

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

# TAHOVÉ A ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY TENKÝCH VLÁKEN A FÓLIÍ

TENSILE AND FATIGUE TESTING OF THIN FIBRES AND FOILS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAROSLAV ŠTĚRBÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

MGR. TOMÁŠ KRUML, CSC.

BRNO 2008



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Štěrbáček Jaroslav

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Materiálové inženýrství (3911T011)**

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

### **Tahové a únavové zkoušky tenkých vláken a fólií**

v anglickém jazyce:

### **Tensile and Fatigue Testing of Thin Fibres and Foils**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jeden z hlavních směrů v současném materiálovém výzkumu je vývoj nanomateriálů, které získávají nové zajímavé vlastnosti díky strukturním elementům o velikostech v řádu jednotek či desítek nm. Tyto materiály často nejsou připravovány ve velkých objemech umožňujících zkoušení vzorků na klasických zatěžovacích strojích. Jednou z možností, jak takové materiály testovat, je zmenšovat testovací stroje, které musí být schopny měřit síly v řádu mN. Na Ústavu fyziky materiálů AVČR byl nedávno takový stroj zakoupen a v současnosti probíhá jeho zkušební provoz. Diplomantovým úkolem bude provést tahové a únavové zkoušky na různých druzích materiálů (fólie Al, vlákna Al, vlákna nylon) a získat jednak materiálová data, jednak zkušenosti s provozem testovacího zařízení.

Cíle diplomové práce:

- navrhnout a otestovat způsoby výroby vzorků z Al fólií
- vyzkoušet různé možnosti uchycení vzorků z vláken i fólií do čelistí stroje
- provést tahové a únavové zkoušky na stroji MTS Tytron, ověřit reproduktibilitu měření
- provést systematické měření únavových vlastností Al fólií určených pro výrobu chladicích jednotek v míjivém cyklu

Seznam odborné literatury:


- [1] Connolley, T., McHugh, P.E., Bruzzi, M.: A Review of Deformation and Fatigue of Metals at Small Size Scales, Fatigue Fract. Engn Mater. Struct. 28 (2005), 1119
- [2] Polák, J.: Cyclic Plasticity and Low Cycle Fatigue Life of Metals, Elsevier-Academia 1991
- [3] Suresh, S.: Fatigue of Materials, Cambridge university press, 1998
- [4] Chawla, N., Kerr, M., Chawla, K.K. : Monotonic and Cyclic Behaviour of High Performance Ceramic Fibres; J. Am. Ceram. Soc. 88 (2005), 101


Vedoucí diplomové práce: Mgr. Tomáš Kruml, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 20.11.2007



  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Jaroslav Cihlář, CSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Na Ústav fyziky materiálů, AVČR v.v.i. byl zakoupen zkušební stroj MTS Tytron 250 s originální konstrukcí. Cílem této diplomové práce bylo seznámit se s jeho ovládáním a zjistit jeho výhody i limity. Byly provedeny tahové zkoušky na Al vláknech o průměrech 125  $\mu\text{m}$ , 180  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$  na nylonových vláknech o průměrech 250  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$  a tahové a únavové zkoušky na Al fóliích o tloušťce 77  $\mu\text{m}$ . Bylo zjištěno, že stroj je vhodný pro testování zejména jednak subtilních vzorků s velmi malými zátěžnými silami a jednak vzorků s malou tuhostí, jako jsou polymery anebo velmi dlouhá kovová či keramická vlákna. Naopak, stroj Tytron není schopen deformovat vzorky s vysokou tuhostí a s vyššími zátěžnými silami. Materiálové charakteristiky studovaných vzorků byly změřeny s vysokou reprodukovatelností. Výhody a omezení několika způsobů uchycování miniaturních vzorků do čelistí byly také studovány.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

MTS Tytron 250, tahové zkoušky subtilních vzorků, Al vlákna, nylonová vlákna, Al fólie

## **ABSTRACT**

A testing system MTS Tytron 250 with an original construction was bought at the Institute of Physics of Materials, AVCR v.v.i. The main aim of this diploma thesis was to obtain experiences with the controlling of the system and with its advantages and limitations. The tensile tests were performed on Al fibres with diameters of 125  $\mu\text{m}$ , 180  $\mu\text{m}$  and 500  $\mu\text{m}$ , nylon fibres of 250  $\mu\text{m}$  and 500  $\mu\text{m}$  and tensile and cyclic tests on Al foil of 77  $\mu\text{m}$  in thickness. It was found that the machine is suitable for testing of either subtle specimens with low loading forces or specimens with low stiffness as e.g. polymers or very long metallic or ceramic fibres. On the other side, the Tytron system is not able to perform tests on specimens with a high stiffness and high loading forces. Material parameters were determined with a high reproducibility. Advantages and limitations of several types of subtle specimen's fixation into the grips were studied too.

## **KEY WORDS**

MTS Tytron 250, tensile tests of subtle specimens, Al fibres, nylon fibres, Al foils

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠTĚRBÁČEK, J. *Tahové a únavové zkoušky tenkých vláken a fólií*. Brno, 2008. 89 s. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Ústavu materiálových věd a inženýrství. Vedoucí diplomové práce Mgr. Tomáš Kruml, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně dle pokynů školitele a všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FSI VUT v Brně.

V Brně 23. 5. 2008

.....  
Jaroslav Štěrbáček

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval svému školiteli Mgr. Tomáši Krumlovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady při řešení diplomové práce. Děkuji také všem pracovníkům Ústavu fyziky materiálů Akademie věd ČR, kteří mi pomohli při experimentální práci. Zvláštní poděkování patří celé rodině za morální podporu v průběhu studia.

