tím trvalou změnu tvaru polotovaru. Při tváření vznikají v tvářeném materiálu nejprve pružné (vratné) deformace a až následně deformace plastické (trvalé).

Při pružných deformacích dochází působením vnější zatěžující síly k vychýlení atomů umístěných v uzlových bodech krystalové mřížky z jejich rovnovážné polohy o velmi malou vzdálenost. Po odlehčení vnitřní meziatomární síly způsobí jejich návrat do rovnovážné polohy. Tento jev se v makroskopickém měřítku projeví jako elastická deformace, která po odlehčení zmizí (obr. 1a). Při plastické deformaci dochází vlivem působení vnější síly k trvalému vychýlení atomů z jejich rovnovážných poloh (obr. 1b). Základním principem tvorby plastických deformací je pohyb dislokací, ke kterému dochází nejčastěji skluzem.

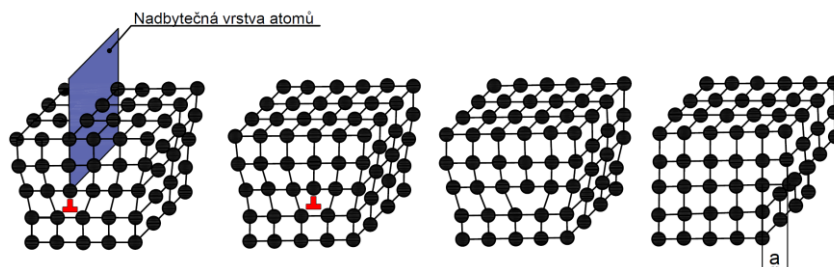


Obr. 1: Princip vzniku pružných a plastických deformací [5]

a) elastická deformace; b) plastická deformace; Δl_{el} - velikost elastického prodloužení; Δl_{pl} - velikost plastického prodloužení

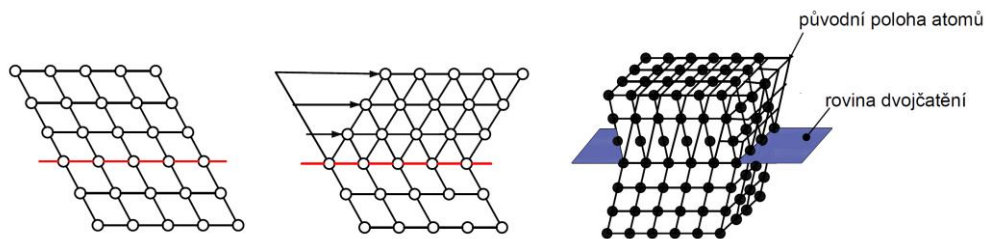
Jakmile vnější síla dosáhne mezní hodnoty pro vznik plastické deformace v tvářeném materiálu, dojde vlivem smykového napětí k pohybu dislokace (skluzu) ve směru příslušné skluzové roviny. Toto smykové napětí, které způsobí trvalý přesun atomů, bývá označováno jako kritické smykové napětí τ_k . Dislokace pak postupuje tvářeným materiálem po kluzné rovině do té doby, dokud nedosáhne povrchu, kde vznikne malý výstupek o velikosti jedné meziatomové vzdálenosti (obr. 2). Makroskopická deformace vzniká mnohonásobným opakováním tohoto procesu. Experimentálně bylo prokázáno, že pohyb dislokace skluzem se řídí několika pravidly:

- Skruz nastává v rovinách nejhustěji obsazenými atomy.
- Směr skluzu je vždy totožný se směrem nejhustěji obsazeným atomy.
- Ze skupiny možných kluzných rovin a směrů je vždy aktivní ten, ve kterém hodnota smykového napětí dosahuje hodnoty τ_k .



Obr. 2: Princip pohybu dislokací kluzem [6]

Dalšími mechanismy vzniku plastické deformace jsou dvojčatění a tzv. difúzní plastická deformace. K dvojčatění dochází při nízkých teplotách a velmi vysokých rychlostech tváření (např. tváření výbuchem). Principem je přesun atomů v části krystalu o část meziatomární vzdálenosti tak, že vznikne oblast mřížky, která je zrcadlově souměrná k neporušené části krystalu (obr. 3). K difúzní plastické deformaci dochází při velmi vysokých teplotách, které se blíží teplotě tavení příslušného materiálu a velmi nízkých deformačních rychlostech (např. superplastické tváření). Principem je přemísťování jednotlivých atomů ve směrech s vysokou koncentrací mřížkových poruch.

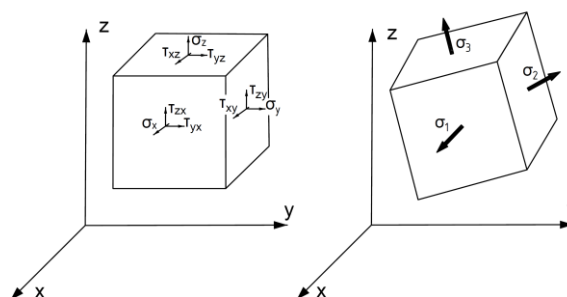


Obr. 3: Princip dvojčatění [4, 6]

1.1.1 Napjatost při tváření

Působením vnějších sil vznikají v tvářeném tělese napětí, která po překročení určité mezní hodnoty vyvolají nejprve pružnou a následně plastickou deformaci. Pokud má zatížení charakter jednoosého tahu, je mezní hodnotou pro vznik plastických deformací napětí označované jako mez kluzu R_e . Oblast vzniku plastických deformací je vymezena napětím od meze kluzu R_e do meze pevnosti R_m . Mez pevnosti je napětí, po jehož překročení dochází k porušení celistvosti materiálu.

V libovolném bodě tvářeného tělesa lze vytknout prostorový element a stanovit složky vektorů napětí, které na něj působí. Soubor složek vektorů napětí působící na elementární objem je označován jako stav napjatosti. Stav napjatosti je vyjádřen třemi složkami vektorů normálových napětí $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ a šesti složkami vektorů smykového napětí $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}$ a τ_{xz} (vzhledem k momentové rovnováze platí: $\tau_{xy}=\tau_{yx}$; $\tau_{yz}=\tau_{zy}$; $\tau_{zx}=\tau_{xz}$). Jednotlivé indexy jsou pak dány smyslem působení těchto napětí vzhledem k osám kartézského souřadného systému umístěného v počátku prostorového elementu. Velikost těchto napětí je závislá na poloze souřadných os. Vhodným natočením os souřadného systému lze docílit toho, že normálová napětí dosáhnou extrémních hodnot a smyková napětí budou nulová (obr. 4). Takto získaná napětí jsou označována jako hlavní normálová napětí σ_1, σ_2 a σ_3 , přičemž platí $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

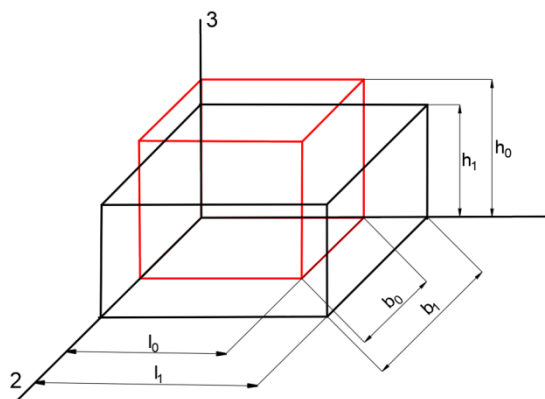


Obr. 4: Napětí působící na prostorový element [7]

Vzhledem k počtu možných kombinací vektorů hlavních napětí lze stanovit celkem 9 schémat hlavních napětí, avšak pro tváření mají praktický význam pouze některá z nich. Stav napjatosti závisí především na konkrétní technologii tváření a tvaru nástroje. Znalost velikostí hlavních napětí a stavu napjatosti je velmi důležitá pro stanovení podmínek plasticity (podmínky, za jakých vzniká plastická deformace) a pro následné určení potřebné tvářecí síly, případně dalších parametrů tváření.

1.1.2 Deformace při tváření

Vlivem působení vnějších sil na tvářené těleso dochází ke vzniku deformací a tím i ke změně jeho tvaru. Během tváření se v tvářeném tělese vedle sebe vyskytují pružné i plastické deformace. Celková velikost deformace je vyjádřena součtem velikostí pružné a plastické deformace. Na obr. 5 je ukázáno jednoduché schéma deformovaného tělesa včetně označených změn příslušných rozměrů.



Obr. 5: Změna tvaru a rozměrů tvářeného tělesa [8]

Velikost deformace je možné stanovit několika způsoby. V současné době se však nejčastěji využívají způsoby vyjádření deformace pomocí poměrné nebo skutečné deformace. První ze způsobů vyjádření velikosti deformace je dán poměrem změny délky a původní délky v příslušném směru. Velikost poměrné deformace je možné stanovit podle vztahů (1) až (3), přičemž potřebné rozměry jsou znázorněny na obr. 5.

$$\varepsilon_1 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \quad (2)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{h_1 - h_0}{h_0} \quad (3)$$

Vyjadřování velikosti deformace prostřednictvím poměrné deformace je výhodné z důvodu názornosti a jednoduchosti výpočtu. Nevýhodou je nemožnost sčítání dílčích

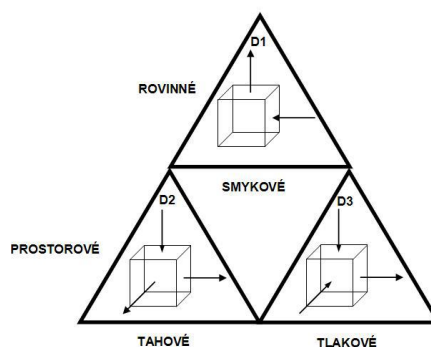
deformací. Z tohoto důvodu je v technické praxi dávána přednost napětím skutečným, která je možné vyjádřit pomocí vztahů (4) až (6).

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) \quad (5)$$

$$\varphi_3 = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) \quad (6)$$

Stejně jako u napětí lze i pro deformace stanovit schémata deformace ve směru hlavních os. Vzhledem k platnosti zákona zachování objemu ($\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$) rozlišujeme tři základní schémata deformace. Na obr. 6 jsou tato tři schémata znázorněna.



Obr. 6: Schémata hlavních deformací [8]

1.2 Mezní stavy při tváření

Mezní stav při tváření je takový deformační stav, při kterém dochází ke ztrátě deformační stability. Během procesu tváření může dojít ke ztrátě stability několika způsoby [10]:

- a) Ztráta deformační stability na mezi kluzu
- b) Ztráta deformační stability na mezi pevnosti
- c) Ztráta deformační stability vybočením

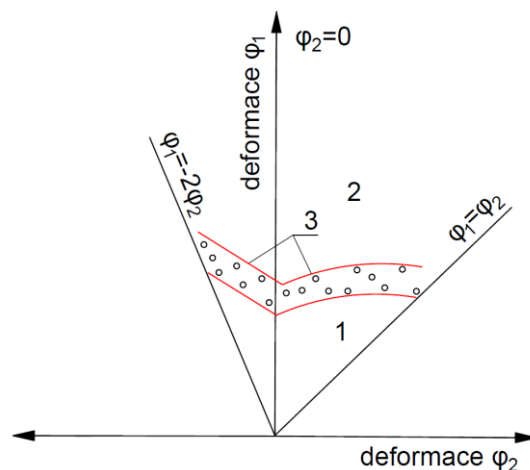
Ztráta deformační stability na mezi kluzu se projevuje vznikem Lüdersových vrásek na povrchu vylisku u deformačně vystárlých materiálů. Tyto vrásky představují pouze estetický problém a s rostoucí deformací vymizí. Ztráta deformační stability na mezi pevnosti je způsobena vyčerpáním plasticity tvářeného materiálu a zapříčiňuje vznik lokálních trhlin. Ztráta deformační stability vybočením se projevuje vznikem vln, které mohou způsobit vznik trhlin nebo prasklin. Vlny vznikají přesouváním objemu materiálu

mezi polotovarem a vyliskem, kdy přebývající materiál na okraji vylisku má tendenci tvořit vlny. [1, 2, 10]

1.2.1 Diagram mezních přetvoření

Diagram mezních přetvoření (nebo také FLD - forming limit diagram) slouží k posouzení tvářitelnosti různých materiálů. Diagram umožňuje určit, při jakých hodnotách skutečné deformace dojde ke ztrátě deformační stability v kritických místech vylisku. [9, 10]

Na obr. 7 je ukázán příklad takového diagramu, svislá osa znázorňuje velikosti skutečných tahových deformací φ_1 , vodorovná velikosti deformací φ_2 , které jsou na φ_1 kolmé. Svislá osa rozděluje oblast diagramu na dvě části, pravá strana bývá označována jako Keelerova oblast a je tvořena kombinací deformací tah - tah. Levá strana je tvořena kombinací deformací tah - tlak a je označována jako Godwinova oblast. [9, 10]



Obr. 7: Diagram mezních přetvoření [10]

Na diagramu jsou rovněž patrné tři významné oblasti. Oblast 1 představuje pásmo přípustných deformací, což jsou takové deformační stavy, které nezpůsobují ztrátu deformační stability. Oblast 2 je oblast nepřípustných deformací a je tvořena deformačními stavy, které vyvolají ztrátu deformační stability. Hranicí mezi těmito dvěma oblastmi představuje pásmo mezních přetvoření. Pásmo mezních přetvoření je oblast ohraničující množinu bodů, které odpovídají takovým deformačním stavům, které způsobí ztrátu deformační stability. Pásmo mezních přetvoření bývá zleva zpravidla ohraničeno přímkou $\varphi_1 = -2 \cdot \varphi_2$, která odpovídá deformačnímu stavu během tahové zkoušky. Pravá část pásma mezních přetvoření je ohraničena přímkou znázorňující deformační stav během dvouosého vypínání ($\varphi_1 = \varphi_2$). [9, 10]

Diagram mezních přetvoření může sloužit jako užitečný nástroj pro návrh optimálních podmínek tváření ještě před zahájením samotné výroby vylisku, nebo pro řešení již vzniklých problémů při jeho výrobě. Pomocí diagramu lze také posoudit možnost výroby vylisku ve více tvářecích operacích. Zanesením deformací vzniklých v jednotlivých tvářecích operacích do diagramu dojde k vytvoření tzv. trajektorie deformací, která umožňuje posoudit celý tvářecí proces. [9]

V současné době existuje mnoho způsobů, jak diagramy mezních přetvoření stanovit. Tyto způsoby většinou vycházejí z mechanických zkoušek, kdy je tvar vzorku nebo smysl zatěžování uzpůsoben tak, aby simuloval příslušný deformační stav. Mezi základní metody pro stanovení diagramu mezních deformací patří [10]:

- a) Zkouška tahem tyčí opatřených rozmanitými vruby
- b) Zkouška hydrostatická s kruhovou nebo eliptickou tažnicí
- c) Zkouška hloubením plechu tažníky různých poloměrů
- d) Zkouška vypínání zkušebních těles v podobě pruhů proměnné šíře (Nakazima test)
- e) Zkouška vypínáním tvarových nástřihů s vytaženými kruhovými segmenty

1.3 Tvářitelnost

Tvářitelnost vyjadřuje schopnost tělesa plasticky se deformovat za určitých podmínek tváření bez porušení celistvosti materiálu. Hlavní faktory ovlivňujícími tvářitelnost jsou [2]:

- a) Metalurgicko-fyzikální charakter tvářeného materiálu
- b) Termomechanické činitele
- c) Napěťový stav
- d) Technologické podmínky zpracování

1.3.1 Metalurgicko-fyzikální činitelé

Jedním z nejdůležitějších faktorů, které mají vliv na tvářitelnost, je metalurgicko-fyzikální charakter tvářeného materiálu. Tento pojem zahrnuje dílčí faktory, které se týkají především chemického složení a strukturního stavu tvářeného materiálu. Nejlepší tvářitelnost obvykle vykazují čisté kovy, protože jejich struktura obsahuje čisté hranice zrn a celkově malý počet překážek bránících pohybu dislokací. [2]

U slitin značně záleží na strukturním stavu a chemickém složení. Slitiny prvků, které tvoří tuhé roztoky s neomezenou rozpustností, mají vždy lepší tvářitelnost, než slitiny s

vícefázovou (tuhé roztoky s úplnou nerozpustností) nebo heterogenní strukturou (tuhé roztoky s částečnou rozpustností). U slitin s monofázovou strukturou je tvářitelnost ovlivněna především vlastnostmi základního a legujícího kovu. Typickým zástupcem slitin s vícefázovou strukturou jsou oceli, v jejichž struktuře dochází velmi často k současnému výskytu austenitu a feritu. Vícefázové slitiny mají horší tvářitelnost, která je způsobená rozdílnými mechanickými vlastnostmi feritu a austenitu (ferit má vyšší plastické a nižší pevnostní vlastnosti), horšími rekrytalizačními schopnostmi dvousložkového systému a vylučováním precipitátů na hranicích zrn. U heterogenních slitin je struktura tvořena základními strukturními složkami a heterogenními útvary, které mají na tvářitelnost největší vliv. [2, 11]

Při tváření ocelí má nejvýznamnější vliv na tvářitelnost především chemické složení, které ovlivňuje její strukturu a tím fyzikální a mechanické vlastnosti. Z hlediska tvářitelnosti je rozhodující: vliv jednotlivých prvků na strukturní stav oceli, rozpustnost v základní strukturní složce a výskyt nerozpuštěných příměsí, vliv na kinetiku tepelně ovlivněných procesů a vlastnosti vznikajících sloučenin. [2]

1.3.2 Termomechanické činitele

Do skupiny termomechanických činitelů patří faktory týkající se především samotného technologického procesu (např. teplota tváření, deformační rychlost, velikost a průběh deformace atd.).