## OBSAH

<b>1. ÚVOD A CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</b>	<b>1</b>
<b>2. LITERÁRNÍ REŠERŠE</b>	<b>2</b>
2.1. ÚVOD	2
2.2. ZKOUŠKA TAHEM	2
2.2.1. Zkušební tyče	2
2.2.2. Smluvní diagram napětí – deformace	3
2.2.3. Určení smluvní meze pevnosti	4
2.2.4. Určení smluvní meze kluzu	4
2.2.5. Určení deformačních charakteristik	5
2.2.6. Diagram skutečné napětí – skutečná deformace	6
2.2.7. Tahové zkoušky plastů	7
2.2.8. Příloha A (informativní) normy ČSN EN ISO 527-1	9
2.3. ÚNAVA MATERIÁLU	10
2.3.1. Úvod	10
2.3.2. Základní charakteristiky cyklické plastické deformace	11
2.3.3. Změna mechanických vlastností: zpevnění, změkčení	12
2.3.4. Vývoj dislokační struktury	14
2.3.5. Lokalizace plastické deformace	16
2.3.6. Vytvoření povrchového reliéfu	17
2.3.7. Nukleace trhlin	19
2.3.8. Interakce mezi trhlinami	20
2.3.9. Šíření krátkých trhlin	21
2.3.10. Šíření dlouhých trhlin, iniciace magistrální trhliny a lom	21
2.4. TYPY ZATĚŽOVACÍCH ZKUŠEBNÍCH STROJŮ	24
2.4.1. Elektromechanické zkušební stroje	24
2.4.2. Elektrohydraulické (servo-hydraulické) zkušební stroje	25
2.5. MONOTÓNÍ A CYKlickÉ TESTOVÁNÍ VYSOCE PEVNÝCH KERAMICKÝCH VLÁKEN	27
2.5.1. Úvod	27
2.5.2. Testovaný materiál a jeho využití	27
2.5.3. Příprava zkušebních vzorků a parametry zkoušek	27
2.5.4. Fraktografická analýzy lomových ploch	30
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>32</b>
3.1. TESTOVANÉ MATERIÁLY	32
3.1.1. Al vlákna vyrobená protahováním	32
3.1.2. Al vlákna připravená replikační technikou	32
3.1.2.1. Úvod	32
3.1.2.2. Příprava kulovitých NaCl částic	32
3.1.2.3. Výroba kovové pěny	34
3.1.3. Nylonová vlákna	36
3.1.4. Al fólie	36



3.2. STROJ MTS TYTRON 250 – POPIS VÝROBCE	37
3.2.1. Úvod	37
3.2.2. Části testovacího systému Tytron 250	38
3.2.3. Technické parametry testovacího stroje MTS Tytron 250	41
3.2.4. Možnosti využití MTS Tytonu 250	42
3.2.5. Příslušenství	43
3.3. PŘEHLED TESTOVANÝCH VZORKŮ	44
3.4. ZPŮSOBY UPÍNÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	45
3.4.1. Upínání tenkých vláken pomocí epoxidového lepidla	45
3.4.2. Upínání tenkých vláken pomocí Belzony®	47
3.4.3. Příprava zkušebních vzorků z Al fólií o tloušťce 0,077 mm	48
3.4.3.1. Stříhané pásy	48
3.4.3.2. H – vzorky	49
3.4.3.3. R20 – vzorky	50
3.5. POSTUP PROVÁDĚNÍ EXPERIMENTU	51
3.5.1. Al vlákna uchycená pomocí epoxidu nebo Belzony	51
3.5.2. Vlákna upnutá pomocí brusného papíru	52
3.5.3. Vzorky z Al fólií	53
<b>4. VÝSLEDKY</b>	<b>54</b>
4.1. Al vlákna o průměru 125 μm (tažené)	54
4.2. Al vlákna o průměru 500 μm (tažené)	56
4.3. Al vlákna o průměru 180 μm (infiltrace do NaCl)	58
4.4. Nylonová vlákna o průměru 250 μm	64
4.5. Nylonová vlákna o průměru 500 μm	69
4.6. Al fólie 77 μm H-typ	72
4.6.1. Tahové zkoušky	72
4.6.2. Cyklické zatěžování	75
<b>5. DISKUSE</b>	<b>80</b>
5.1. ZPŮSOBY UPÍNÁNÍ VZORKŮ, JEJICH VÝHODY A NEVÝHODY	80
5.1.1. Vlákna uchycená pomocí epoxidového lepidla	80
5.1.2. Vlákna uchycená pomocí Belzony	80
5.1.3. Vlákna uchycená pomocí brusného papíru	82
5.1.4. Uchycení Al fólií	82
5.2. ZKUŠENOSTI S CHOVÁNÍM STROJE MTS TYTRON 250	84
5.2.1. Volba vhodného PID	84
5.2.2. Záškub při zapnutí motoru testovacího stroje	85
5.2.3. Problémy během experimentu	85
5.2.4. Vzorky R20 a havárie stroje	86
5.2.5. Shrnutí našich zkušeností se strojem MTS Tytron 250	87
<b>6. ZÁVĚR</b>	<b>88</b>
<b>7. LITERATURA</b>	<b>89</b>



# 1. ÚVOD A CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Motivací pro vypsání tématu této diplomové práce bylo zakoupení ve své kategorii zcela unikátního testovacího stroje MTS Tytron 250 na Ústav fyziky materiálu AV ČR. Jde o zkušební stroj, jehož zatěžovací člen se pohybuje na vzduchovém polštáři, tj. bez tření, určený k testování subtilních vzorků za použití malých zátěžných sil (max. 250 N). Cílem práce bylo získat zkušenosti s ovládním tohoto zkušebního stroje a pomocí tahových a únavových testů různých druhů materiálů a vzorků různých velikostí, zjistit rozsah jeho testovacích možností. K tomuto účelu byly získány miniaturní vzorky v podobě hliníkových a nylonových vláken o různých průměrech a tenké hliníkové fólie určené zejména pro únavové zkoušky. Provedením zkoušek na odlišných typech zkušebních vzorků je možné pozorovat a hodnotit chování zkušebního stroje MTS Tytron 250 v závislosti na tvaru, rozměrech a druhu materiálu těchto testovaných vzorků. Druhým, stejně důležitým cílem bylo změření materiálových charakteristik pro zkoumané materiály, které pro jejich miniaturní rozměry nebylo možné testovat na standardních zatěžovacích strojích.

## **Cíle diplomové práce:**

1. navrhnout a otestovat způsoby výroby vzorků z Al fólií
2. vyzkoušet různé možnosti uchycení vzorků z vláken i fólií do čelistí stroje
3. provést tahové a únavové zkoušky na stroji MTS Tytron, ověřit reproduktibilitu měření
4. provést systematické měření únavových vlastností Al fólií určených pro výrobu chladících jednotek v mřížovém cyklu

## 2. LITERÁRNÍ REŠERŠE

### 2.1. ÚVOD

V této kapitole je zpracována rešerše pramenů z literatury. Nejprve je popsána zkouška tahem, s uvedením definic z příslušných norem a popsáním některých mechanismů deformace. Samostatná kapitola je věnována tahové zkoušce plastů, které byly v experimentální části také testovány, protože jak tvar tahových křivek, tak jejich vyhodnocování se podstatně liší od kovových materiálů. Nejpodrobněji je zpracována kapitola o únavě materiálu, neboť jedním z cílů diplomové práce bylo provést únavové zkoušky na Al fóliích. Protože stroj Tytron má originální lineární elektrický motor, v další kapitole je stručně uvedena charakteristika běžných zatěžovacích strojů, abychom mohli srovnat výhody a nevýhody nového principu zatěžovacího stroje. Jako poslední část literární rešerše je uveden jediný článek, který jsme našli v literatuře, kde je stroj Tytron použit pro tahové a únavové zkoušky a ve kterém jsou i stručně popsány zkušenosti s tímto strojem.

### 2.2. ZKOUŠKA TAHEM

Zkouška tahem slouží pro určení mechanických charakteristik daného materiálu při statickém zatížení, které se následně používají k hodnocení jakosti materiálu, při výpočtech konstrukcí nebo k obecnému posouzení vhodnosti pro určité technologické operace. Jedná se o nejpoužívanější zkoušku pro hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiálů. Podstata zkoušky spočívá v deformaci zkušební tyče tahovým zatížením obvykle do přetržení pro stanovení jedné nebo více mechanických vlastností zavedených v normě. Zkouška je normalizovaná, v ČR se řídí národní normou ČSN EN 10 002 [1], která je identická s evropskou normou EN 10002:90.

Testy se provádí na hladkých zkušebních tělesech normalizovaných rozměrů (nejčastěji kruhového nebo obdélníkového průřezu). Zkušební těleso se uchytí do čelistí zkušebního stroje a připevní se na něj průtahoměr. Během zkoušky se zaznamenává závislost působící síly  $F$  (snímané dynamometrem) na prodloužení zkušební tyče (snímané průtahoměrem nebo určené z pohybu příčnicku zkušebního stroje) [2].

#### 2.2.1. Zkušební tyče

Tvar a rozměry zkušebních tyčí závisí na tvaru a rozměrech kovových výrobků, pro které jsou určovány mechanické vlastnosti. Zkušební tyč je obvykle odebrána obráběním vzorku z výrobku; vzorky o stálém příčném průřezu (profily, dráty, tyče) mohou být podrobeny zkoušce bez obrobení.

Zkušební tělesa používané pro dráty, tyče a profily o průměru nebo tloušťce menší než 4mm, je obvykle zhotovena z neobrobené části výrobku. Počáteční měřená délka  $L_0$  musí být  $(200 \pm 2)$  mm, nebo  $(100 \pm 1)$  mm, nebo  $(L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0})$  pro výrobky o průměru 1 mm a větší [3].

Zkušební tyče musí být do zkušebního stroje upnuty vhodným způsobem (pomocí klínů, závitových, osazených nebo hydraulických čelistí) tak, aby zatížení působilo pokud možno v ose zkušební tyče [1].

Pozn.: V následující podkapitole jsou uvedeny pouze pasáže příslušné normy, související s tématem této diplomové práce.

### 2.2.2. Smluvní diagram napětí – deformace

Závislost síla  $F$  – prodloužení  $\Delta L$  je získána během mechanické zkoušky. Z ní se následně určuje závislost smluvní napětí  $R$  – poměrná deformace  $e$ , přičemž jak napětí, tak deformace jsou určeny z okamžitých hodnot síly a prodloužení, vztažených na původní průřez  $S_0$  a na původní měrnou délku  $L_0$  zkušební tělesa:

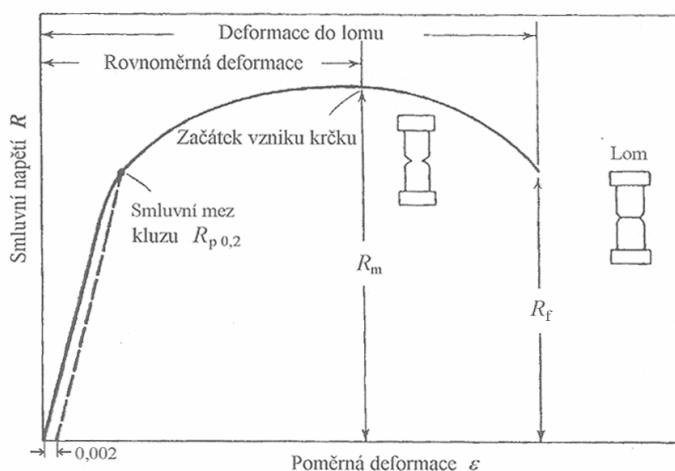
$$\text{smluvní napětí} \quad R = F/S_0 \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

$$\text{poměrná deformace} \quad e = \Delta L/L_0 \quad [-]; \quad e = (\Delta L/L_0)100 \quad [\%] \quad (2)$$

kde  $\Delta L$  vyjadřuje přírůstek délky  $L_0$ , což je možné zapsat i jako  $(L - L_0)$ .

Smluvní diagram  $R - e$  polykrystalického materiálu je schématicky uveden na obr. 1. Počáteční úsek diagramu je přímkový a odpovídá elastické (vratné) deformaci. Tato přímka je popsána Hookeovým zákonem  $R = Ee$ , kde  $E$  je modul pružnosti v tahu materiálu zkušební tyče. Pro spolehlivý výpočet modulu  $E$  je nutné, aby zvětšení snímače byla  $10^{-4}$ ; tj. měření prodloužení s přesností na čtyři platné číslice. Komerčně jsou dostupné snímače deformace s citlivostí až  $10^{-6}$ .

V další části těchto diagramů  $R - e$  dochází k odklonu od přímkové závislosti důsledkem vzniku plastické deformace. Do okamžiku, kdy  $R$  dosáhne maximální hodnoty se měrná část zkušební tělesa deformovala rovnoměrně (docházelo k rovnoměrnému zužování průřezu). Další deformace je provázena poklesem napětí a vznikem krčku na měrné části zkušební tělesa. V praxi se z této závislosti smluvní napětí – poměrná deformace vyhodnocují dvě napěťové materiálové charakteristiky, a to smluvní mez pevnosti a smluvní mez kluzu [2].



Obr. 1. Smluvní diagram napětí – deformace [2]

(Pozn.: symbolem  $\epsilon$  je v této diplomové práci označována skutečná deformace)

### 2.2.3. Určení smluvní meze pevnosti

Smluvní mez pevnosti  $R_m$  je maximální napětí dosažené ve smluvním diagramu napětí – deformace, což je poměr hodnot maximální síly dosažené při zkoušce a původního průřezu zkušebního tělesa

$$R_m = F/S_0 \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

U tvárných materiálů je mez pevnosti stanovena hodnotou smluvního napětí, při němž se začíná na zkušebním tělese vytvářet krček. K lomu tělesa dojde při smluvním napětí  $R_f$  (označovaném jako lomové napětí) až po vzniku krčku. Pokud se zkušební těleso poruší po malé nebo nulové plastické deformaci, potom hodnota  $R_m$  odpovídá napětí v okamžiku lomu  $R_f$  [2].