S rostoucí tvářecí teplotou dochází k poklesu deformačního odporu a zlepšení tvářitelnosti materiálu (s rostoucí teplotou roste rychlost pohybu atomů a dislokací, zrychluje se difuze a tím i uzdravovací pochody). Rostoucí tvářecí teplota příznivě ovlivňuje tvářitelnost pouze do určitých kritických teplot, při kterých může docházet ke zhrubnutí zrna nebo až k natavení hranic zrn. Za těchto teplot již není možné materiál dále tvářet. [11]

Deformační rychlost může mít jak pozitivní tak negativní vliv na tvářitelnost. O tom, jaký vliv bude mít, rozhoduje: vztah mezi rychlostí deformace a rychlostí uzdravovacích procesů, struktura tvářeného materiálu a množství strukturních poruch. Obecně lze říci, že s rostoucí deformační rychlostí tvářitelnost roste do určitého maxima a následně zase klesá. Kritická hodnota deformační rychlosti závisí na druhu tvářeného materiálu a technologii tváření. [11]

1.3.3 Stav napjatosti

Stav napjatosti má vliv na tvářitelnost a konečné vlastnosti výlisku. Při tváření je obecně nepříznivý vznik tahových napětí v tvářeném materiálu, která způsobují rozšiřování dutin a zárodků trhlin. Tlaková napětí jsou naopak prospěšná, protože způsobují zacelování trhlin a dutin, čímž zlepšují soudržnost materiálu během jeho deformace. Při tváření je nežádoucí vznik přídavných napětí, která obvykle vedou ke zvýšení deformačního odporu a tím ke zhoršení tvářitelnosti. Vznik těchto přídavných napětí může být způsoben např. vnitřním a vnějším třením, nerovnoměrnou deformací nebo nehomogenitou mechanických vlastností. [2]

Největší vliv na vznik přídavných napětí má tření mezi nástrojem a tvářeným materiálem, které výrazně ovlivňuje průběh deformace. Toto tření může působit jako aktivní nebo pasivní činitel. Pokud se tření vyskytuje jako aktivní činitel, má příznivý vliv na celý tvářecí proces, snižuje deformační odpor a tím zlepšuje tvářitelnost. Tření jako pasivní činitel naopak nepříznivě ovlivňuje tvářecí proces, neboť způsobuje nerovnoměrnou deformaci. [9]

1.3.4 Technologické podmínky zpracování

Mezi technologické podmínky zpracování, které mohou ovlivnit tvářitelnost materiálu, patří: vnější tření na smykové ploše, nerovnoměrná deformace, geometrie nástroje, historie tváření a způsob deformace. [2]

Historie tváření představuje soubor tvářecích operací, které zanechaly na tvářeném materiálu trvalé následky, jež mohou ovlivňovat výsledné mechanické vlastnosti a tím celý tvářecí proces. Historie tváření je velmi dobře patrná především u válcovaných plechů, u kterých se objevuje změna mechanických vlastností ve směru válcování. Směrová závislost mechanických a fyzikálních vlastností bývá označována jako anizotropie. [9]

Podle toho, kde se anizotropie projevuje, rozlišujeme plošnou a normálovou anizotropii. Plošná anizotropie je směrová závislost v rovině plechu vzhledem ke směru válcování. Normálová anizotropie vyjadřuje nerovnoměrnost vlastností ve směru tloušťky plechu. Matematicky lze hodnotu normálové anizotropie R_n vypočítat podle vztahu (7), kde φ_b vyjadřuje skutečnou deformaci ve směru šířky a φ_s skutečnou deformaci ve směru tloušťky. [9]

$$R_n = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{s_1}{s_0}\right)} \quad (7)$$

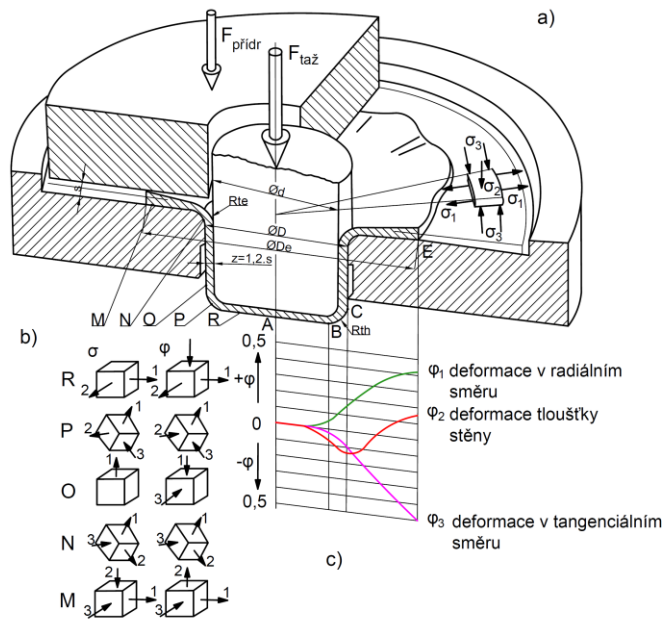
2 Tažení

Tažení (nebo také hluboké tažení) je technologie plošného tváření, při které se z polotovaru ve tvaru rovinného přístřihu plechu zhotovují v jedné nebo několika operacích výtažky jednoduchých rotačních tvarů, hranaté výtažky nebo složité výtažky nepravidelných tvarů. Proces tažení probíhá v nástroji zvaném tažidlo, jehož hlavní části jsou tažník, tažnice a případně přidržovač. Nejprve je připravený polotovaz ustavený na tažnici a zajištěn přidržovačem. Následně se začne tažník pohybovat směrem do tažnice, čímž dochází k posunu plechu přes tažnou hranu a vzniku výtažku. Tento výtažek pak může být buď finálním výrobkem, nebo polotovarem pro další tažné operace (pro vytvoření výtažku je většinou nezbytné tvářet ve více operacích). Mezi hlavní způsoby tažení patří [9, 12, 13]:

- a) Tažení bez přidržovače
- b) Tažení s přidržovačem
- c) Tažení se ztenčením stěny
- d) Zpětné tažení
- e) Žlábkování
- f) Protahování
- g) Rozšiřování

2.1 Napjatost při tažení

Na obr. 8 je znázorněn proces tažení s přidržovačem. Z obrázku je patrné, že v různých místech výtažku během tažení je jiný stav napjatosti, jiná velikost deformace a různá velikost napětí. V oblasti pod přidržovačem (M) vzniká trojosá napjatost vyvolaná působením síly přidržovače $F_{přidr}$ na tvářený materiál, který je v této oblasti namáhán tlakem v radiálním směru, tlakem v tangenciálním směru a tlakem kolmo na směr příruby. Na tažné hraně R_{te} (N) můžeme sledovat opět prostorovou napjatost, tato oblast se vyznačuje největším tahovým napětím a nízkým tlakovým tangenciálním napětím. Ve válcové části výtažku (O) se objevuje pouze jednoosá tahová napjatost a dochází zde k přechodu z prostorového stavu deformace na rovinný. V místě přechodu mezi válcovou částí výtažku a dnem (P) se objevuje prostorová nestejnorodá napjatost a vysoké tahové napětí, které způsobuje značné prodloužení a ztenčení stěny. Z toho důvodu je v této oblasti největší riziko porušení materiálu, které může vést k utržení dna. Ve dně výtažku (R) vzniká rovinná tahová napjatost, která způsobuje nepatrné stejnoměrné natahování do dvou směrů. [6, 9]



Obr. 8: Tažení válcového výtazku s přidržovačem [9]

a) schéma procesu; b) stavy napjatosti a deformace; c) průběhy skutečné deformace $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$

2.2 Technologické parametry tažení

Aby byla umožněna výroba dílu požadované kvality, musí být proveden vhodný konstrukční návrh tvářeného dílu a musí být stanoveny co nejvhodnější technologické parametry. Mezi základní technologické parametry ovlivňující proces tváření patří: tažná síla, přidržovací tlak, typ přístřihu, počet tahů a mazání.

2.2.1 Tažná síla

Tažná síla musí být dostatečně velká, aby umožnila vytvoření výtazku požadované kvality bez porušení soudržnosti materiálu. Velikost tažné síly musí tedy dosahovat takových hodnot, aby vyvolala plastickou deformaci tvářeného materiálu, ale zároveň musí být menší než kritická hodnota, která způsobí utržení dna výtazku. [12, 13]

Tažná síla vyvolává v plášti výtazku tahová napětí, která jsou nejdůležitější pro tvorbu finálního dílu. Během procesu tažení se velikosti těchto napětí mění, a proto musí být proměnný také průběh tažné síly (obr. 9). Velikost potřebného tahového napětí se liší především mezi první a druhou fází tažení. V první fázi tažení dochází ke vzniku mělkého válcového prolisu a tažený materiál je částečně vtlačen do tažníku, v této fázi je napjatost ovlivněna především poloměrem tažné hrany. Ve druhé fázi dochází k tvorbě pláště.

Jedním ze způsobů, který lze využít ke stanovení maximální tažné síly pro výtažek rotačního tvaru je vztah (8).

$$F_{taž} = \pi \cdot d_p \cdot s_0 \cdot R_m \text{ [N]}, \text{ kde} \quad (8)$$

d_p - Průměr přístřihu plechu [mm]

s_0 - Výchozí tloušťka plechu [mm]

R_m - Mez pevnosti v tahu [MPa]



Obr. 9: Průběh tažné síly [9]

2.2.2 Přidržovací tlak

Přidržovač bývá obvykle používán z důvodu zabránění tvorby vln při vysokém stupni deformace. Jeho použití sebou však nese i určité nevýhody, neboť zapříčiňuje pěchování materiálu a růst tloušťky stěny, což může vést k nepříznivým napěťovým stavům. Z tohoto důvodu je nutné věnovat pozornost volbě přidržovacího tlaku. Volba optimální velikosti přidržovacího tlaku bývá prováděna pomocí příslušných diagramů nebo speciálních softwarů. Mezi hlavní faktory, které je nutné brát v potaz při návrhu přidržovacího tlaku resp. přidržovací síly, patří: geometrie střižníku a střižnice, tvar a velikost přístřihu plechu, tloušťka polotovaru, druh materiálu a tření. Aby byl zajištěn optimální průběh tažného procesu, měla by velikost přidržovací síly odpovídat přibližně 30% až 40% maximální velikosti tažné síly. [6, 12]

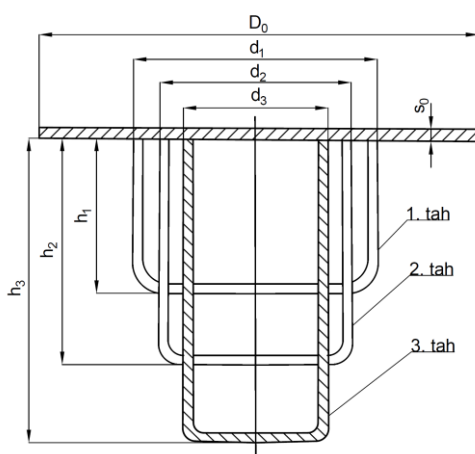
2.2.3 Typ přístřihu a počet tahů

Volba tvaru, rozměru a orientace přístřihu je prováděna s ohledem na technologickou a ekonomickou stránku výroby. Plocha přístřihu by měla být volena tak, aby byla zajištěna co nejmenší velikost odpadu a zároveň bezproblémová výroba. Minimální plocha přístřihu by měla přibližně odpovídat ploše výtažku s přídávkem pro odstřižení. [13]

Vzhledem k tomu, že výtazky bývají často poměrně členité a při jejich výrobě je nutné dosáhnout poměrně velké deformace základního materiálu, je většina součástí vyráběna na více tahů. První tah bývá zpravidla mělký o velkém průměru, každý následující tah je prováděn na menší průměr a větší hloubku. Obecně bývá uváděno, že po sobě mohou následovat maximálně tři tažné operace a poté musí být do výrobního procesu zařazeno rekrytalizační žíhání, po kterém mohou následovat další tvářecí operace. Jako kritérium pro posouzení maximální deformace na jeden tah a určení potřebného počtu tahů se využívá součinitel tažení (9). Hodnoty součinitele tažení se pro různé materiály liší, například pro hlubokotažné plechy je minimální dosažitelná hodnota součinitele tažení pro první tah $m_1 = 0,48$ až $0,50$, pro druhý tah $m_2 = 0,69$ až $0,72$ a pro třetí tah $m_3 = 0,72$ až $0,74$. Na obr. 10 je znázorněn princip tažení na více tahů. [6, 9]

$$m_n = \frac{d_1}{D_0} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{d_3}{d_2} \cdot \frac{d_4}{d_3} \dots \dots \dots \frac{d_n}{d_{n-1}} = \frac{d_n}{D_0}, \quad (9)$$

kde index n označuje příslušný tah.



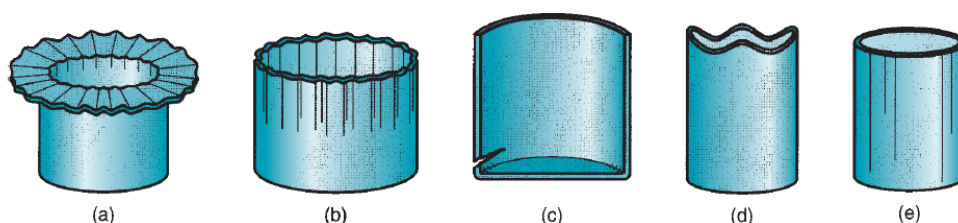
Obr. 10: Schéma tažení výtazku ve třech tažných operacích [9]

2.2.4 Mazání

Mazání bývá využíváno pro snížení tření, které výrazně ovlivňuje celkovou tažnou sílu. Vzhledem k tomu, že při tažení je nejpříznivější, aby tření v tažnici a přidržovači bylo co nejmenší a na tažníku co největší, nedochází při tažení k nanášení maziva na celý přístřih, ale pouze na jeho jednotlivé části. Volba typu maziva by měla být prováděna tak, aby v průběhu tažení nedošlo k poškození povrchu nástroje a výrobku, dále by zvolené mazivo mělo vytvářet rovnoměrnou vrstvu a dobře přilnout na přístřih. [6, 13]

2.3 Vady u výtažků

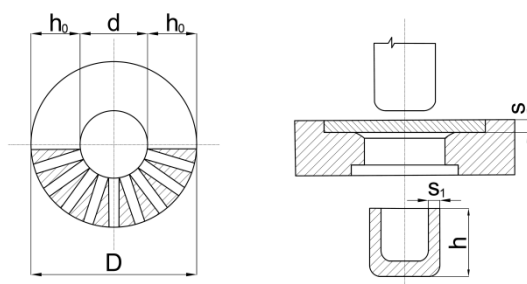
Kvalita finálních výtažků je ovlivněna především způsobem tažení a volbou technologických parametrů, přičemž při nesprávné volbě těchto parametrů se mohou na výtažku objevit vady, které lze klasifikovat na přípustné a nepřípustné. Přípustné vady neohrožují požadovanou funkci dílu a mohou na výtažku zůstat. Vzniku nepřípustných vad na výtažku je nezbytné zabránit, případně je z hotového výrobku odstranit. Na obr. 11 je ukázán příklad nejčastěji se vyskytujících vad na výtažcích. [14]



Obr. 11: Základní typy vad u výtažků [14]

a) zvlnění příruby; b) zvlnění pláště; c) praskliny; d) cípatost; e) povrchové rýhy

Vznik vln na přírubě nebo plášti výtažku (obr. 11a, obr 11b) je způsoben přesouváním velkého objemu materiálu mezi polotovarem a výtažkem. Při procesu tažení postupuje tažník směrem do tažnice, čímž se zvětšuje výška, zmenšuje tloušťka nádoby a dochází k přebývání objemu materiálu v oblasti příruby (vyšrafované oblasti na obr. 12). V důsledku přebývání materiálu v přírubě má plech tendenci se vlnit. [6]



Obr. 12: Princip vzniku vln na výtažku [6]

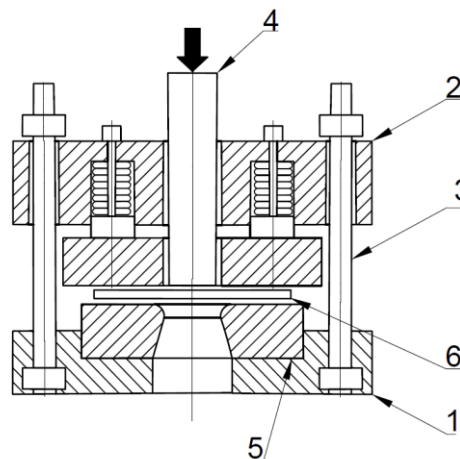
Vznik prasklin (obr. 11c) je důsledkem příliš velké hodnoty tahového napětí, které způsobuje zeslabování tloušťky stěny, což vede k vyčerpání plasticity v kritických místech a následnému utržení dna. Cípatost (obr. 11d) na vnějším okraji výtažku je způsobena nestejným tažením výtažku, ke kterému dochází vlivem anizotropie tvářeného materiálu. Povrchové rýhy (obr.11e) se mohou objevovat na vnější i vnitřní straně

výtažku, hlavní příčinou jejich vzniku je většinou tření mezi základním materiálem a nástrojem. [6, 9, 14]

2.4 Nástroje pro tažení

Nástroj pro tažení bývá zpravidla označován jako tažidlo. Hlavními částmi tažidla jsou tažník a tažnice, tažník bývá obvykle pohyblivý a vyvozuje tažnou sílu, tažnice bývá naopak pevná. Aby mohl proces tažení bezproblémově probíhat, musí být tažník a tažnice většinou doplněny o další konstrukční prvky.