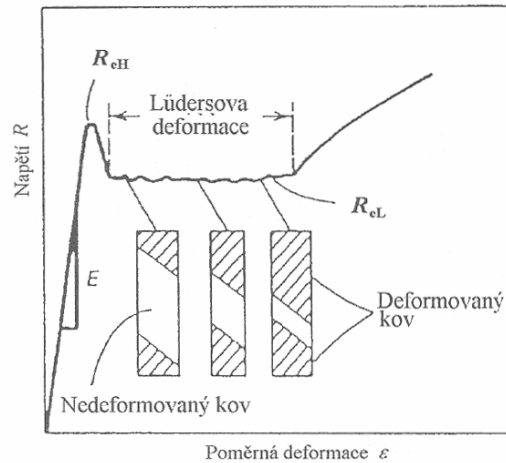
### 2.2.4. Určení smluvní meze kluzu

Mez kluzu je napětí, při němž začíná vznikat plastická (trvalá) deformace. Nelze však za tuto hodnotu považovat napětí odpovídající odklonu závislosti od přímky, jak znázorňuje obr. 1, neboť jednak by byla závislá na citlivosti snímače prodloužení a jednak existují i materiály (např. čistá vyžíhaná měď nebo šedá litina), které v diagramu napětí – deformace nemají prakticky žádnou lineární závislost. Proto je zavedena smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ , což je napětí, jenž vyvolá plastickou deformaci o velikosti  $e_p = 0,002$  (0,2 %). Na ose poměrných deformací je vyznačena hodnota deformace 0,2 %. Tímto bodem je vedena rovnoběžka s přímkovou částí tahového diagramu (viz. obr. 1). Bod, v němž rovnoběžka protne závislost  $R - e$ , odpovídá napětí smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$ . Je nutné si uvědomit, že celková deformace  $e_t$  zkušebního tělesa při napětí  $R_{p0,2}$  je dána součtem deformace elastické  $e_t = R_{p0,2}/E$  a deformace plastické  $e_p = 0,002$ . I v tomto případě lépe při měření tahového diagramu použít snímač prodloužení. Oproti měření modulu pružnosti  $E$ , však může být citlivost tohoto snímače o řád nižší, tedy  $10^{-3}$ .

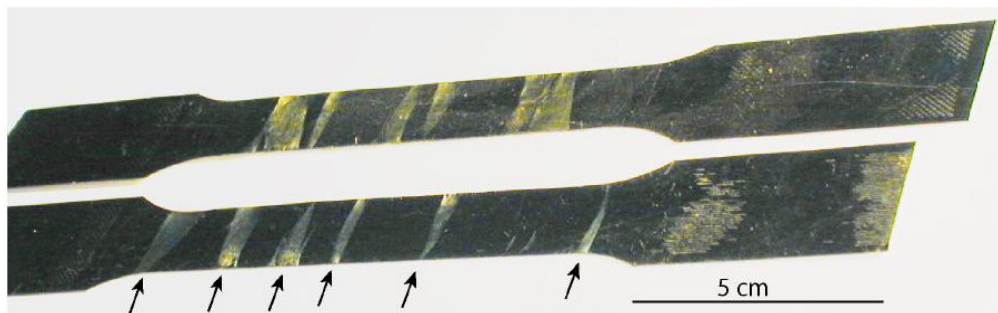
Existují také materiály, které se vyznačují charakteristickým tvarem tahového diagramu v oblasti meze kluzu. Schéma takového diagramu je uvedeno na obr. 2. Typickým představitelem jsou nízkouhlíkové vyžíhané oceli, v jejichž struktuře jsou dislokace uchyceny atomy uhlíku příp. dusíku, což způsobí, že proces vzniku plastické deformace je velice heterogenní. Pro počáteční pohyb nebo vznik nových dislokací je třeba mnohem vyšší napětí, než pro jejich samotný pohyb. Uvolnění dislokací z oblasti vysoké koncentrace intersticiálních atomů (tzv. Cottrellova atmosféra) se v diagramu napětí – deformace projevuje výrazným maximem právě v oblasti přechodu z elastické do elasticko-plastické deformace. Napětí, které této nespojitosti odpovídá se označuje jako výrazná mez kluzu  $R_e$ .

Na konci přímkové části diagramu napětí – deformace dochází k výraznému poklesu napětí, které souvisí s rozšířením plastické deformace v úzkém pásu, přes celý nosný průřez zkušebního tělesa. Nejvyšší hodnota napětí v této části diagramu se nazývá horní mez kluzu a označuje se symbolem  $R_{eH}$ . Napětí z ní poklesne až na hodnotu označovanou  $R_{eL}$ , která se nazývá dolní mez kluzu. Při této hodnotě napětí se skluzové pásy postupně rozšiřují přes celou měrnou délku zkušebního tělesa. Během další deformace se objevují oscilace napětí kolem určité konstantní hodnoty. Toto stádium se označuje pojmem Lüdersova deformace a postupně se rozšiřující pásy s plastickou deformací se nazývají Lüdersovy pásy (viz. obr. 3) [2, 4].

Hodnota  $R_{eH}$  je výrazně závislá na tvaru vzorku a přesnosti zkušebního stroje, proto je problematické ji uvažovat jako materiálovou konstantu. Naproti tomu dolní mez kluzu  $R_{eL}$  nezávisí ani na tvaru vzorku ani na typu zkušebního stroje, a proto je možné tuto hodnotu považovat za skutečnou materiálovou konstantu [5].



Obr. 2. Typický tvar tahového diagramu typický pro nízkouhlíkovou ocel [2]  
(Pozn.: symbolem  $\varepsilon$  je v této diplomové práci označována skutečná deformace)



Obr. 3. Lüdersovy pásy. Tenké ploché vzorky z nízkouhlíkové oceli, deformované malou plastickou deformací [4]

### 2.2.5. Určení deformačních charakteristik

Další deformační charakteristiky se označují tažnost  $A$  [%] a zúžení  $Z$  [%]. Jsou to rovněž materiálové charakteristiky, ale narozdíl od smluvní meze pevnosti a meze kluzu se neurčují ze záznamu síla – prodloužení, ale pouze na základě rozměrů zkušebních těles před a po zkoušce. Před zkouškou je na rovnoměrné části zkušebního tělesa vyznačena ryskami vzdálenost  $L_0$ . Po přetržení jsou obě části vzorku přiloženy lomovými plochami těsně k sobě a změřena vzdálenost rysek  $L_u$  a průřez vzorku  $S_u$  v místě lomu. Deformační charakteristiky se vypočítají ze vztahů:

$$A = 100(L_u - L_0)/L_0 \quad [\%]$$

(4)

$$Z = 100(S_0 - S_u)/S_0 \quad [\%]$$

(5)

Měření hodnot  $A$  i  $Z$  je prováděno na přetržených, tj. nezatížených zkušebních tělesech, proto souvisí pouze s plastickou deformací zkušebních těles [2].