Na obr. 13 je znázorněn příklad konstrukčního provedení tažidla. Pozice 1 označuje základní desku, která slouží k ustavení tažnice a připevnění tažidla na rám stroje, v tomto případě rovněž slouží k zajištění polohy vodících sloupků 3. Vodící sloupky zajišťují zlepšení vzájemné přesnosti vedených částí nástroje a umožňují zachytávání bočních sil, které vznikají během tažení. Jednou z nejdůležitějších částí tažidla je přidržovač, který zabraňuje vzniku některých vad na výtažku (především zvlnění). Tažidlo může být dále vybaveno velkou spoustou dalších konstrukčních prvků, jejichž volba se liší především podle nároků na vyráběný díl. Vhodná konstrukce nástrojů je jeden z nejdůležitějších činitelů, které ovlivňují proces hlubokého tažení, a proto je nezbytné při tvorbě technologického postupu a ostatních náležitostí tažného procesu věnovat stejnou pozornost volbě tažného nástroje. [5,16]



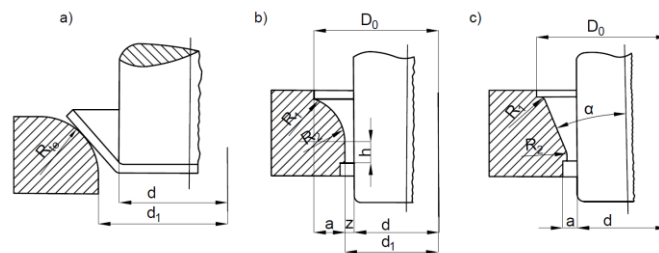
Obr. 13: Příklad konstrukce tažného nástroje [16]

1 - základní deska; 2 - deska přidržovače; 3 - vodící sloupky; 4 - tažník; 5 - tažnice; 6 - přístřih z plechu

Z hlediska konstrukce tažných nástrojů má největší vliv na proces hlubokého tažení: drsnost povrchu tažníku a tažnice, poloměr zaoblení hrany tažníku, poloměr zaoblení hrany tažnice a velikost tažné mezery. [15]

Drsnost povrchu tažníku a tažnice výrazně ovlivňuje tření mezi tažným nástrojem a základním materiálem, z tohoto důvodu má značný vliv na potřebnou velikost tažné a přidržovací síly a kvalitu povrchu výtažku. Poloměr zaoblení funkční části tažnice R_{te} má vliv především na deformační stabilitu taženého materiálu. Pokud je poloměr tažnice příliš malý, není umožněn plynulý pohyb tvářeného materiálu z příruby do válcové části a dochází k zadírání, které zapříčiňuje vznik povrchových rýh a prasklin. Pokud je poloměr tažnice naopak příliš velký, pak má tvářený materiál sklon k tvorbě vln. Volba optimální velikosti poloměru střížné hrany bývá určována výpočtem nebo je odečtena z příslušných diagramů. Velikost poloměru tažné hrany pro první tah může být stanovena například podle vztahu $R_{te}=(2 \text{ až } 6) \cdot s_0$, kde s_0 je tloušťka polotovaru.

Hrana tažnice nemusí mít pouze standardní zaoblený tvar, ale může být použito tažnic, jejichž tvar byl uzpůsoben pro zvláštní aplikace. Na obr. 14 jsou ukázány příklady tvaru tažných hran. Tažnice s tažnou hranou ve tvaru TRAKTRIX křivky (obr. 14b) - tvar evolventy řetězovky, bývá využívána pro tažení tlustých plechů a umožňuje dosažení stupně tažení až $m=0,35$ při použití malých tažných sil. Kuželová plocha tažnice (obr. 14c) je používána pro tažení bez přidržovače. [9, 15]



Obr. 14: Možné úpravy funkční plochy tažnice [9]

a) standardní tvar; b) TRAKTRIX křivka; c) kuželová plocha

Velikost tažné mezery by měla být větší, než tloušťka plechu s ohledem na snížení tažné síly a výrobní tolerance. Velikost tažné mezery bývá určována buď podle empirických vztahů, nebo podle speciálních diagramů. Příkladem výpočtu velikosti tažné mezery je pro první tah vztah $z=(1,2 \text{ až } 1,3) \cdot s_0$, a pro další tahy $z=(1,1 \text{ až } 1,2) \cdot s_0$, kde s_0 označuje výchozí tloušťku přístřihu z plechu. Pokud je velikost tažné mezery příliš malá, může docházet k nárůstu tažné síly a zvýšení rizika utržení dna, příliš velká tažná mezera zapříčiňuje vznik vln ve stěně výlisku. [9]

Jednou z dalších možností, jak zlepšit průběh tváření je využití brzdných hran, které eliminují nepříznivý účinek tlakového napětí vznikajícího podél tažné hrany. Tyto brzdné hrany kladou odpor taženému materiálu a tím zvyšují po celém obvodu příruby radiální

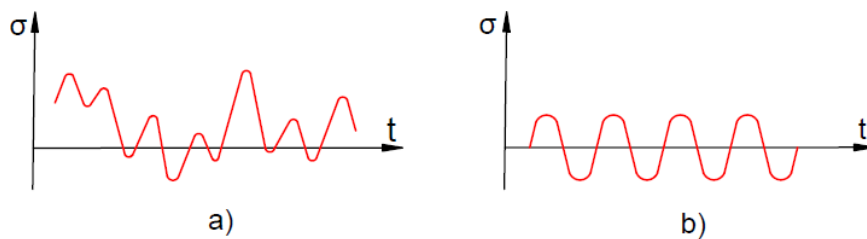
tahové napětí, které redukuje nepříznivý účinek tlakového napětí. Počet, rozmístění a rozměry brzdných hran bývají určovány buď orientačně, nebo pomocí speciálních softwarů. Výslednou funkci brzdných hran je vždy nutné ověřit experimentálně. [15]

3 Únavové chování materiálu

Únava materiálu je proces, při kterém dochází ke změně vlastností součásti působením časově proměnného dynamického (cyklického) zatížení. Tato změna vlastností může vést až k trvalé deformaci zatěžované součásti. Maximální hodnota působícího cyklického zatížení přitom nemá dostatečnou velikost, aby způsobila poškození součásti v jednom cyklu - její velikost je zpravidla menší, než mez kluzu daného materiálu. [17, 18]

3.1 Cyklické zatížení

Cyklická zatížení, která působí na strojní součásti, mohou mít podle charakteru zatěžování různý časový průběh. Jednotlivé typy cyklického zatížení je možné podle časového průběhu rozdělit do dvou skupin, a to na stochastické a deterministické (obr. 15). Průběh deterministického zatížení se vyznačuje pravidelným tvarem, který lze popsat časovou funkcí. Stochastické zatížení se naopak vyznačuje zcela náhodným průběhem. Výsledný průběh cyklického zatížení, kterým je v praxi zatěžována většina reálných součástí, bývá nejčastěji kombinací deterministického a stochastického průběhu. [17, 18]



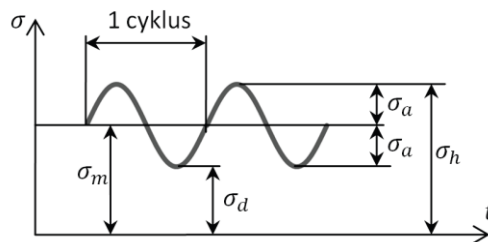
Obr. 15: Druhy cyklického zatížení [17]

a) stochastické cyklické zatížení; b) deterministické cyklické zatížení

Pro obecný popis cyklického zatížení je nejčastěji využíváno deterministické zatížení sinusovitého průběhu (obr. 16), u kterého se hodnota napětí mění kolem střední hodnoty σ_m od určité dolní hodnoty σ_d po horní hodnotu σ_h . Pro stanovení velikosti středního napětí platí vztah (10). Změna průběhu zatížení kolem střední hodnoty je dána amplitudou napětí, kterou lze určit podle vztahu (11). Pro jednoznačný popis velikosti kmitu může být využita buď dvojice hodnot σ_a a σ_m , nebo σ_h a σ_d . [18, 19]

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2} \quad (10)$$

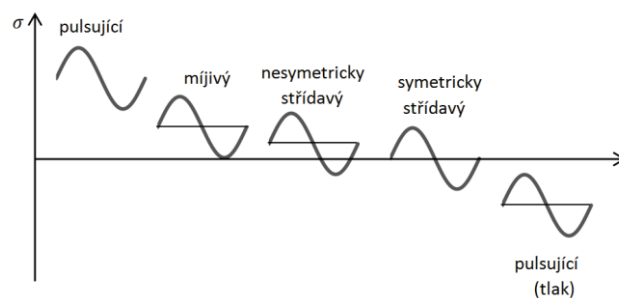
$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2} \quad (11)$$



Obr. 16: Obecné znázornění cyklického zatížení [19]

Tento typ zatížení bývá využíván především u jednostupňových zkoušek, kdy je zkušební vzorek zatěžován za přesně definovaných podmínek (stálá velikost σ_m a σ_a) a určuje se počet cyklů, při kterém dojde k jeho poškození. Podle způsobu zatěžování skutečné součásti, je volen druh zatěžování zkušební vzorku, který může mít charakter ohybového momentu, krouticího momentu, tahového/tlakového napětí apod. [18, 19]

Symetrii průběhu zatížení vzhledem ke střední hodnotě lze posoudit koeficientem nesouměrnosti kmitu R , který je dán poměrem dolní a horní velikosti zatížení ($R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h}$). Na obr. 17 jsou zobrazeny jednotlivé typy kmitů, které se od sebe liší rozdílnou symetrií vůči střední hodnotě. [17]



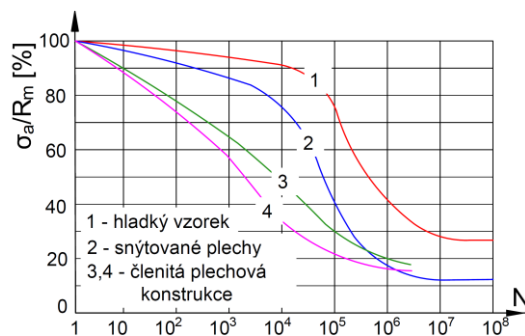
Obr. 17: Typy kmitů podle nesouměrnosti [19]

3.2 Rozdělení únavových procesů

Únavový proces je ovlivněn celou řadou faktorů, které mají vliv na chování zatěžovaného materiálu, a proto je nutné věnovat značnou pozornost volbě podmínek zatěžování. Podle toho, za jakých konkrétních podmínek je zkušební vzorek zatěžován, můžeme únavový proces rozdělit [17]:

- a) Podle zatěžujících podmínek
 - zatížení s řízením velikosti síly (měkké zatěžování)
 - zatížení s řízením velikosti deformace (tvrdé zatěžování)
 - zatížení od cyklicky proměnných teplot (teplotní únava)
 - zatížení způsobená rezonančními jevy akustických vibrací konstrukce
- b) Podle pracovních podmínek a prostředí
 - únava za normálních podmínek
 - únava ve vakuu a inertním prostředí
 - únava v korozním prostředí
 - únava za zvýšených teplot
 - únava za nízkých teplot
 - únava za zvláštních podmínek
- c) Podle zkušebních objektů
 - únava materiálu
 - únava součásti
 - únava konstrukčních částí a uzlů
 - únava celých konstrukcí a zařízení

Přesné definování podmínek únavového procesu je při únavových zkouškách velmi důležité z důvodu opakovatelnosti zkoušky a vzájemného srovnávání s výsledky ostatních zkoušek. Na obr. 18 je ukázáno porovnání únavových křivek pro jednotlivé vzorky rozdílné konstrukce. [22]



Obr. 18: Porovnání únavových křivek pro jednoduché vzorky a složitou konstrukci [17]

3.3 Únavové křivky

Únavové křivky (nebo též křivky životnosti) jsou výsledkem statistického vyhodnocení únavových zkoušek a poskytují přehled o únavových vlastnostech

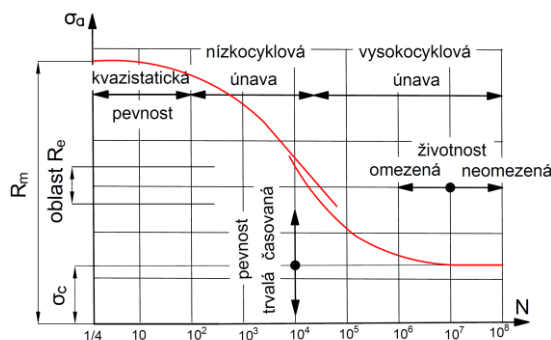
zkušební vzorku, reálné součásti nebo celé konstrukce. Podle typu zkušební vzorku a charakteru zatěžování lze použít různých forem zpracování únavových křivek [17]:

- Křivky v souřadnicích zatížení - počet kmitů do poruchy. Používají se především při zkouškách členitých objektů s řízenou zatěžující silou, kde by napětí v určitém místě reálné součásti nebylo možné jednoznačně určit. Tento typ křivek nemá obecnou platnost a lze je porovnávat pouze s křivkami, které jsou výsledkem zkoušek prováděných za zcela shodných podmínek.
- Křivky v souřadnicích napětí - počet kmitů do poruchy (Wöhlerovy křivky). Jsou definovány amplitudou cyklického napětí σ_a a středním napětím kmitu σ_m . U tvarově členitějších součástích je napětí vztaženo k přesně definovanému místu.
- Křivky získané při tvrdém zatěžování v souřadnicích amplituda či rozkmit poměrné deformace - počet kmitů (únavové křivky deformace).

3.3.1 Wöhlerova křivka

Wöhlerova křivka je jedním z nejčastěji používaných ukazatelů únavového chování materiálu, poskytuje prvotní informaci o únavových vlastnostech a mezi únavy σ_c . Mez únavy je definována jako největší napětí, které nevede k deformaci vzorku ani po překročení smluvní hranice. Smluvní hranice udává počet cyklů, po jehož překročení by již nemělo dojít při dané hodnotě napětí k porušení součásti v důsledku únavy. Tento počet cyklů byl stanoven experimentálně a liší se podle zatěžovaného materiálu (např. pro ocel je tato hranice 10^7 cyklů). [17, 18]

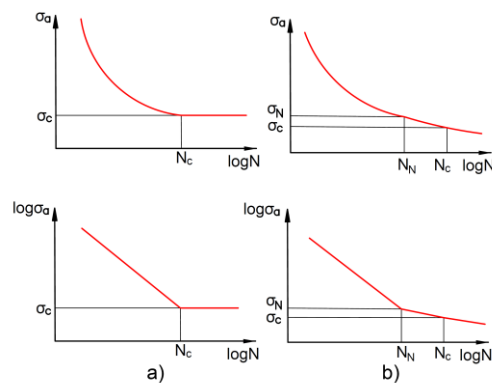
Wöhlerova křivka (obr. 19) udává závislost amplitudy napětí na počtu cyklů. Podle velikosti amplitudy napětí je oblast Wöhlerovy křivky rozdělena na dvě části, první část je oblast trvalé pevnosti, druhá část oblast časované pevnosti. Hranicí mezi oběma částmi je mez únavy σ_c . Na vodorovné ose odpovídá oblasti trvalé pevnosti oblast neomezené životnosti a oblasti časované pevnosti odpovídá oblast omezené životnosti. [17]



Obr. 19: Oblasti únavy materiálu [25]

Z hlediska počtu kmitů do poruchy může být vodorovná osa rozdělena na oblast kvazistatického lomu, oblast nízkocyklové únavy a oblast vysokocyklové únavy. V oblasti kvazistatického lomu dochází k porušení součásti již při prvním výkmitu zatížení (nebo maximálně po několika desítkách cyklů), nejedná se ale o poškození v důsledku únavy, protože růst lomové plochy je velmi rychlý a má znaky tvárného lomu jako u statických zkoušek. Oblast nízkocyklové únavy se nalézá v oblasti mezi mezí pevnosti R_m a mezí kluzu R_e a lomu většinou předchází výrazná plastická deformace. Vzniklá lomová plocha má hrubší strukturu, obsahuje stopy po interkrystalickém lomu a předchází plastické deformaci. Oblast vysokocyklové únavy leží v oblasti mezi mezí kluzu R_e a mezí únavy σ_c . Vzniklý únavový lom je charakterizován hladkým vzhledem bez zjevných známek předchozí plastické deformace a je snadno odlišitelný od zbylé části lomové plochy, která se vytvoří dotržením průřezu a podílem plastických deformací. [17]

Tvar Wöhlerovy křivky je závislý především na použitém měřítku souřadných os a druhu materiálu. Souřadnice jednotlivých bodů křivky jsou nejčastěji popisovány v logaritmicke-lineárních nebo logaritmických souřadnicích. Na obr. 20 jsou ukázány tvary Wöhlerových křivek, kdy tvar a) odpovídá většině uhlíkových ocelí a vyznačuje se výraznou mezí únavy σ_c , které přísluší určitý počet cyklů N_c . Příklad b) je typický pro slitiny hliníku a pevnostní legované oceli, které nemají konstantní mez únavy, a proto je pro ně definovaná časová mez únavy σ_N , které odpovídá počet cyklů N_N . [17]



Obr. 20: Tvary Wöhlerových křivek [17]

a) tvar křivek uhlíkových ocelí; b) tvar křivek vysokopevnostních legovaných oceli a slitin hliníku

K analytickému popisu šikmé části Wöhlerovy křivky může být použito velké množství vztahů. Jedním z nejjednodušších způsobů aproximace je popis pomocí mocninného vztahu (12), jehož platnost je však pouze v oblasti mezi mezí kluzu a mezí únavy. Parametry C a w je možné určit pomocí lineární regrese. [26]

$$\sigma_a^w \cdot N = C \quad (12)$$

Při aproximaci šikmé části Wöhlerovy křivky s respektováním oblasti nízkocyklové únavy nacházejí uplatnění vztahy (13) a (14). První ze vztahů (13) je označován jako Weibullův a jedná se o jeden z nejpřesnějších způsobů aproximace. Koeficienty A , b , C , σ_c jsou získávány numerickou iterací. Druhý ze vztahů (14) je označován jako Basquinův a nachází uplatnění především při aproximaci složitých časových průběhů zatížení. Materiálové parametry σ_f' a b mohou být určeny například lineární regresí. [26]

$$(\sigma_a - \sigma_c)^b \cdot (N - A) = C \quad (13)$$

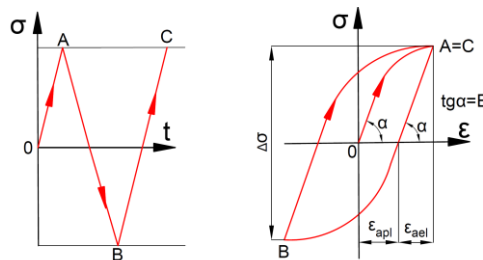
$$\sigma_a = \sigma_f' \cdot (2 \cdot N)^b \quad (14)$$

3.4 Únavové vlastnosti materiálu

Při cyklickém zatěžování dochází v důsledku mikrostrukturálních změn ke změně fyzikálních vlastností a napětově-deformační odezvy materiálu. Tyto změny se projevují především na počátku zatěžování a s rostoucím počtem cyklů intenzita změn klesá. U jednoosého namáhání je možné deformační odezvu materiálu schematicky znázornit hysterezní smyčkou. [17, 20]

Obr. 21 ukazuje hysterezní smyčku, která udává závislost napětí na poměrné deformaci na začátku zatěžovacího cyklu. Celková amplituda poměrné deformace je vždy tvořena elastickou a plastickou složkou (15), která má v únavových procesech rozhodující význam. [17]

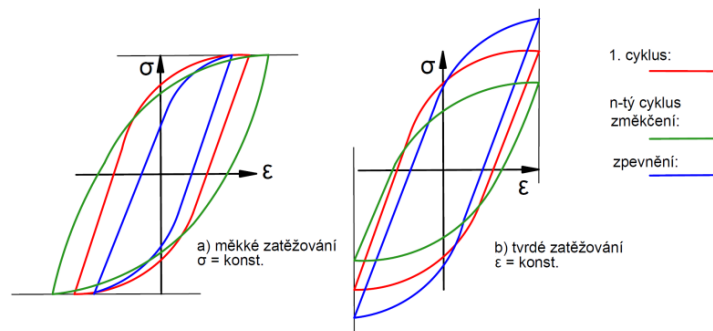
$$\varepsilon_a = \varepsilon_{apl} + \varepsilon_{ael} \quad (15)$$



Obr. 21: Tvar hysterezní smyčky na počátku cyklického zatěžování [17]

Při dalším zatěžování se začne měnit tvar hysterezní křivky v důsledku cyklického změkčování a zpevňování. Obr. 22 ukazuje, jakým způsobem se projeví cyklické změkčování a zpevňování při tvrdém a měkkém zatěžování. Při tvrdém zatěžování se cyklické zpevnění projevuje nárůstem potřebného napětí, při měkkém zatěžování poklesem deformace. U cyklického změkčování je tomu naopak, při tvrdém zatěžování dochází k poklesu napětí, u měkkého zatěžování roste deformace. [17]

Cyklické zpevňování se objevuje především u materiálů s poměrem meze pevnosti a meze kluzu větším než 1,4 ($\frac{R_m}{R_e} > 1,4$), jedná se například o nerezové oceli nebo měď. Cyklické změkčování vykazují především materiály s vyšší pevností, u kterých je poměr meze pevnosti a meze kluzu menší než 1,2 ($\frac{R_m}{R_e} < 1,2$), například martenzitické oceli. U většiny kovů dochází k ustálení tvaru křivky po několika desítkách až stovkách cyklů a takovou hysterezní křivku je možné použít pro popis zatěžovacího cyklu. Neměnná hysterezní křivka bývá také označována jako saturovaná a u kovů, které vykazují dlouhodobé změny tvaru křivky je stanovena v polovině životnosti vzorku. [17, 20]



Obr. 22: Změna tvaru hysterezních smyček [17]

a) měkké zatěžování; b) tvrdé zatěžování

3.5 Vznik únavového lomu

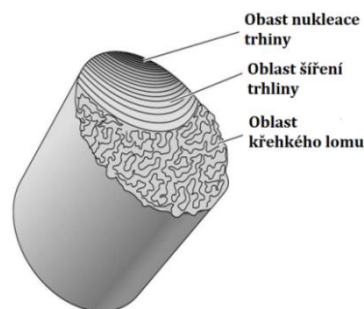
Únavové poškození je od začátku zatěžování až do okamžiku vzniku únavového lomu nevratným procesem. Únavový proces lze obecně rozdělit do čtyř stádií [17, 19]:

- a) Stádium změn mechanických vlastností
- b) Stádium vzniku únavových trhlin
- c) Stádium šíření trhlin
- d) Stádium lomu

V první fázi zatěžování dochází nejprve ke změně struktury kovu, která se projeví cyklickým změkčováním a zpevňováním. S narůstajícím počtem cyklů začne v povrchových vrstvách v důsledku nehomogenity materiálu vzrůstat velikost napětí, což má za následek vznik (nukleaci) mikrotrhlin. K nukleaci mikrotrhlin může docházet v tzv. únavových pásech skluzem dislokací, v oblasti hranic mezi zrny nebo v rozhraní mezi základním materiálem a nekovovými vměstky. Většina vzniklých mikrotrhlin roste pouze do malé hloubky (několik desetin mm) a poté přestává růst. Zbylé mikrotrhliny postupují dále po povrchu a po čase se spojují v delší povrchové trhliny, které se po dosažení určité

délky začínají šířit do hloubky materiálu. V této fázi roste zpravidla pouze jedna trhlina, jež je označována jako magistralní trhlina. Vzniklá magistralní trhlina se šíří do hloubky ve směru kolmém na směr hlavního napětí a její růst není závislý na struktuře materiálu. Chování trhliny je dáno velikostí plastické zóny na jejím čele, která je složena z části statické a cyklické. [19]

Vzniklý únavový lom je zpravidla tvořen dvěma ostře ohraničenými oblastmi (obr. 23). První oblast je hladká, má lasturovitý vzhled a jsou na ní jasně viditelné vrstevnice, které ukazují, jak se lom šířil po ploše průřezu, druhá plocha je hrubozrná a má vzhled křehkého lomu. [19, 21]



Obr. 23: Lomová plocha po únavovém lomu [21]

3.6 Faktory ovlivňující oblast únavové pevnosti

Únavové chování materiálu je ovlivněno celou řadou faktorů, které mají vliv jak na mez únavy zatěžované součásti, tak na celkový průběh deformačního chování materiálu. Mezi tyto faktory patří konstrukce zatěžované součásti, charakter cyklického zatěžování a provozní podmínky, přičemž nejpodstatnější vliv má především [17]:

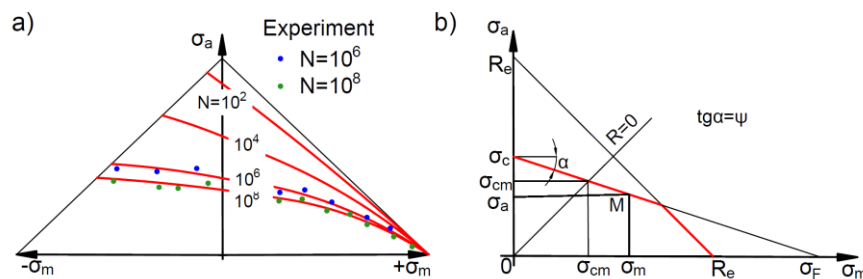
- Střední složka napětí
- Koncentrátory napětí
- Velikost součásti
- Jakost povrchu
- Frekvence zatěžování a okolní prostředí

3.6.1 Vliv střední hodnoty napětí

Vliv střední složky napětí je možné pozorovat pro různé materiály ze závislosti mezní amplitudy kmitu σ_a při poruše na středním napětí σ_m , která bývá určena z Wöhlerových křivek získaných zatěžováním hladkých zkušebních vzorků cyklickým zatížením při různé velikosti součinitele nesouměrnosti R , nebo středního napětí σ_m .

Experimentálně bylo zjištěno, že při použití tahového předpětí σ_m dojde k poklesu amplitudy σ_a . Naopak použití středního napětí σ_m , které má charakter tlakového zatížení, způsobí nárůst amplitudy napětí σ_a . Pro posouzení vlivu střední složky napětí je nejčastěji používán Haighův a Smithův diagram. [17,22]

Haighův diagram zobrazuje výsledky zatěžování v souřadných osách σ_a a σ_m s tím, že parametrem je počet kmitů do poruchy N . Obr. 24a ukazuje skutečný Haighův diagram, kde jednotlivé mezní čáry odpovídající počtu cyklů do poruchy jsou získány aproximací výsledků zkoušek mocninnou funkcí. [17, 22]

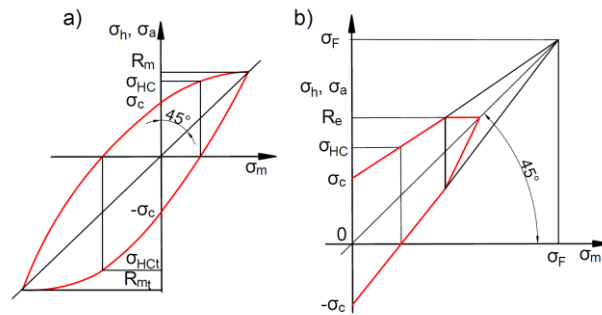


Obr. 24: Haighův diagram [17, 22]

a) skutečné zobrazení; b) zjednodušené zobrazení

Vzhledem k tomu, že sestavení skutečného Haighova diagramu vyžaduje provedení velkého množství experimentů, nalézá v praxi uplatnění především jeho zjednodušený tvar (obr. 24b). Oblast diagramu je na svislé omezena mezí kluzu daného materiálu R_e , na vodorovné ose fiktivním napětím σ_F , které přibližně odpovídá maximálnímu napětí, jenž materiál při daném způsobu namáhání snese a je určováno pomocí zjednodušených výpočtů (pro jednoosý tah $\sigma_F=R_m$, pro ohyb $\sigma_F=(1,5 \text{ až } 1,7) \cdot R_m$ apod.). Mezní čáry jsou nahrazeny přímkami, s tím, že přímka v pravé části je dána spojnicí mezí kluzu vyneseneých na jednotlivé osy a přímka v levé části diagramu spojnicí meze únavy σ_c a fiktivního napětí σ_F . [17]

Smithův diagram udává závislost mezní amplitudy napětí σ_a nebo horního napětí σ_h na středním napětí σ_m . Na obr. 25a je ukázána konstrukce Smithova diagramu pro uhlíkovou ocel, který je stejně jako Haighův diagram určován na základě velkého množství únavových zkoušek. V praxi se opět používá především zjednodušený případ Smithova diagramu (obr. 25b). Mezní čáry jsou určeny jako spojnice meze únavy σ_c na svislé ose a bodu, který odpovídá velikosti fiktivního napětí σ_F jak na vodorovné, tak na svislé ose. Konec oblasti je omezen mezí kluzu R_e . [17]

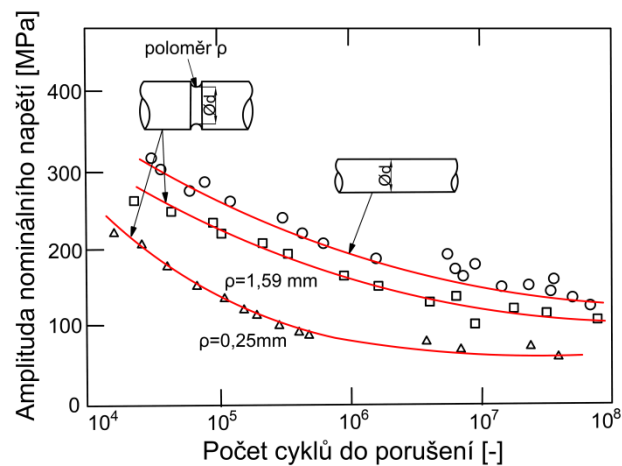


Obr. 25: Smithův diagram pro uhlíkovou ocel [17, 22]

a) skutečné zobrazení; b) zjednodušené zobrazení

3.6.2 Vliv koncentrátorů napětí

Jako koncentrátoři napětí jsou označována místa na součásti, kde dochází při působení vnějších sil k lokálnímu zvýšení napětí. Toto zvýšení napětí se u reálných součástí projevuje především v oblasti tvarových a průřezových změn, přičemž tato místa jsou obecně označována jako vruby. Vruby mají nepříznivý vliv na únavové procesy (např. snižují mez únavy, způsobují lokální plastizaci apod.) a celkově snižují únosnost strojních součástí, proto je snaha vruby na součásti co nejvíce eliminovat. Z obr. 26 je patrné, že s rostoucí velikostí vrubů na hřídelovité součásti dochází k poklesu meze únavy.



Obr. 26: Vliv vrubů na průběh únavové křivky [23]

Podle charakteru koncentrátorů napětí jsou obecně rozlišovány tři základní typy vrubů [17, 23]:

- a) Konstrukční vruby - Jsou dány konstrukčním provedením součásti (např. drážky, zápichy, závity apod.).

- b) Technologické vruby - Jsou dány především způsobem výroby a povrchovou úpravou součásti (např. stopy po opracování, povrchové úpravy, přechody mezi různými strukturami materiálu apod.).
- c) Metalurgické vruby - Jsou dány nehomogenitou struktury materiálu (strukturní chyby, vměstky apod.).

3.6.3 Vliv velikosti součásti

Obecně platí, že s rostoucím rozměrem zkušební vzorku klesá mez únavy, tento fakt je způsoben především technologií výroby a nerovnoměrným rozložením napětí. U technologie výroby ovlivňuje pokles meze únavy především použití různých polotovarů nebo materiálu jiné tavby pro výrobu rozměrnějších součástí, tento problém lze odstranit výrobou rozměrnějších zkušebních vzorků z jednoho druhu polotovaru. [17, 24]

Nerovnoměrné rozložení napětí v povrchové vrstvě (tzv. gradient napětí) způsobuje, že u malých vzorků je mez únavy v ohybu a krutu menší než v tahu - tlaku. Pro výpočet ohybového napětí v krajním vlákně vzorku platí vztah (16), přičemž po dosazení do vztahu pro výpočet gradientu napětí (17) vyplývá, že se zvětšujícím průměrem dochází k jeho poklesu. S poklesem gradientu napětí dochází k poklesu meze únavy v ohybu a krutu. [24]

$$\sigma_0 = \frac{M_0}{W_0} = \frac{M_0 \cdot d}{2 \cdot J_y} \quad (16)$$

$$\kappa_\sigma = \frac{1}{\sigma_0} \cdot \frac{d\sigma}{dz} = \frac{1}{\sigma_0} \cdot \frac{d}{dz} \left| \frac{M_0 \cdot z}{J_y} \right| = \frac{1}{\sigma_0} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_0}{d} = \frac{2}{d} \quad (17)$$

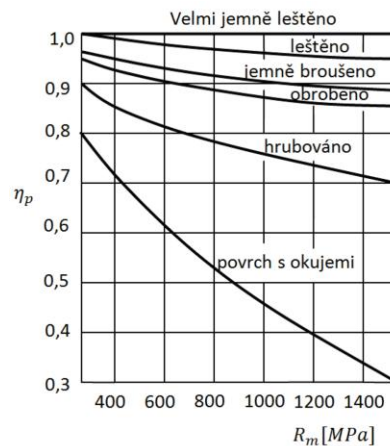
3.6.4 Vliv jakosti povrchu

Jakost povrchové vrstvy má rozhodující vliv z hlediska vzniku únavových trhlin, a proto výrazně ovlivňuje mez únavy. Únavová odezva stavu povrchu je definována součinitelem jakosti povrchu η_p , který je dán poměrem meze únavy vzorku o dané povrchové úpravě σ_c^* a meze únavy leštěného vzorku σ_c (18). Obecně platí, že s rostoucím součinitelem jakosti povrchu se zvyšuje i mez únavy materiálu. [17]

$$\eta_p = \frac{\sigma_c^*}{\sigma_c} < 1 \quad (18)$$

Mez únavy součástí lze zvýšit především vhodnými mechanickými povrchovými úpravami (válečkování, kuličkování apod.) nebo tepelným zpracováním (povrchové kalení, nitridování apod.). Nepříznivý vliv na mez únavy má především koroze materiálu. Obr. 27 ukazuje závislost součinitele jakosti povrchu na mezi pevnosti, z grafu vyplývá, že nejlepší

únavové vlastnosti vykazuje součást s leštěným povrchem, nejhorší naopak povrch s okujemi. [24]



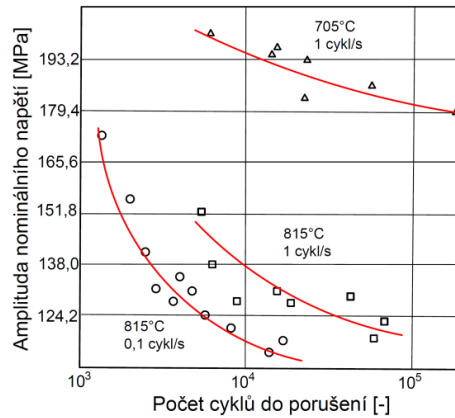
Obr. 27: Vliv povrchové úpravy na součinitel jakosti povrchu [24]

3.6.5 Vliv frekvence zatěžování a okolního prostředí

Při posuzování vlivu frekvence je nutné uvažovat její vliv vzhledem k celkové době provozu. I menší počet kmitů do poruchy při nízké frekvenci může znamenat delší životnost, než vysoký počet kmitů o vysoké frekvenci. Frekvence bývá podle počtu Hz většinou rozdělena do tří skupin [17]:

- a) Nízká frekvence (0,1 až 10 Hz)
- b) Střední frekvence (10 až 100 Hz)
- c) Vysoká frekvence (100 až 10^4 Hz)

Nízká frekvence je využívána při zkouškách rozměrnějších objektů s ohledem na jejich provozní zatížení. Střední frekvence nalézá uplatnění při zjišťování základních únavových vlastností. Vysoká frekvence je používána při sledování rezonančních jevů a při hodnocení vysokofrekvenčních poškození. Zvyšující frekvence způsobí, že složka plastické deformace se nemůže plně rozvinout, čímž se sníží poškození součásti, dále zabraňuje uplatnění negativního působení okolního prostředí a kvůli akumulaci energie v objemu součásti dochází k jeho zahřívání. Na obr. 28 je ukázáno, jakým způsobem se projeví rozdílná frekvence a teplota na průběhu únavové křivky při jinak shodných podmínkách zatěžování. Z grafu je rovněž patrné, že s rostoucí teplotou a snižující se frekvencí zatěžování dochází při jinak shodných podmínkách zatěžování k poklesu meze únavy. [17, 23]



Obr. 28: Vliv teploty a frekvence na průběh únavové křivky [23]

Okolní prostředí se může velmi negativně projevit na poklesu meze únavy. Nepříznivý vliv má především chemicky agresivní prostředí, případně plyny a vlhkost, jež jsou obsaženy ve vzduchu. Chemicky agresivní prostředí způsobuje především urychlení nukleace a růstu únavových trhlin v důsledku chemické reakce mezi základním materiálem a prostředím, která zapříčiňuje urychlení korozních pochodů. Stejný vliv jako chemicky agresivní prostředí mohou mít za zvýšených teplot také plyny a páry obsažené ve vzduchu. [23]

Praktická část

4 Specifikace problému

Problematickým dílem, u kterého dochází ke vzniku trhliny, je výtažek pátých dveří automobilu Škoda Superb III. Jako výchozí polotovar pro výrobu tohoto výtažku slouží: Plech EN 10152-DC05+ZE50/50-BPO, jedná se o elektrolyticky pozinkované pásy plechu s fosfátovaným a olejovaným povrchem o tloušťce 0,7 mm, které jsou standardně využívány pro výrobu karosářských dílů.