## 2.2.6. Diagram skutečné napětí – skutečná deformace

Smluvní napětí  $R$  a poměrnou deformaci  $e$  je možné použít jen v případě malých deformací, kdy změny zkušebních těles jsou malé. V ostatních případech je nutné pracovat s diagramem skutečné napětí  $\sigma$  – skutečná deformace  $\varepsilon$ .

Skutečné napětí je definováno podílem síly  $F$  a okamžitého průřezu  $S$

$$\sigma = F/S \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

Vztah mezi smluvním napětím a skutečným napětím je následující

$$\sigma = R(S_0/S) \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

Skutečná deformace se vypočítá podle vztahu

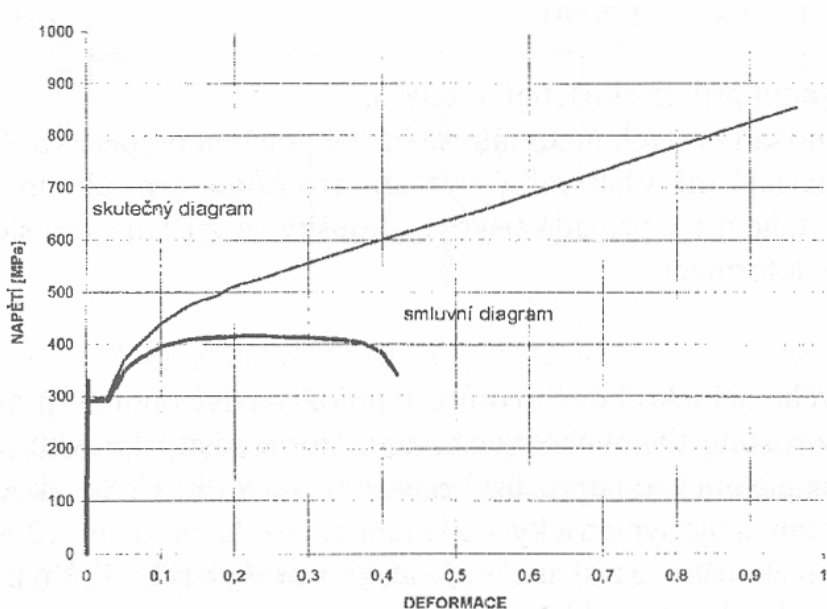
$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (8)$$

kde,  $L = L_0 + \Delta L$  je konečná délka zkušebního tělesa.

Vztah mezi poměrnou deformací a skutečnou deformací je následující

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (9)$$

Skutečný tahový diagram na rozdíl od smluvního diagramu monotónně roste. Nejvyšší napětí v tomto diagramu je skutečné napětí v okamžiku lomu (viz. obr. 4) [2].



Obr. 4. Porovnání smluvního a skutečného tahového diagramu [2]



## 2.2.7. Tahové zkoušky plastů

Tahové zkoušky polymerních materiálů jsou rovněž normalizované dle české technické normy ČSN EN ISO 527 [6]. V případě záznamu tahových zkoušek polymerních materiálů se však vyskytují jisté odlišnosti zejména v názvosloví určovaných veličin v porovnání s vyhodnocováním tahových zkoušek kovových materiálů. Za všechny zmiňme pojem tažnost, jenž je u kovů určována výpočtem založeným na trvalé deformaci, zatímco v případě plastů je deformace závislá na čase, zavádí se proto pojem prodloužení při přetržení který zahrnuje deformace pružné i trvalé [7]. Pro přehlednost jsou definice používané u polymerních materiálů uvedeny v následující části.

### **Definice určovaných veličin při tahové zkoušce polymerů dle normy ISO 527 [6]:**

- **napětí na mezi kluzu v tahu; mez kluzu  $\sigma_y$  [MPa]** ... první hodnota napětí, při které dochází ke zvyšování protažení bez zvyšování napětí. Toto napětí může být nižší, než maximální napětí během zkoušky (viz. obr. 5, křivky **b** a **c**).
- **napětí v tahu při přetržení  $\sigma_B$  [MPa]** ... napětí v tahu, při kterém dochází k přetržení zkušebního tělesa (viz. obr. 5).
- **mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$  [MPa]** ... maximální napětí v tahu působící na zkušební těleso během zkoušky
- **napětí v tahu při  $x$  %-ním poměrném prodloužení  $\sigma_x$  [MPa]** ... napětí, při kterém poměrné prodloužení dosáhne zadané hodnoty  $x$ , uvedené v procentech. Tento parametr lze měřit např. v případě, kdy křivka napětí – poměrné prodloužení nevykazuje mez kluzu (viz. obr. 5, křivka **d**). V takovém případě hodnota  $x$  může být dána příslušnou předmětovou normou, nebo dohodnuta mezi zainteresovanými stranami. V každém případě však hodnota  $x$  musí být nižší než hodnota poměrného prodloužení odpovídající mezi pevnosti v tahu.
- **poměrné prodloužení  $\varepsilon$  [-] nebo [%]** ... zvětšení délky vztažené na počáteční měrnou délku. Používá se pro poměrné prodloužení do meze kluzu.

$$\varepsilon = \Delta L_0 / L_0 \quad [-]; \quad \varepsilon = (\Delta L_0 / L_0) 100 \quad [%] \quad (10)$$

kde:  $L_0$  [mm] je počáteční měrná délka zkušebního tělesa,

$\Delta L_0$  [mm] je zvětšení délky zkušebního tělesa mezi značkami vyznačujícími počáteční měrnou délku.

- **poměrné prodloužení na mezi kluzu  $\varepsilon_y$  [-] nebo [%]** ... poměrné prodloužení odpovídající napětí na mezi kluzu (viz. obr. 5, křivky **b** a **c**).
- **poměrné prodloužení při přetržení  $\varepsilon_B$  [-] nebo [%]** ... poměrné prodloužení při odpovídajícím napětí v tahu při přetržení, jestliže dojde k přetržení bez meze kluzu (viz. obr. 5, křivky **a** a **d**).
- **poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu  $\varepsilon_M$  [-] nebo [%]** ... poměrné prodloužení odpovídající mezi pevnosti v tahu, v případě, je-li této meze pevnosti dosaženo bez meze kluzu (viz. obr. 5, křivky **a** a **d**) nebo na mezi kluzu.

- **jmenovité poměrné prodloužení**  $\varepsilon_t$  [-] nebo [%] ... zvětšení délky vztažené na jednotku původní vzdálenosti mezi čelistmi (velikost oddálení čelistí). Používá se pro hodnoty poměrného prodloužení za mezí kluzu. Představuje celkové relativní poměrné prodloužení, ke kterému dojde podél volné délky zkušební tělesa (tj. ve vzdálenosti mezi čelistmi).

$$\varepsilon_t = \Delta L/L \quad [-]; \quad \varepsilon_t = (\Delta L/L)100 \quad [%] \quad (11)$$

kde: L [mm] je počáteční vzdálenost mezi čelistmi,  
 $\Delta L$  [mm] je zvětšení vzdálenosti mezi čelistmi.

- **jmenovité poměrné prodloužení při přetržení**  $\varepsilon_{tB}$  [-] nebo [%] ... jmenovité poměrné prodloužení odpovídající napětí při přetržení, dochází-li k přetržení zkušební tělesa za mezí kluzu (viz. obr. 5, křivky **b** a **c**).

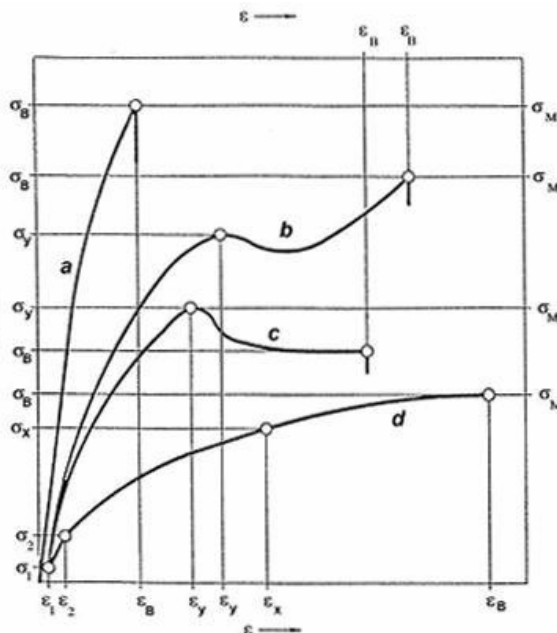
- **jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu**  $\varepsilon_{tM}$  [-] nebo [%] ... jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu, pokud se tento bod nachází za mezí kluzu (viz. obr. 5, křivky **b**).

- **modul pružnosti v tahu**  $E_t$  [MPa] ... poměr rozdílu napětí  $\sigma_2$  minus  $\sigma_1$  a odpovídajícího rozdílu poměrného prodloužení  $\varepsilon_2 = 0,0025$  minus  $\varepsilon_1 = 0,0005$  (viz. obr. 5, křivka **d**).

$$E_t = (\sigma_2 - \sigma_1)/(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad [\text{MPa}] \quad (12)$$

kde:  $\sigma_1$  [MPa] je smluvní napětí naměřené při hodnotě poměrného prodloužení  $\varepsilon_1 = 0,0005$ ;  
 $\sigma_2$  [MPa] je smluvní napětí naměřené při hodnotě poměrného prodloužení  $\varepsilon_2 = 0,0025$ .

Pozn.: Modul pružnosti v tahu  $E_t$  může být rovněž stanoven lineární regresní analýzou uplatněnou na část křivky, nacházející se mezi těmito dvěma uvedenými body.



Obr. 5. Základní typy tahových diagramů polymerů (pozor na odlišné použití symbolů  $\sigma$  a  $\varepsilon$ , viz text) [6]

křivka **a** ... křehké materiály  
 křivka **b** a **c** ... houževnaté materiály s mezí kluzu  
 křivka **d** ... houževnaté materiály bez meze kluzu

### 2.2.8. Příloha A (informativní) normy ČSN EN ISO 527-1

Vzhledem k viskoelastickému chování polymerních materiálů většina jejich vlastností závisí nejen na teplotě, ale také na čase. U tahových vlastností způsobuje uvedený jev nelineární průběh křivek napětí – poměrné prodloužení dokonce i v oblasti viskoelasticity. Tento efekt je zřejmý v případě houževnatých polymerů. V důsledku toho hodnoty tangenciálního modulu houževnatých materiálů určené z počáteční části křivek napětí – poměrné prodloužení velmi závisí na použitém měřítku os. Tato konvenční metoda (tangenta k počátečnímu bodu křivky napětí – poměrné prodloužení) nedává u těchto materiálů spolehlivé hodnoty modulů.

Proto metoda měření modulu pružnosti v tahu, popsaná v normě ISO 527, vychází ze dvou daných hodnot poměrného prodloužení, tj. 0,25 a 0,05 %. (Nižší z hodnot poměrného prodloužení nebyla zvolena na nule, aby byly eliminovány chyby při měření modulu, způsobené možnými náběhovými efekty křivky napětí – poměrné prodloužení).

V případě křehkých polymerů, obě metody stanovení modulu pružnosti, jak nová, tak konvenční, poskytují stejné hodnoty. Nová metoda však poskytuje přesnější a reprodukovatelnější měření modulů u houževnatých plastů. Proto bylo stanovení počátečního tangenciálního modulu z normy ČSN EN ISO 527-1 vyloučeno.

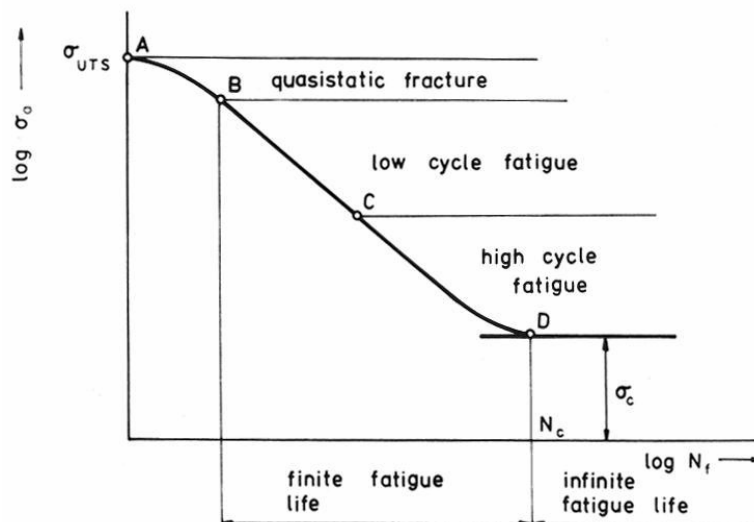
Důvody uvedené výše se podobně týkají „smluvní meze kluzu“, která byla v ISO/R 527 definována z důvodů odchylek křivek napětí – poměrné prodloužení v počáteční fázi od nelinearity. Smluvní mez kluzu je modifikována na bod smluvního prodloužení (napětí při  $x$  % poměrného prodloužení). Tato definice nahrazuje mez kluzu významově pouze pro houževnaté materiály; zadaná deformace může být vybrána blíže obecně hledanému protažení na mezi kluzu.