Zmiňovaná trhlina se objevuje na některých výtažcích v oblasti lemu během přepravy mezi výrobním závodem v Mladé Boleslavi, kde jsou zmiňované díly vyráběny a výrobním závodem v Kvasinách, ve kterém dochází k jejich montáži na vyráběné automobily. Obr. 29a ukazuje, jakým způsobem jsou jednotlivé díly zavěšeny na speciální paletu s vyznačenou oblastí vzniku trhliny, na obr. 29b je pak znázorněn detail této problematické oblasti. Vzhledem k charakteru usazení jednotlivých dílů dochází během přepravy k působení cyklického zatížení, a proto byl uvážen předpoklad, že vzniklá trhlina se na některých výtažcích objevuje v důsledku působení právě tohoto typu zatížení.



Obr. 29: Výtažek pátých dveří automobilu Škoda Superb III

a) způsob zavěšení jednotlivých výtažků na paletu; b) detail oblasti vzniku trhliny

5 Metodický postup prováděného experimentu

Metodický postup prováděného experimentu byl navržen tak, aby bylo umožněno co nejlépe posoudit vliv cyklického zatížení na vznik trhliny, případně odhalit jinou konkrétní příčinu jejího vzniku. Pro zajištění co nejlepší efektivity byla realizace experimentu rozdělena do tří samostatných částí:

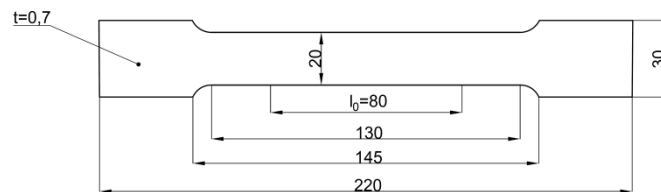
- a) Statická zkouška tahem

- b) Únavové cyklické zkoušky
- c) Mikroskopická analýza problematické oblasti

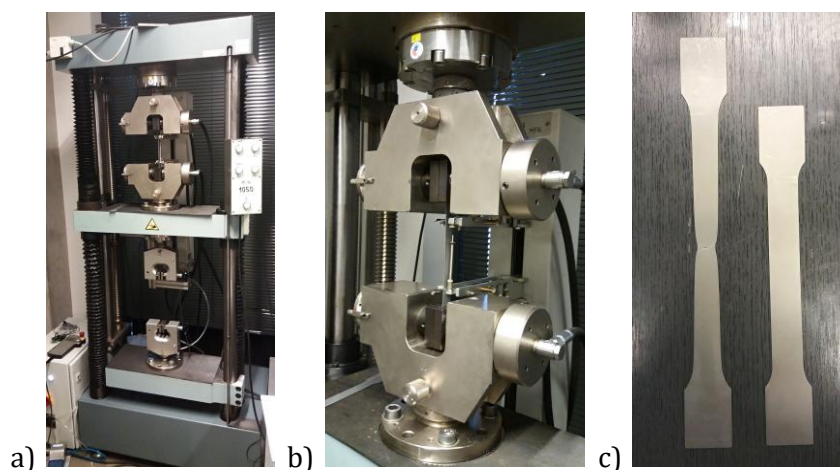
5.1 Statická zkouška tahem

V první fázi experimentu byla provedena standardní statická zkouška tahem podle ČSN EN ISO 6892-1 z důvodu určení základních materiálových vlastností, které následně sloužily jako výchozí podklad pro další fáze experimentu.

Zkušební vzorky pro statickou zkoušku tahem byly vystřiženy z pásů plechu ve směru kolmém na směr válcování, kde materiál obecně vykazuje nejhorší vlastnosti. Tvar a rozměry zkušebních vzorků byly voleny s ohledem na výše uvedenou normu (obr. 30). Samotná zkouška probíhala podle standardního postupu, kdy nejprve došlo k upnutí zkušební vzorku do hydraulických čelistí trhacího stroje TIRA Test 2300 (obr. 31a) a přiložení vynulovaného průtahoměru. Nakonec bylo zahájeno zatěžování podle podmínek, které jsou definovány příslušnou normou. Obr. 31b znázorňuje detail hydraulických čelistí trhacího stroje TIRA Test 2300 během zatěžování včetně přiloženého průtahoměru, na obr. 31c je porovnání zkušebních vzorků před zahájením zkoušky a na jejím konci.



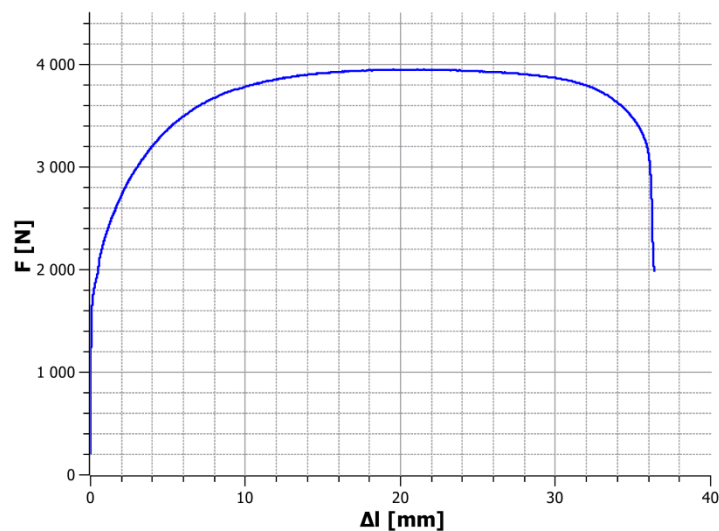
Obr. 30: Tvar a rozměry zkušební vzorku pro statickou zkoušku tahem



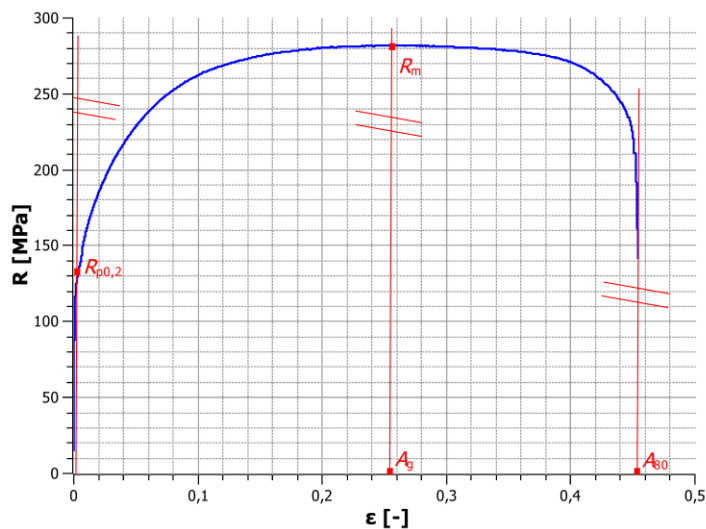
Obr. 31: Statická zkouška tahem

a) trhací stroj TIRA Test 2300; b) detail hydraulických čelistí; c) změna tvaru zkušebních vzorků

Podle výše uvedeného postupu bylo z důvodu zpřesnění získaných výsledků natahováno celkem pět vzorků. Na grafu 1 je ukázán pracovní diagram statické zkoušky tahem pro vzorek číslo 1, který ukazuje závislost zatěžující síly na protažení zkušební vzorku. Graf 2 znázorňuje smluvní diagram statické tahové zkoušky vzorku číslo 1, který byl stanoven z naměřených hodnot a sloužil k určení základních deformačních a napěťových charakteristik zkoumaného materiálu. Svislá osa je definována smluvním napětím, které je dáno poměrem zatěžující síly a původního průřezu ($R = \frac{F}{S_0}$). Vodorovná osa je určena smluvní deformací, tedy poměrem změny délky zkušební vzorku a původní délky ($\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$).



Graf 1: Pracovní diagram statické zkoušky tahem pro vzorek číslo 1



Graf 2: Smluvní diagram statické zkoušky tahem pro vzorek číslo 1

Obdobným způsobem byly postupně vyhodnoceny výsledky zkoušky i pro zbylé zkušební vzorky. Získané výsledky byly z důvodu určení jednotné hodnoty zprůměrovány, načež byly pro takto získané průměrné hodnoty stanoveny směrodatné odchylky. Tabulka 1 ukazuje přehled získaných deformačních a napětových charakteristik pro jednotlivé vzorky. V příloze číslo 1 je uveden protokol statické zkoušky tahem, ve kterém jsou kromě získaných výsledků uvedeny podmínky, za kterých probíhalo zatěžování a porovnání pracovních diagramů pro všechny zkušební vzorky.

Tabulka 1: Výsledky statické zkoušky tahem

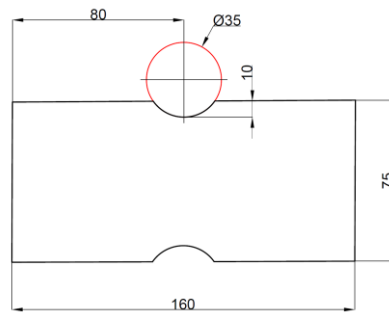
Číslo vzorku [-]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_g [%]	A_{80} [%]
1	280,8	128,2	25,7	45,4
2	277,9	126,5	25,3	44,7
3	282,4	130,8	25,9	43,7
4	281,9	130,6	25,4	45,9
5	280,9	128,1	25,5	45,5
Průměr:	$280,8 \pm 1,8$	$128,8 \pm 1,8$	$25,6 \pm 0,2$	$45 \pm 0,9$

5.2 Únavové cyklické zkoušky

Vzhledem k tomu, že během přepravy jsou jednotlivé výlisky vystaveny působení cyklického zatížení, byla uvážena možnost, že trhlinka, která se objevuje na některých dílech, by mohla být způsobena únavovým chováním. Z tohoto důvodu byly do experimentu zařazeny únavové cyklické zkoušky. Zkoušky byly provedeny jak na vzorcích standardního typu pro určení obecných únavových vlastností daného materiálu, tak na vzorcích odebraných z reálných součástí pro posouzení únavového chování součásti v problematické oblasti výlisku.

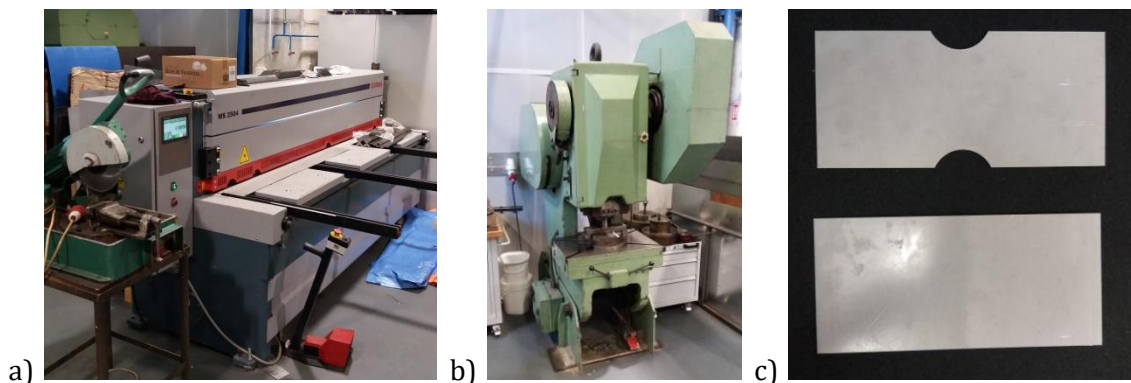
5.2.1 Určení obecných únavových vlastností

Volba typu zkušebních vzorků pro určení obecných únavových vlastností byla provedena tak, aby bylo umožněno co nejpřesněji postihnout únavové chování reálné součásti. Vzhledem k tomu, že problematická součást (výtažek) je tvořena různými oblastmi, které vykazují rozdílnou velikost deformace, bylo nutné pro učení obecných únavových vlastností zhotovit dva typy zkušebních vzorků. První typ zkušebních vzorků byl vytvořen z nedeformovaného materiálu, druhý typ pak z materiálu, který vykazoval určitý stupeň deformace. Na obr. 32 jsou ukázány tvar a rozměry zkušebních vzorků, které byly voleny tak, aby co nejpřesněji odpovídaly vzorkům předepsaným příslušnou normou.



Obr. 32: Tvar a rozměry zkušebních vzorků pro určení obecných únavových vlastností

Při přípravě zkušebních vzorků byly nejprve z pásů plechu o rozměrech 575x1700 mm tabulovými nůžkami připraveny menší pásy o rozměrech 75x160 mm. Jednotlivé pásy byly stejně jako v případě vzorků pro statickou zkoušku tahem vystřihovány ve směru kolmém na směr válcování. Na okrajích takto připravených pásů byly nakonec pomocí technologie stříhání na výstředníkovém lisu LENP 40 střížníkem o průměru 35mm zhotoveny vruby, přičemž výsledný tvar vzorku odpovídal obr. 32. Na obr. 33 jsou ukázána jednotlivá zařízení, která byla pro přípravu zkušebních vzorků použita a změna tvaru pásu po opatření vruby.



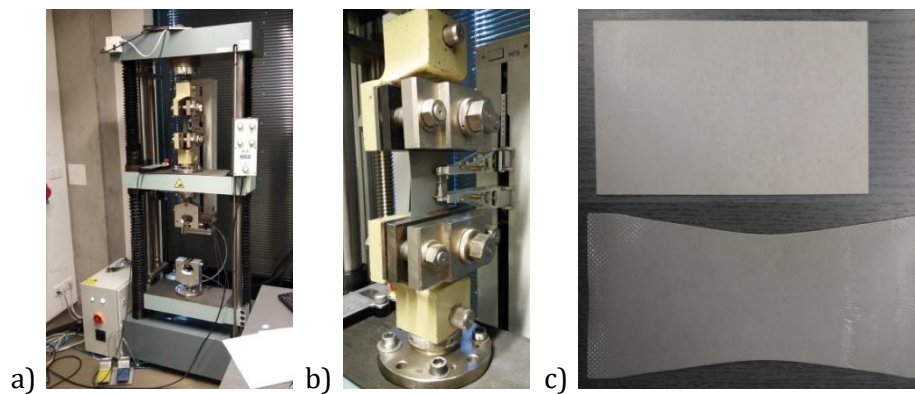
Obr. 33: Příprava zkušebních vzorků z nedeformovaného materiálu

a) tabulové nůžky MS2004; b) výstředníkový lis LENP 40; c) změna tvaru pásu po opatření vruby

Druhý typ zkušebních vzorků pro určení obecných únavových vlastností byl zhotoven z materiálu, který vykazoval určitý stupeň deformace. Velikost této deformace byla stanovena tak, aby přibližně odpovídala extrémní deformaci na problematickém výtažku. Této deformaci odpovídala situace, kdy byl polotovar pro přípravu zkušebního vzorku natažen až na mez homogenní tažnosti, čemuž přibližně odpovídala deformace 25%.

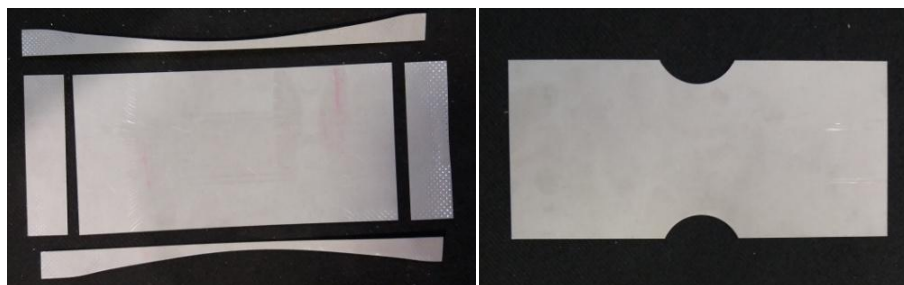
Při výrobě vzorků z deformovaného materiálu byly stejně jako v předchozím případě nejprve z připravených pásů plechu vystřiženy na tabulových nůžkách menší pásy, které však s ohledem na následnou deformaci měly rozměry 100x200 mm.

Vystřihovány byly opět ve směru kolmém na směr válcování. Připravené pásy byly upnuty do mechanických čelistí trhacího stroje TIRA Test 2300 a natahovány za účelem vyvození požadované deformace. Pro dosažení této požadované deformace byl pásek plechu natahován až na mez homogenní tažnosti, čemuž přibližně odpovídalo jeho protažení o 20 mm. Velikost protažení pásků plechu byla měřena přiloženým průtahoměrem. Na obr. 34 je ukázán pohled na trhací stroj TIRA Test 2300 opatřený mechanickými čelistmi (včetně jejich detailu) a změna tvaru pásku pro přípravu zkušební vzorku.



Obr. 34: Vyvození deformace na polotovarech pro přípravu zkušebních vzorků
a) trhací stroj TIRA Test 2300 s mechanickými čelistmi; b) detail mechanických čelistí; c) změna tvaru pásku

Pro dosažení požadovaného tvaru a rozměrů podle obr. 32, byly z takto deformovaných pásků nejprve tabulovými nůžkami (obr. 33a) odstříhnuty přebytečné okraje a poté stejně jako v předchozím případě pomocí výstředníkového lisu (obr. 33b) na jejich okrajích zhotoveny vruby. Na obr. 35 je ukázána postupná změna tvaru nataženého pásku ve výsledný zkušební vzorek.