## 2.3. ÚNAVA MATERIÁLU

### 2.3.1. Úvod

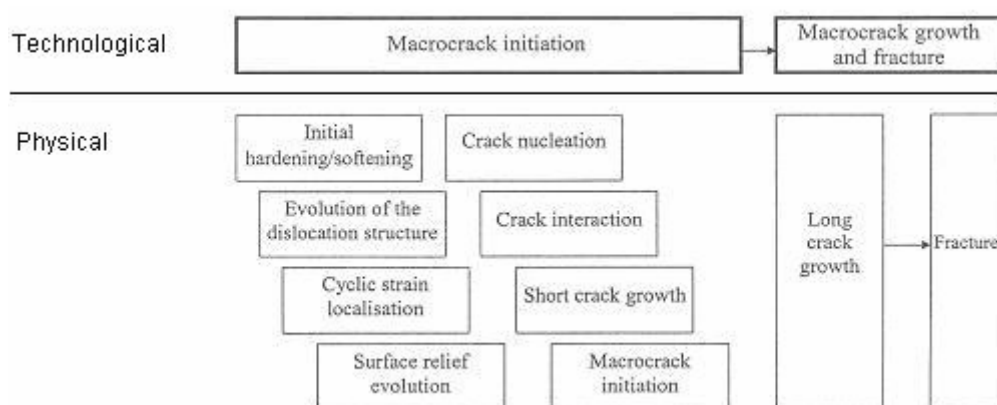
Pod pojmem únava materiálu rozumíme souhrn degradačních procesů probíhajících v materiálu pod účinkem časově proměnných vnějších sil. Závisí na druhu materiálu, konstrukci a provozních parametrech. Je to děj postupný, nevratný a mající kumulativní charakter, tj. roste s počtem zátěžných cyklů. Zároveň jde o děj degradační, neboť procesy, které při něm probíhají vedou v závěru ke vzniku únavové trhliny a následnému únavovému lomu. Při únavovém procesu dochází ke změnám mechanických vlastností v důsledku opakovaného působení napětí a deformace. Přitom maximální velikost těchto napětí bývá menší než mez pevnosti a ve většině případů dokonce menší než mez kluzu [2, 8].

Tento jev byl znám již koncem 19. stol. První systematické experimenty prováděl železniční inženýr August Wöhler v letech 1852-1870, kdy zkoumal problematiku lomů os železničních vagónů. Na základě těchto experimentů sestavil závislost počtu cyklů do lomu  $N_f$  na amplitudě napětí  $\sigma_a$  (při určité hodnotě středního napětí  $\sigma_m$ ), která se nazývá Wöhlerova křivka (obr. 6), a která je dodnes jednou ze základních únavových křivek. S rozvojem průmyslu a techniky však souvisel také narůstající výskyt součástí poškozených únavovým lomem [8]. Za všechny případy zmiňme sérii nehod prvního tryskového dopravního letounu de Havilland Comet 1 [9]. V tomto případě sehrál svou roli kromě samotného proměnného zatěžování také vliv tvaru součástí. Z ostrých rohů palubních okének, které působily jako koncentrátoři napětí, se šířily únavové trhliny. Rozdílem tlaků uvnitř a vně letounu došlo k roztržení trupu a následnému pádu stroje. Tyto a řada dalších havárií vedly k důkladnému studiu únavového procesu. Cílem bylo pochopit zákonitosti tohoto degradačního děje. Jestliže tyto zákonitosti jsou známy, potom je možné např. provádět záměrné zásahy do struktury s cílem zvýšit odpor daného materiálu vůči únavovému lomu, vytvářet modely na kvantitativní popis procesu kumulativního poškození a v neposlední řadě predikovat životnosti cyklicky namáhaných součástí [8, 10].



Obr. 6. Wöhlerova křivka [11]

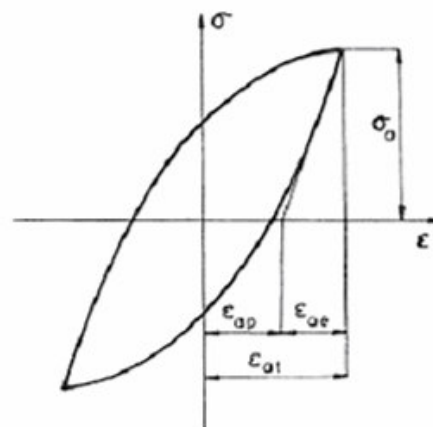
Schéma uvedené na obr. 7 ukazuje dva možné způsoby, jak pohlížet na proces únavového poškození: z hlediska technologické praxe a s přihlédnutím k detailním fyzikálním mechanismům. Technologické hledisko člení tento proces pouze na dvě stádia. V prvním z nich, které pokrývá velkou většinu únavového života, je vzorek zdánlivě nepoškozen. Toto stádium končí detekcí únavové makrotrhliny o délce typicky 1 mm. Ve druhém stádiu dochází k jejímu růstu a finálnímu lomu. Naproti tomu fyzikální hledisko rozčleňuje proces iniciace makrotrhliny na nejméně osm stádií. Jsou to: počáteční cyklické zpevnění nebo změkčení, vývoj dislokační struktury, lokalizace plastické deformace, vznik a vývoj povrchového reliéfu, nukleace únavových trhlin, interakce mezi jednotlivými trhlinami a stádium šíření krátkých trhlin. Šířením a spojováním krátkých trhlin dochází ke vzniku makrotrhliny. Po něm následuje růst této dlouhé trhliny a lom součásti. Mezi jednotlivými stádii neexistují přesně definované hranice, neboť mezi nimi dochází k určitému vzájemnému překryvu. V následujících podkapitolách budou jednotlivá stádia podrobněji popsána.