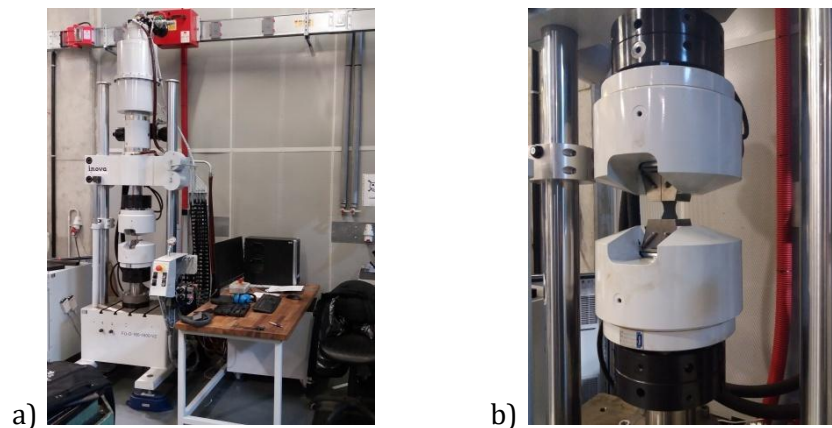


Obr. 35: Získání konečného tvaru zkušební vzorku

Pro určení obecných únavových vlastností zkoumaného materiálu bylo použito speciálního experimentálního pracoviště (obr. 36a), jehož hlavní částí je stroj pro určování vysokocyklové a nízkocyklové únavy INOVA FU-O-160-1600-V2 s připojeným počítačem, který zabezpečuje jeho ovládání. Základními parametry únavového stroje jsou dynamický

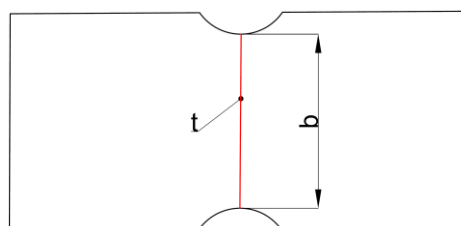
tah/tlak 100 kN a maximální zdvih válce 160 mm. Pracovní prostor stroje je tvořen horním a spodním upínačem (obr 36b), jež zajišťují upnutí vzorku. Každý z upínačů je možné vybavit párem vyměnitelných čelistí, které lze libovolně měnit podle tvaru zkušební vzorku. Během zkoušek je zatěžující síla vyvozována prostřednictvím hydraulického válce, jenž je propojen s horním upínačem, který je pohyblivý, zatímco spodní upínač zůstává v konstantní poloze.

Řízení zatěžovacího procesu je realizováno pomocí připojeného počítače, který je vybaven programem Testcontrol. Program Testcontrol umožňuje nastavení požadovaných parametrů zatěžovacího procesu, monitorování procesu během zkoušky a ukládání získaných výsledků.



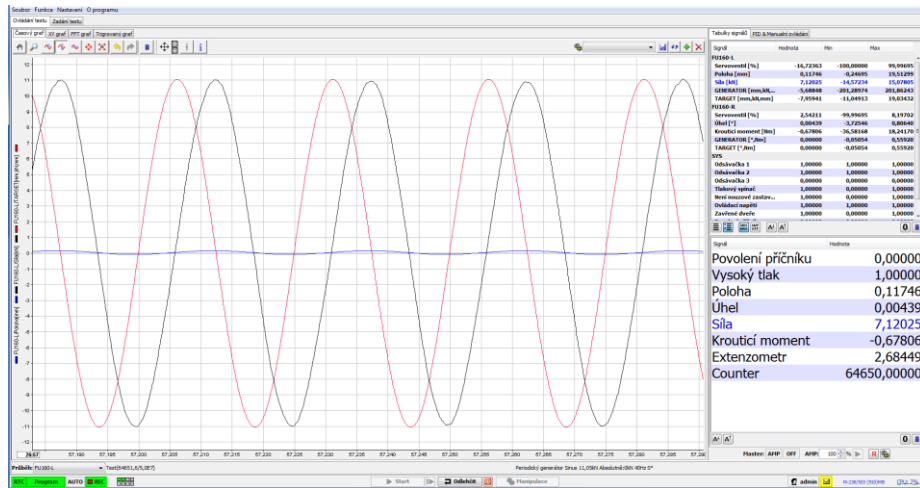
Obr. 36: Experimentální pracoviště pro určování vysokocyklové a nízkocyklové únavy
a) pohled na celé experimentální pracoviště; b) pracovní prostor únavového stroje

Po nezbytných přípravách experimentálního pracoviště byly jednotlivé vzorky postupně vystaveny působení cyklického zatížení různé velikosti za účelem stanovení počtu cyklů do porušení. Při samotném zatěžovacím procesu došlo nejprve k přeměření šířky mezi vruby a tloušťky zkušební vzorku. Změřené rozměry sloužily jako výchozí informace pro určení zatěžující síly podle vztahu $F = \sigma_h \cdot S$, kde σ_h je zvolená velikost horní hodnoty cyklického zatížení a S obsah plochy mezi vruby zkušební vzorku ($S = b \cdot t$). Na obr. 37 jsou znázorněny měřené rozměry zkušební vzorku, které sloužily pro stanovení plochy průřezu S .



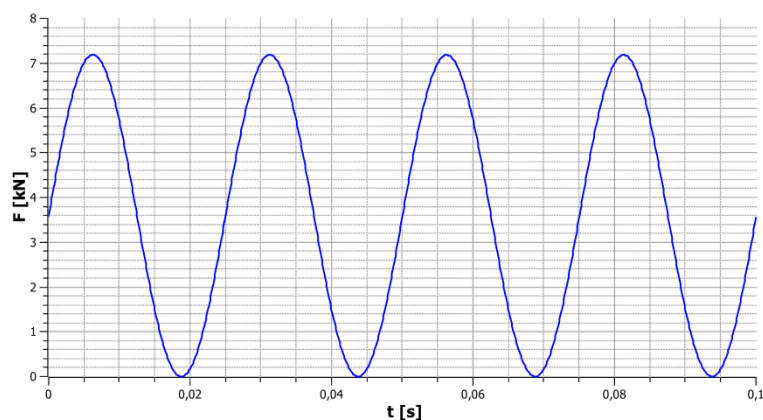
Obr. 37: Měřené rozměry zkušební vzorku pro stanovení zatěžující síly

Poté následovalo upnutí vzorku do čelistí únavového stroje a po nastavení příslušných parametrů bylo spuštěno zatěžování. Jakmile došlo k porušení celistvosti zkušební vzorku, program Testcontrol tento stav vyhodnotil a ukončil zatěžování. Obr. 38 znázorňuje uživatelské rozhraní programu Testcontrol během zatěžovacího procesu, v levé části okna je ukázán časový průběh zatěžovacího procesu, v pravé části pak číselné údaje popisující probíhající zatěžování (např. aktuální počet cyklů, zatěžující síla atd.).



Obr. 38: Uživatelské rozhraní programu TestControl

Jednotlivé zkušební vzorky byly zatěžovány míjivým způsobem cyklického zatížení s konstantní hodnotou středního napětí σ_m a amplitudy napětí σ_a , kterým odpovídala příslušná velikost horního napětí σ_h . Na grafu 3 je ukázán příklad průběhu zatěžující síly pro zkušební vzorek číslo 28 z nedeformovaného materiálu silou $F_h=7,184$ kN, které odpovídá velikost horního napětí $\sigma_h=190$ MPa. Frekvence zatěžování byla pro všechny vzorky nastavena na 40 Hz.



Graf 3: Průběh cyklického zatížení pro vzorek číslo 28 z nedeformovaného materiálu

Při nastavování parametrů zatěžovacího procesu byla pro první zkušební vzorek zvolena taková velikost horního napětí σ_h , aby přibližně odpovídala mezi pevnosti daného materiálu, jež byla určena zkouškou tahem. Zjištěný počet cyklů do porušení pro první vzorek sloužil jako výchozí informace pro volbu napěťové hladiny u následujících vzorků. Jednotlivé vzorky pak byly postupně zatěžovány v různých napěťových hladinách od horní hranice napětí až po spodní hranici. Horní hranici napětí, ve které byly zkušební vzorky zatěžovány, odpovídala taková velikost napětí, při které dojde k porušení zkušební vzorku při malém počtu cyklů, spodní hranici mez únavy. Tímto způsobem byly nejprve zatěžovány zkušební vzorky zhotovené z nedeformovaného materiálu a poté z deformovaného materiálu. Výsledky zatěžovacích procesů pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v příloze 1 a 2.

Po ukončení zatěžovacího procesu došlo k zaznamenání počtu cyklů, při kterém byl zkušební vzorek porušen a uložení informací o průběhu zkoušky do příslušného souboru. Na obr. 39 je ukázána poslední fáze zatěžování, během které dochází ke vzniku únavové trhliny a následnému přetržení zkušební vzorku.



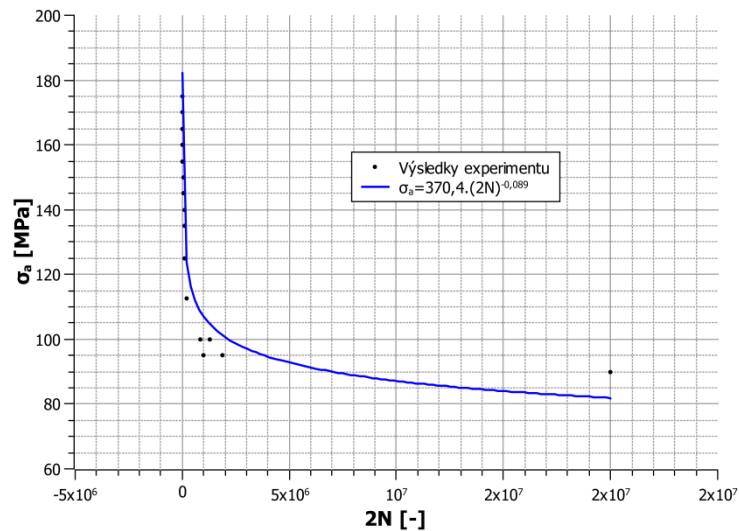
Obr. 39: Vznik únavové trhliny

Takto získaná data byla následně použita pro určení šikmých částí Wöhlerových křivek, které popisují oblast časované pevnosti. Pro jejich analytické vyjádření byla z důvodu postihnoutí celé oblasti zatěžování použita tzv. Basquinova rovnice $\sigma_a = \sigma_f' \cdot (2N)^b$, kde σ_f' je součinitel únavové pevnosti a b exponent únavové životnosti. Vzhledem k tomu, že Basquinova rovnice udává závislost amplitudy napětí na počtu půlkmitů do lomu, bylo nutné matematicky upravit hodnoty získané cyklickými únavovými zkouškami. Pro získání počtu půlkmitů byly veškeré údaje o počtu kmitů do lomu vynásobeny dvěma. Pro stanovení amplitudy napětí byly hodnoty odpovídající hornímu napětí vyděleny dvěma.

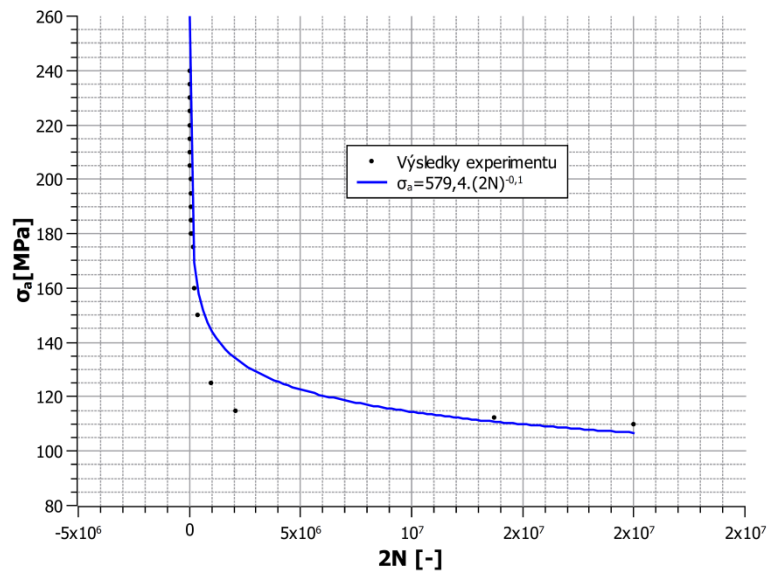
Na grafu 4 je ukázána šikmá část Wöhlerovy křivky pro nedeformovaný materiál při použití lineárních souřadnic, která vznikla proložením výsledků experimentu Basquinovou rovnicí $\sigma_a = 370,4 \cdot (2N)^{-0,089}$. Z křivky uvedené na daném grafu vyplývá, že

pro daný typ zkušebních vzorků je velikost součinitele únavové pevnosti $\sigma_f' = 370,4$ MPa a exponentu únavové životnosti $b = -0,089$.

Graf 5 znázorňuje šikmou část Wöhlerovy křivky v lineárních souřadnicích pro deformovaný materiál, kde je daná křivka popsána rovnicí $\sigma_a = 579,4 \cdot (2N)^{-0,1}$. Z křivky je zřejmé, že pro deformovaný materiál vychází součinitel únavové pevnosti $\sigma_f' = 579,4$ MPa a exponent únavové životnosti $b = -0,1$.



Graf 4: Šikmá část Wöhlerovy křivky nedeformovaného materiálu v lineárních souřadnicích

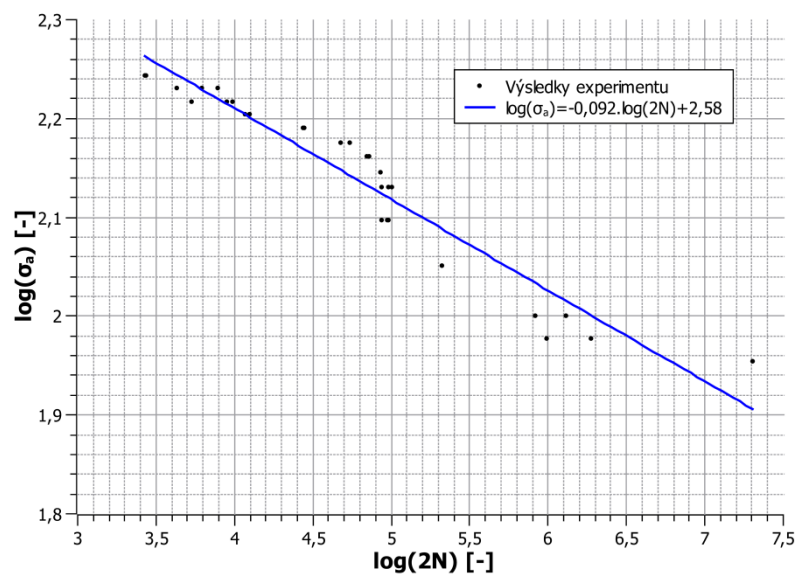


Graf 5: Šikmá část Wöhlerovy křivky deformovaného materiálu v lineárních souřadnicích

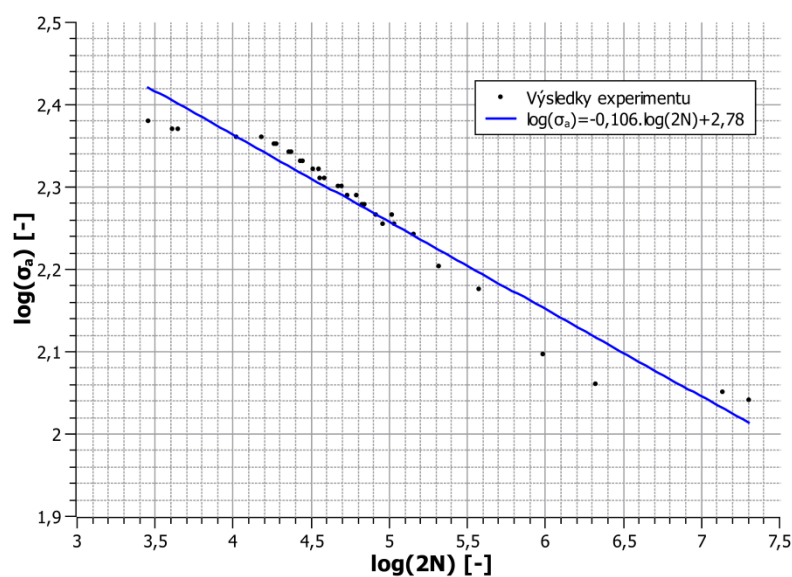
Pro názornější zobrazení získaných výsledků bylo provedeno sestavení šikmých částí Wöhlerových křivek popisujících oblast časované pevnosti v logaritmických souřadnicích za použití Basquinovy rovnice. Při aproximaci výsledků experimentu Basquinovou rovnicí v logaritmických souřadnicích je šikmá část Wöhlerovy křivky

znázorněna jako přímka. Pro sestavování Wöhlerovy křivky v logaritmických souřadnicích byly nejprve zlogaritmovány hodnoty amplitud napětí a půlkmitů pro jednotlivé vzorky. Následně byly takto upravené výsledky proloženy přímkou podle vztahu $\log(\sigma_a) = a \cdot \log(2N) + b$.

Na grafu 6 je ukázána šikmá část Wöhlerovy křivky v logaritmických souřadnicích pro nedeformovaný materiál. Výsledky experimentu byly aproximovány přímkou podle rovnice $\log(\sigma_a) = -0,092 \cdot \log(2N) + 2,58$. Graf 7 znázorňuje šikmou část Wöhlerovy křivky deformovaného materiálu v logaritmických souřadnicích, přičemž přímka, kterou jsou proloženy výsledky zkoušky je popsána vztahem $\log(\sigma_a) = -0,106 \cdot \log(2N) + 2,78$.

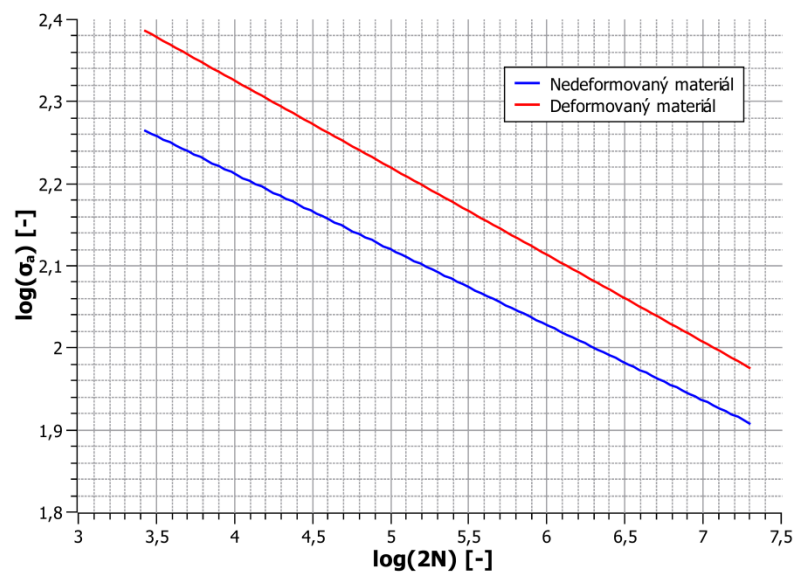


Graf 6: Šikmá část Wöhlerovy křivky nedeformovaného materiálu v log. souřadnicích



Graf 7: Šikmá část Wöhlerovy křivky deformovaného materiálu v log. souřadnicích

Na grafu 8 je ukázáno porovnání šikmých částí Wöhlerovy křivky deformovaného a nedeformovaného materiálu v logaritmických souřadnicích. Toto srovnání bylo provedeno za účelem posouzení vlivu deformace, ke které dochází při tažení příslušných dílů na změnu únavových vlastností materiálu DC05+ZE50/50-BPO. Z výsledků měření je patrné, že deformovaný materiál je schopen přenášet vyšší hodnoty cyklického napětí, než nedeformovaný materiál - deformace nemá negativní vliv na únavové chování daného typu materiálu. Tento fakt byl u materiálu DC05+ZE50/50-BPO způsoben zpevněním v důsledku deformace. V tabulce 2 je uvedeno porovnání ukazatelů únavového chování podle Basquina.



Graf 8: Porovnání šikmých částí Wöhlerovy křivky

Tabulka 2: Porovnání ukazatelů únavového chování podle Basquina

	σ_f' [MPa/cykl]	b [-]
Nedeformovaný materiál	370,4	-0,089
Deformovaný materiál	579,4	-0,1

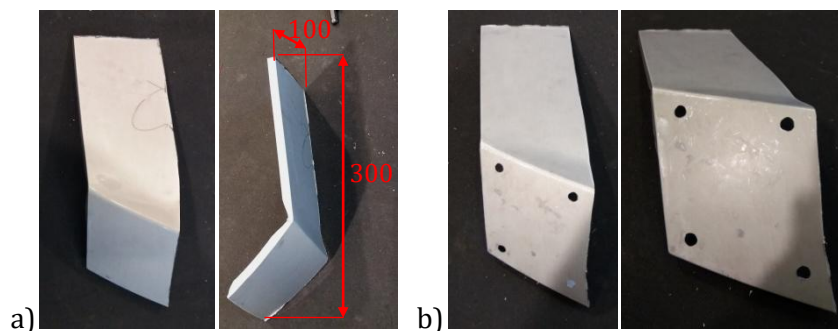
5.2.2 Zatěžování vzorků odebraných z reálných součástí

Zkušební vzorky pro posouzení únavového chování reálných součástí byly zhotoveny z polotovarů, které byly odebrány přímo z problematických výtažků. Polotovary pro přípravu vzorků byly z reálných součástí odebrány ve firmě ŠKODA AUTO a.s., přičemž místa odebrání odpovídala oblastem označeným na obr. 29. Na obr. 40 jsou znázorněny polotovary pro přípravu zkušebních vzorků, kdy jeden ze zobrazených polotovarů byl odebrán z levé části výtažku, druhý z jeho pravé části.



Obr. 40: Polotovary pro přípravu zkušebních vzorků odebrané z reálných součástí

Vzhledem k tomu, že každý takto připravený polotovar byl různý, došlo nejprve k úpravě jejich tvaru a rozměrů, aby byly všechny zkušební vzorky pro posouzení únavového chování reálných součástí přibližně stejné. K této úpravě byla použita standardní úhlová bruska s dělícím kotoučem. Po této úpravě byla výsledná šířka všech vzorků 100 mm a celková délka 300 mm. V poslední fázi přípravy zkušebních vzorků byly na jejich čele pomocí sloupové vrtačky vyvrtány 4 otvory o průměru 8 mm, které sloužily k ustavení vzorku na únavový stroj. Na obr. 41 je ukázána postupná změna tvaru zkušební vzorku pro hodnocení únavových vlastností reálných součástí včetně vyznačených rozměrů a detailu čela vzorku se zhotovenými otvory. Tímto způsobem bylo připraveno celkem 8 zkušebních vzorků (4 z polotovarů, které byly odebrány z pravé části výtažku a 4 z polotovarů z levé části výtažku).

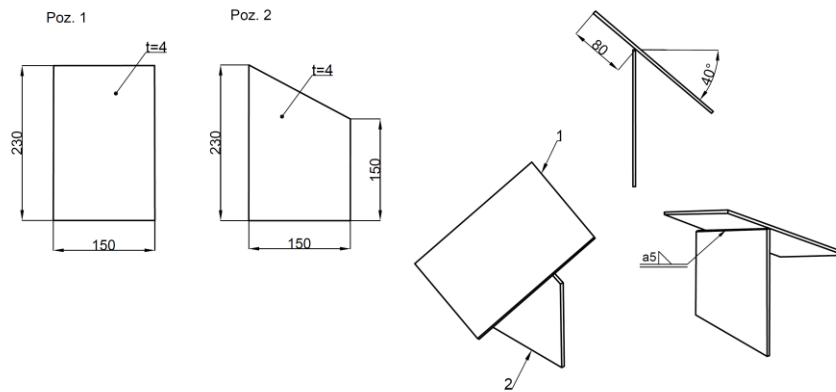


Obr. 41: Tvorba zkušebních vzorků pro hodnocení únavových vlastností reálných součástí
a) výsledný tvar a rozměry zkušebních vzorků; b) poloha otvorů na čele zkušební vzorku

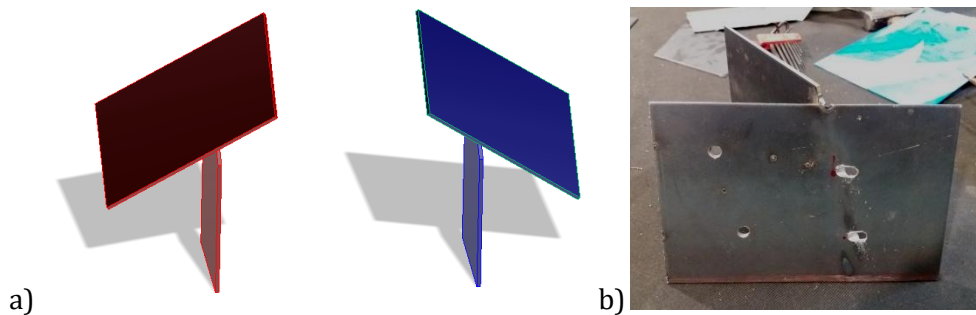
Vzhledem ke tvaru zkušebních vzorků bylo v první fázi této části experimentu nutné navrhnout a vyrobít jednoduchý přípravek, který by umožnil ustavení zkušebních vzorků na únavový stroj a neměnnost jejich polohy v průběhu zatěžování. Tento přípravek byl svařen z ocelových plechů o tloušťce 4 mm a jeho tvar byl navržen tak, aby po přiložení čela zkušební vzorku na horní plech (pozice 1 na obr. 42) byla rovinná část vzorku rovnoběžná se spodním plechem (pozice 2 na obr. 42). Na obr. 42 je ukázána konstrukce přípravku pro zkušební vzorky vyrobené z levé části problematického výtažku.

Kvůli tomu, že zkušební vzorky byly odebrány jak z levé, tak pravé části problematického výtažku, byly sestrojeny dva typy ustavovacích přípravků. Přípravek pro

ustavování zkušebních vzorků zhotovených z pravé části výtažku byl zrcadlově symetrický podle svislé osy, vzhledem k ustavovacímu přípravku pro vzorky z levé části výtažku (obr. 43a, pro vzorky z levé části výtažku - červená barva, pro vzorky z pravé části výtažku - modrá barva). Nakonec byly v horních částech takto vyrobených přípravků vyvrtány 4 otvory (obr.43b), jejichž pozice odpovídala otvorům na čele zkušebních vzorků (obr. 41b).



Obr. 42: Konstrukce ustavovacího přípravku pro vzorky odebrané z levé části výtažku

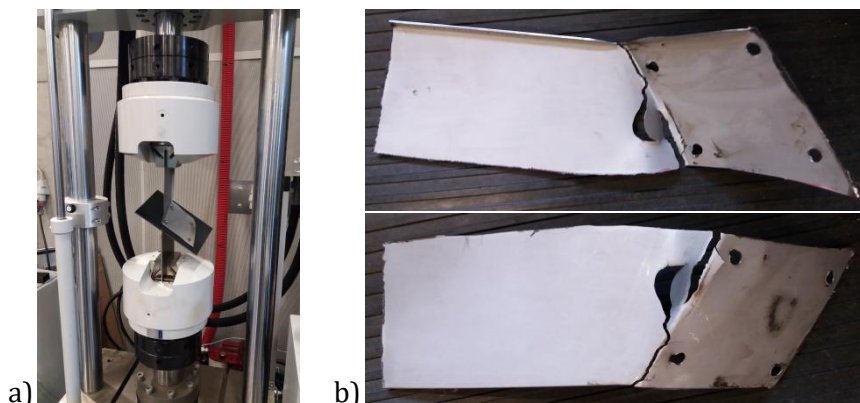


Obr. 43: Konstrukce ustavovacích přípravků

a) porovnání přípravků pro vzorky z levé a pravé části výtažku; b) čelo přípravku po zhotovení otvorů

Při samotném zatěžovacím procesu byl nejprve prostřednictvím výše popsaného přípravku ustaven zkušební vzorek na únavový stroj. Poté došlo pomocí programu TestControl k nastavení parametrů zatěžovacího procesu a spuštění zatěžování. Všechny zkušební vzorky byly zatěžovány míjivý způsobem cyklického zatížení silou, jejíž horní hodnota byla $F_h=0,2$ kN. Velikost síly byla volena tak, aby přibližně odpovídala zatížení, kterému jsou reálné součásti vystaveny během jejich přepravy (orientační stanovení amplitudy síly bylo provedeno podle vztahu $F_a = m \cdot g$, kde hmotnost součásti $m=10$ kg a velikost gravitačního zrychlení $g=9,81$ m·s⁻²). Jakmile došlo k porušení zkušební vzorku, program TestControl ukončil zatěžování a zaznamenal počet cyklů, při kterém došlo k deformaci vzorku. Na obr. 44a je ukázán pracovní prostor únavového stroje INOVA FU-O-160-1600-V2 během zatěžování, obr. 44b znázorňuje zkušební vzorek na konci zkoušky. V

tabulce číslo 3 jsou výsledky únavových cyklických zkoušek zkušebních vzorků odebraných z reálných součástí, kdy pro každý zkušební vzorek je uvedena informace o počtu cyklů do porušení a straně výtažku, ze které byl odebrán polotovár pro zhotovení tohoto zkušebního vzorku.



Obr. 44: Zatěžování zkušebních vzorků odebraných z reálných součástí

a) pracovní prostor únavového stroje; b) zkušební vzorky na konci zkoušky

Tabulka 3: Výsledky zatěžování pro zkušební vzorky odebrané z reálných součástí

Číslo vzorku [-]	N [-]	Strana výtažku [-]
1	1876392	levá
2	1604206	levá
3	2146150	levá
4	1784321	levá
5	2196643	pravá
6	1884972	pravá
7	1715879	pravá
8	2005721	pravá

Aby bylo možné na základě takto získaných údajů stanovit průměrnou hodnotu počtu cyklů, při které dojde v oblasti lemu ke vzniku trhliny, bylo nejprve nutné posoudit, zda má strana výtažku, ze které byl odebrán polotovár pro zhotovení zkušebního vzorku vliv na počet cyklů, při kterém dojde ke vzniku trhliny. K tomuto posouzení byla využita statistická metoda analýzy rozptylu (nebo též ANOVA). Kompletní výpočet byl vzhledem k jeho složitosti proveden prostřednictvím programu Microsoft Excel. V tabulce 4 je ukázán výstup z programu Microsoft Excel pro test ANOVA. Vzhledem k tomu, že velikost ukazatele F je menší, než jeho kritická hodnota F_{krit} , můžeme konstatovat, že strana výtažku, ze které byl zkušební vzorek zhotoven, nemá na vliv na počet cyklů, při kterém dojde k jeho porušení.

Tabulka 4: Výstup z programu Microsoft Excel při testu ANOVA

Faktor				
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
Levá strana	4	7411069	1852767	5,1E+10
Pravá strana	4	7803215	1950804	4,1E+10

ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	1,92E+10	1	1,92E+10	0,417762	0,541974	5,987378
Všechny výběry	2,76E+11	6	4,6E+10			
Celkem	2,95E+11	7				

Následně byla z výsledků zkoušky stanovena průměrná hodnota počtu cyklů, při které dojde ke zniku trhliny: 1901786 ± 192126 cyklů. Na základě této průměrné hodnoty lze usoudit, že ke vzniku trhliny dojde při míjivém způsobu zatěžování silou $F_h=0,2\text{kN}$ s frekvencí 40 Hz přibližně za 20 hodin (průměrná doba transportu výtažků je přibližně 2,5 hodiny, přičemž maximální časový úsek, během kterého jsou díly převáženy, zpravidla nepřekračuje 5 hodin). Předpoklad že ke vzniku trhliny dochází v důsledku únavového chování materiálu je vzhledem ke zjištěným skutečnostem možné vyloučit.

5.3 Mikroskopická analýza problematické oblasti

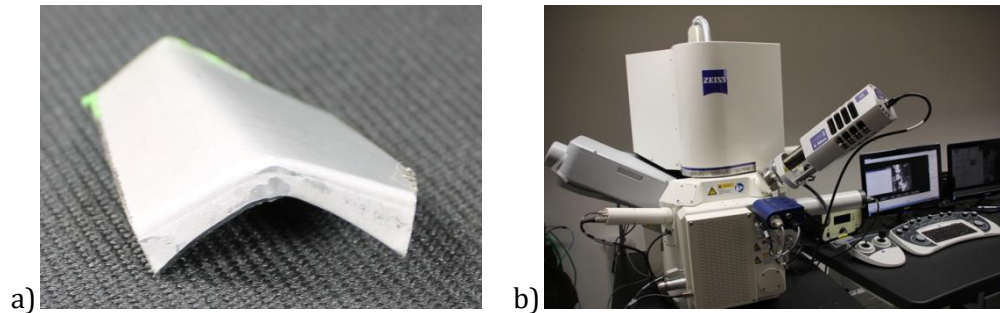
Tato část experimentu byla zaměřena na podrobnější prozkoumání problematické oblasti výtažku, ve které dochází ke vzniku trhliny. Prozkoumání bylo provedeno za účelem posouzení, zda v problematické oblasti nedochází během výroby ke vzniku defektů, které by následně mohly zapříčinit vznik trhlín. Mikroskopický průzkum problematické oblasti výtažku byl proveden pomocí:

- a) Elektronové mikroskopie
- b) Optické mikroskopie

5.3.1 Elektronová mikroskopie

Elektronová mikroskopie byla v rámci experimentu využita pro posouzení stavu povrchu výtažku v oblasti problematického lemu. K tomuto průzkumu byl využit elektronový mikroskop Carl Zeiss ULTRA PLUS s mikroanalytickým systémem OXFORD INSTRUMENTS, který se nachází v laboratoři Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace na Technické univerzitě v Liberci. Vzorek pro potřeby elektronové

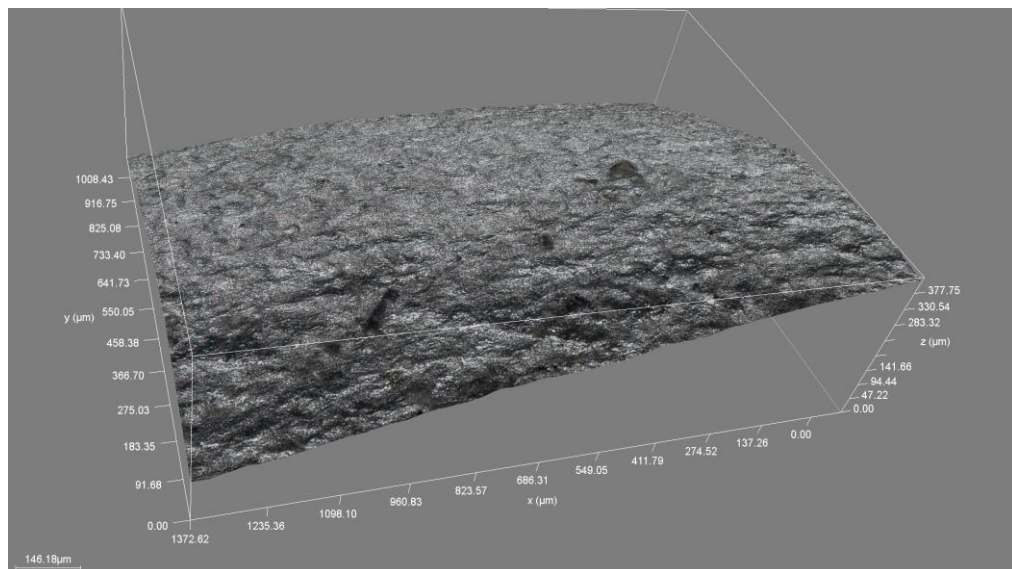
mikroskopie byl odebrán z problematického výtažku standardní úhlovou bruskou s dělicím kotoučem tak, aby byla umožněna analýza jeho povrchu prostřednictvím elektronového mikroskopu a zároveň nedošlo k poškození zkoumaného lemu. Takto připravený vzorek (obr. 44a) byl následně vložen do komory elektronového mikroskopu, načež došlo k zahájení mikroskopické analýzy povrchu lemu. Na obr. 44b je znázorněn pohled na zmiňovaný elektronový mikroskop.



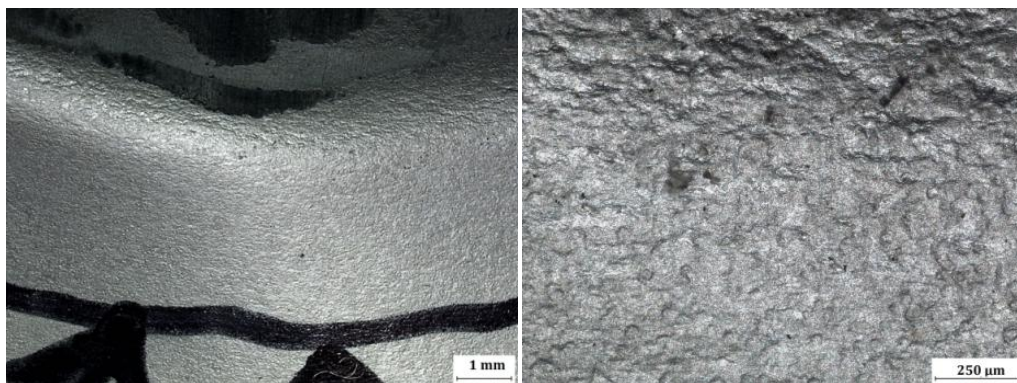
Obr. 45: Elektronová mikroskopie

a) vzorek pro elektronovou mikroskopii; b) elektronový mikroskop Carl Zeiss ULTRA PLUS

Na obr. 46 a obr. 47 jsou ukázány výstupy z elektronového mikroskopu. První z obrázků ukazuje reliéf povrchu problematické oblasti výtažku. Na druhém obrázku jsou postupně ukázány snímky problematického lemu pod různým zvětšením. Z obou obrázků je jasně patrné zvrásnění povrchu snímané oblasti (tzv. pomerančová kůra), které bývá ukazatelem značných lokálních deformací, jež by následně mohly způsobovat vznik trhliny.



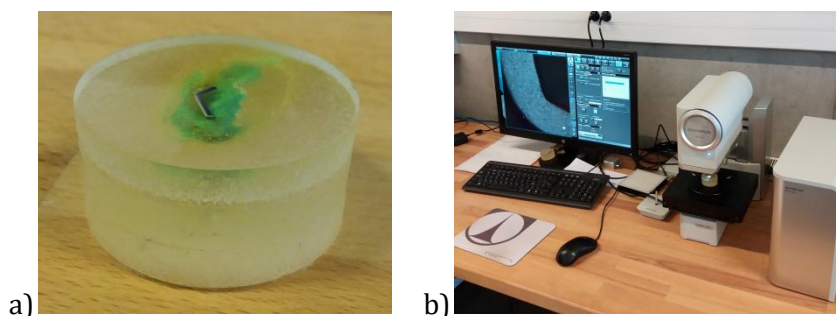
Obr. 46 Reliéf povrchu problematické oblasti výtažku



Obr. 47 Snímky oblasti lemu pořízené elektronovým mikroskopem

5.3.2 Optická mikroskopie

Optická mikroskopie byla v rámci experimentu využita k průzkumu podpovrchové oblasti, který měl za cíl odhalit případně skryté defekty, jež by mohly zapříčiňovat vznik trhliny na některých dílech během jejich přepravy. V první fázi experimentu byla provedena příprava metalografického vzorku podle standardního postupu, kdy nejprve došlo k umístění již dříve odebrané části problematického výtažku (obr. 45a) do speciální formy a zalití směsí dentacryl. Po ztuhnutí směsi následovalo broušení a leštění vzorku pomocí metalografické brusky PHOENIX 4000. Nakonec byl takto připravený vzorek zkoumán pomocí digitálního mikroskopu Olympus DSX 510, kdy jedna série snímků byla pořízena před naleptáním vzorku, druhá po jeho naleptání. Na obr. 48a je ukázán metalografický vzorek pro optickou mikroskopii po naleptání, obr. 48b znázorňuje pohled na celé pracoviště vybavené digitálním mikroskopem.

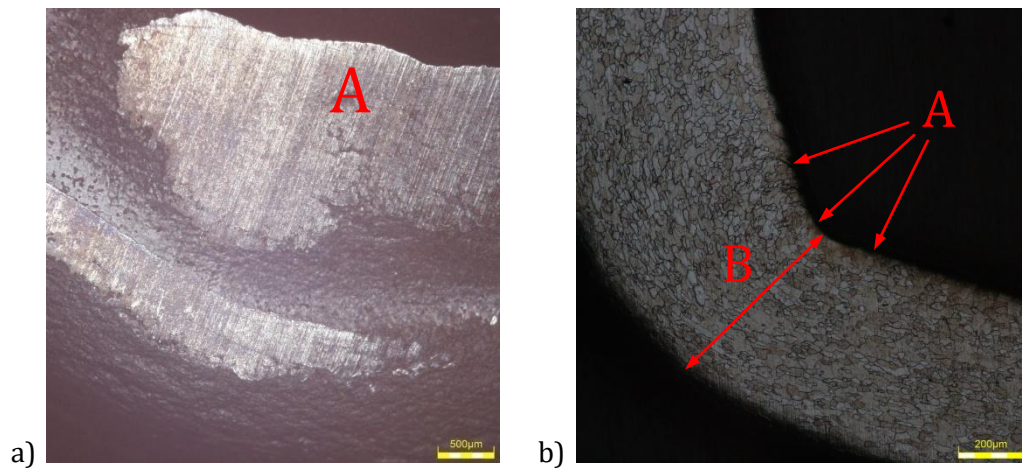


Obr. 48: Optická mikroskopie

a) připravený metalografický vzorek pro optickou mikroskopii; b) pohled na celé experimentální pracoviště

Na obr. 49 jsou ukázány snímky, které byly pořízeny zmiňovaným digitálním mikroskopem, první ze snímků ukazuje detail rohové oblasti lemu před naleptáním, druhý po jeho naleptání. Z obou snímků je patrné pěchování materiálu v oblasti lemu a výraznější ztenčení stěny na jeho hraně (v oblasti radiu). Tyto dva defekty byly způsobeny

nevhodnou konstrukcí dílu v oblasti lemu a lze je považovat za možnou příčinu vzniku trhliny na některých výtažcích.



Obr. 49: Snímky oblasti lemu pořízené digitálním mikroskopem

a) detail rohové oblasti lemu před naleptáním; b) detail rohové oblasti lemu po naleptání; A-oblast přechování materiálu; B-oblast ztenčení stěny

Závěr

V první části diplomové práce se podařilo provést teoretický rozbor, jenž byl zaměřen na přiblížení problematiky technologie tváření, technologie tažení a únavového chování materiálu. Struktura teoretické části byla navržena tak, aby bylo umožněno co nejlépe pochopit problematiku, kterou se tato diplomová práce zabývá a položit teoretický základ pro realizaci praktické části.

Praktická část diplomové práce byla zaměřena na analýzu možných příčin vzniku trhliny v oblasti lemu na některých výtažcích pátých dveří automobilu Škoda Superb III během přepravy mezi výrobními závody společnosti ŠKODA AUTO a.s. Vzhledem k charakteru přepravy a způsobu upevnění jednotlivých výtažků ve speciálních paletách byla uvážena možnost, že ke vzniku trhliny dochází v důsledku působení cyklického zatížení. Z tohoto důvodu byla většina praktické části věnována únavovým cyklickým zkouškám, které byly doplněny statickou zkouškou tahem a mikroskopickou analýzou oblasti, ve které dochází na výtažku ke vzniku trhliny.

V první fázi experimentu se podařilo pomocí statické zkoušky tahem stanovit základní napěťové a deformační charakteristiky materiálu DC05-ZE50/50+BPO, které sloužily jako výchozí podklad pro realizaci únavových cyklických zkoušek. V rámci únavových cyklických zkoušek byly zatěžovány standardní vzorky pro určení obecných únavových vlastností základního a deformovaného materiálu DC05-ZE50/50+BPO a vzorky odebrané z reálných součástí pro posouzení únavového chování těchto dílů v oblasti problematického lemu. Na základě provedených zkoušek se podařilo prokázat, že deformace, ke které dochází při tažení, nemá negativní vliv na únavové chování daného typu materiálu. Zároveň se podařilo zjistit, že průměrný časový úsek, během kterého dochází v oblasti lemu ke vzniku trhliny při cyklickém zatěžování silou odpovídající vlastní hmotnosti dílu, značně převyšuje dobu, po kterou je díl převážen. Na základě těchto zjištěných skutečností byla zamítnuta možnost, že vznik trhliny je způsoben únavovým chováním materiálu.

Poslední část experimentu byla věnována mikroskopické analýze problematické oblasti výtažku pomocí elektronové a optické mikroskopie. Pomocí elektronové mikroskopie byl zkoumán povrch problematického lemu. Na povrchu lemu bylo objeveno výraznější zvrásnění (tzv. pomerančová kůra), jenž bývá ukazatelem značných lokálních deformací, které by mohly být jednou z příčin vzniku trhliny na některých výtažcích. Optická mikroskopie byla využita k průzkumu podpovrchové oblasti. Na základě snímků, které byly pomocí optické mikroskopie pořízeny, bylo prokázáno, že během tažení dochází

k přechování materiálu v oblasti lemu a výraznějšímu ztenčení stěny na jeho hraně (v oblasti rádiu). Všechny nalezené defekty v oblasti lemu byly způsobeny nevhodným konstrukčním řešením této části výtažku a lze je považovat za možnou příčinu vzniku trhliny.

Vzhledem k problémům, které vznik trhlín na některých dílech způsoboval, byla nakonec provedena konstrukční úprava výtažku pátých dveří automobilu Škoda Superb III a v současné době již dochází k zavádění výroby těchto dílů bez problematického lemu. Výsledky, které byly získány v rámci praktické části této diplomové práce, sloužily jako jeden z podkladů, na základě kterého byl tento konstrukční zásah proveden.

Použitá literatura

- [1] ŽÍDEK, Milan a Boris SOMMER. *Tváření oceli*. Praha: SNL-Nakladatelství technické literatury, 1988.
- [2] TMĚJ, Jaroslav a Viktor MIKEŠ. *Teorie tváření*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1981.
- [3] SCHINDLER, Ivo a Petr Kawulok. *Deformační chování materiálů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2013 [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/13_Deformacni_chovani_materialu/Schindler_Deformacni_chovani_materialu.pdf
- [4] DANCHENKO, Valentin Nikolaevich. *Metal forming* [online]. Dnepropetrovsk (UKR), 2007 [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <http://metal-forming.org/images/for-books/Danchenko/danchenko-omd-engl.pdf>
- [5] LAVAKUMAR, A. *Concepts in Physical Metallurgy*. San Rafael (USA): Morgan & Claypool Publishers, 2017. ISBN 978-1-6817-4472-8.
- [6] LENFELD, Petr. *Technologie II: 1. část (tváření kovů)*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-466-5.
- [7] Introduction to PV Design by Analysis. *Personal WWW Pages* [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: http://personal.strath.ac.uk/j.wood/CCOPPS_DBA/Notes/dba_intro_content_1.htm
- [8] FABÍK, Richard. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. *Tváření kovů*. Ostrava, 2012. Dostupné také z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TVKB/Tvareni%20kovu.pdf>
- [9] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: Plošné a objemové tváření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [10] *FLD diagram* [online]. Katedra strojírenské technologie, Technická univerzita v Liberci [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/fld.pdf
- [11] SCHINDLER, Ivo, Petr KAWULOK a Miroslav LEGERSKI. *Studijní opora předmětu Metalurgická tvářitelnost*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008.
- [12] Deep Drawing. *The library of manufacturing* [online]. [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: http://thelibraryofmanufacturing.com/deep_drawing.html
- [13] TATÍČEK, František. Akademie tváření: Hluboké tažení. *MM spektrum* [online]. 2011 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-hluboke-tazeni.html>
- [14] Defects in Sheet Metal Drawing. *ME Mechanical* [online]. 2017 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <https://me-mechanicalengineering.com/defects-sheet-metal-drawing/>

- [15] HEDRICK, Art. Key design principles for successful deep drawing. *FMA: A publication of the Fabricators and Manufacturers Association* [online]. 2001 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/article/stamping/key-design-principles-for-successful-deep-drawing>
- [16] Formability of pure titanium sheet in square cup deep drawing. *The light metal educational foundation* [online]. [cit. 2017-12-06]. Dostupné z: <http://www.lm-foundation.or.jp/english/abstract-vol48/abstract/42.html>
- [17] RŮŽIČKA, Milan, Miroslav HANKE a Milan ROST. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ V PRAZE. *Dynamická pevnost a životnost*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1987.
- [18] BHAT, S. a R. PATIBANDLA. Metal Fatigue and Basic Theoretical Models: A Review. *Alloy Steel - Properties and Use*. InTech, 2011, s. 204-236. ISBN 978-953-307-484-9.
- [19] FUSEK, Martin a Ludmila ADÁMKOVÁ. *Únava materiálu: únavový lom* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_011/%C3%9Anava%20materi%C3%A1lu/02%20Text%20pro%20e-learning/%C3%9Anava%20materi%C3%A1lu%2007.pdf
- [20] SEDLÁK, Josef a Radim HALAMA. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Experimentální poznatky: Teoretický základ* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Teorie-plasticity_Experimentalni-poznatky.pdf
- [21] SIDDIQUI, Muhammad. *Fracture Mechanics & Failure Analysis:: Lecture Fatigue* [online]. 2016 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/MuhammadAliSiddiqui6/fracture-mechanics-failure-analysis-lecture-fatigue>
- [22] P10: *Vliv středního napětí na mez únavy (smyčkové diagramy), mez únavy těles s vruby, vliv víceosé napjatosti* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/prednaska10.pdf>
- [23] VLACH, Bohumil. Vysoké učení technické v Brně. *Únava materiálu: úvod*. Brno.
- [24] FUSEK, Martin a Ludmila ADÁMKOVÁ. *Únava materiálu: mez únavy hladkých těles, faktory ovlivňující mez únavy* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_011/%C3%9Anava%20materi%C3%A1lu/02%20Text%20pro%20e-learning/%C3%9Anava%20materi%C3%A1lu%2008.pdf
- [25] ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. 11. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959.
- [26] RŮLIČKA, Milan. *Únavové křivky: Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí*. Praha, 1998. Dostupné také z: http://mechanika2.fs.cvut.cz/sources_old/pzk/5_1.html

Seznam příloh

Příloha 1: Protokol statické zkoušky tahem

Příloha 2: Tabulka výsledků únavové cyklické zkoušky pro nedeformovaný materiál

Příloha 3: Tabulka výsledků únavové cyklické zkoušky pro deformovaný materiál

Příloha 1: Protokol statické zkoušky tahem

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

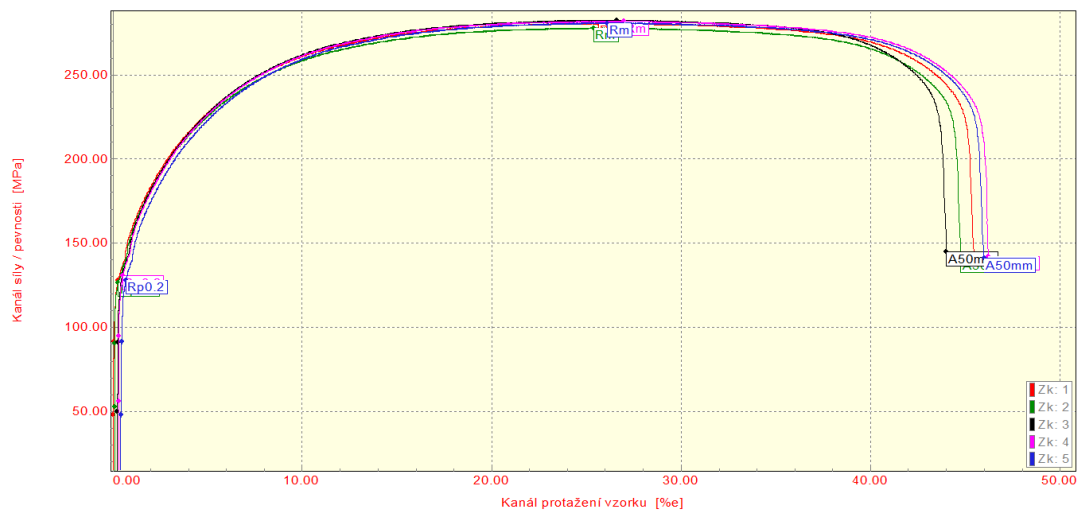
VSTUPNÍ PARAMETRY

Materiál : DC 05 ZE 50/50 BPO
Norma :
Rozměr vzorku : 0,7 x 20 mm
Rychlost zatěžování : proměnná 1(15) mm/min.
Vypracoval : Bc. Jan Otřísal
Datum : 9.3. 2018
Teplota : RT

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A _{90mm} %
1	128.2	280.8	45.35
2	126.5	277.9	44.65
3	130.8	282.4	43.67
4	130.6	281.9	45.87
5	128.1	280.9	45.47

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A _{90mm} %
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	128.8	280.8	45.00
Směrodatná odchylka	1.8	1.8	0.86
Minimální hodnota	126.5	277.9	43.67
Maximální hodnota	130.8	282.4	45.87



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

Příloha 2: Tabulka výsledků únavové cyklické zkoušky pro nedeformovaný materiál

Číslo vzorku [-]	σ_h [MPa]	N [-]
1	350	1351
2	350	1360
3	340	3922
4	340	3067
5	340	2133
6	330	4442
7	330	2669
8	330	4851
9	320	5865
10	320	6266
11	310	13974
12	310	13667
13	300	23588
14	300	27143
15	290	34881
16	290	35786
17	280	42646
18	280	42406
19	270	50271
20	270	47626
21	270	43435
22	250	47703
23	250	43273
24	250	47371
25	225	104677
26	200	648079
27	200	416952
28	190	489916
29	190	933764
30	180	$>10^7$
31	170	$>10^7$
32	140	$>10^7$

Příloha 3: Tabulka výsledků únavové cyklické zkoušky pro deformovaný materiál

Číslo vzorku [-]	σ_h [MPa]	N [-]
1	480	1419
2	470	2034
3	470	2202
4	460	7535
5	460	5256
6	450	9039
7	450	9414
8	440	11693
9	440	11254
10	430	13870
11	430	13472
12	420	17702
13	420	16241
14	410	19105
15	410	17980
16	400	24761
17	400	23396
18	390	26665
19	390	30609
20	380	33314
21	380	34550
22	370	51945
23	370	41170
24	360	45394
25	360	53455
26	350	71592
27	320	103427
28	300	186570
29	250	479130
30	230	1039800
31	225	6854632
32	220	$>10^7$