Obr. 7. Možné dělení procesu kumulativního únavového poškození [12]

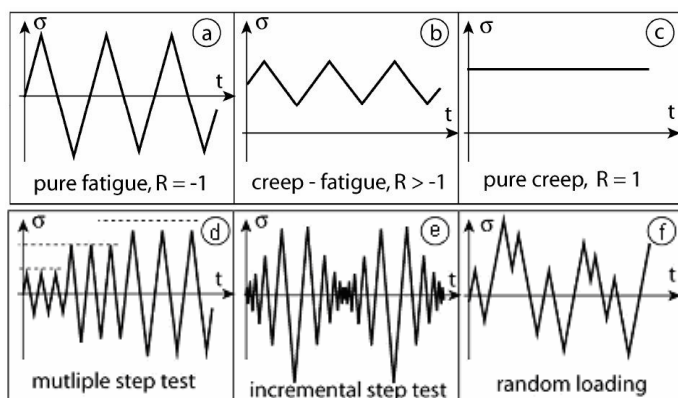
### 2.3.2. Základní charakteristiky cyklické plastické deformace

Závislost napětí a deformace v jednom cyklu znázorňuje hysterezní smyčka. Její schéma je uvedeno na obr. 8, kde  $\sigma_a$  je amplituda napětí,  $\epsilon_{at}$  je amplituda celkové deformace,  $\epsilon_{ae}$  je amplituda elastické deformace a  $\epsilon_{ap}$  je amplituda plastické deformace [10].



Obr. 8. Schématicky znázorněná hysterezní smyčka [10]

Existuje několik druhů cyklického zatěžování. Veličina, která je při cyklickém zatěžování řízena, může být amplituda napětí  $\sigma_a$  (nejčastěji se tento přístup používá v průmyslové praxi) nebo amplituda celkové deformace  $\varepsilon_{at}$ , případně amplituda plastické deformace  $\varepsilon_{ap}$  (v materiálovém výzkumu) [10]. Na obr. 9 jsou uvedeny příklady možných typů zátěžných cyklů pro případ, kdy je řízena amplituda napětí  $\sigma_a$ . Varianta a) znázorňuje střídavý symetrický průběh zatěžování, označovaný jako čistá únava, varianta b) je pulzující zatěžování tah-tah nazývané creep – únava a v případě c) se jedná o čistý creep při konstantní hodnotě napětí v průběhu času. U každého z těchto typů zatěžování je současně uvedena i velikost parametru asymetrie R, který se vypočítá jako podíl minimální hodnoty napětí  $\sigma_{min}$  a maximální hodnoty napětí  $\sigma_{max}$  v průběhu zátěžného cyklu, tedy  $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$  [12]. Existují však i zatěžování, u nichž v průběhu času dochází ke změnám amplitudy napětí  $\sigma_a$ . Obrázek d) znázorňuje více-krokové zatěžování, kdy ke změně amplitudy napětí dochází po určitých zátěžných blocích. Varianta e) znázorňuje přírůstkový zatěžovací režim a v případě c) jde o náhodný průběh zatížení. Poslední uvedený způsob je typický např. u testování podvozků letadel nebo automobilů. Na podvozek letounu jsou připevněny senzory, které snímající reálné zatěžování, jemuž je podvozek vystaven např. během přistání. Poté je stroj umístěn na stacionární stanoviště, kde je v určitém počtu toto přistání simulováno a kde je podvozek zatěžován na základě vyhodnocených dat naměřených senzory.



Obr. 9. Možné varianty zátěžných cyklů [4]

### 2.3.3. Změna mechanických vlastností: zpevnění, změkčení

První stádium fyzikálního pohledu je označované jako počáteční zpevnění popř. změkčení. Probíhají v něm změny mechanických charakteristik zatěžovaného materiálu, které charakterizují odpor tohoto materiálu proti plastické deformaci vyvolané vnějšími silami. Může docházet ke zpevňování cyklicky zatěžovaného materiálu, projevující se růstem pevnostních charakteristik anebo ke změkčování, kdy dochází naopak k jejich poklesu. Změny mají typicky, i když ne vždy, saturační charakter, tzn. že nejintenzivněji probíhají na začátku zatěžování, s přibývajícím počtem cyklů intenzita těchto změn klesá, až se po jistém počtu cyklů ustálí na určité hodnotě. Měřená veličina dosáhne nasycené (saturované) hodnoty, popřípadě dochází jen k minimálním změnám této měřené veličiny [10].

Změny mechanických vlastností způsobují dislokace, respektive jejich vzájemné interakce nebo interakce dislokací s jinými překážkami jako jsou např. precipitáty. Cyklické zpevnění se realizuje např. tvorbou dislokačního lesa, tvorbou dipólů a multipólů transformujících následně do dislokačních stěn.

U materiálů žháných dochází typicky k cyklickému zpevnění, které má výrazně saturační charakter. Naproti tomu změkčení je obvyklé při zatěžování pod mezí kluzu materiálů zpevněných např. tvářením za studena, precipitačně popř. příměsovými atomy.

Dislokace, lineární strukturní poruchy krystalové mřížky, obsahuje každý kovový materiál již ve výchozím stavu a zároveň se jejich hustota mění v průběhu cyklické plastické deformace. Proto platí, že únavové zpevnění nebo změkčení je jednak funkcí původního stavu materiálu a jednak způsobu zatěžování [10].

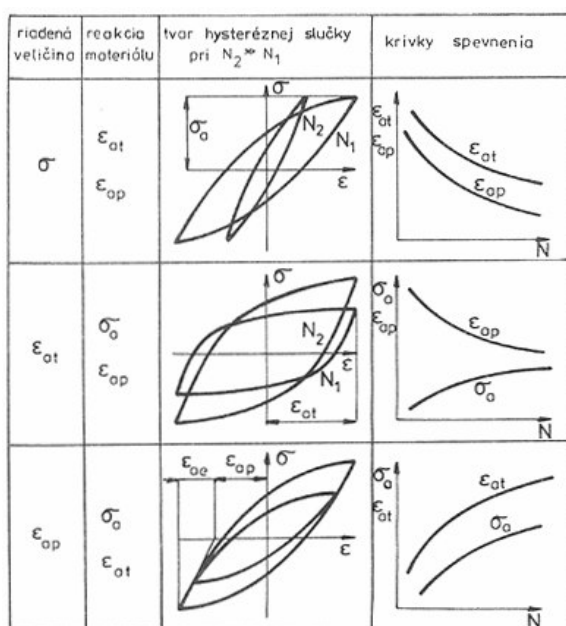
Tím, že změny mechanických vlastností charakterizují odpor zatěžovaného materiálu proti plastické deformaci, jsou důležité pro popis samotného únavového děje. Nejvýhodnější charakteristika změn mechanických vlastností je hysterzezní smyčka (viz. obr. 8). Na obr. 10 jsou uvedeny změny mechanických vlastností při cyklickém zpevňování. Z obrázku vyplývá, že se tvar a plocha hysterzezní smyčky v průběhu zatěžování mění. Různým amplitudám zatěžování odpovídají různé hysterzezní smyčky, viz obr. 11. Proložíme-li vrcholovými body saturovaných hysterzezních smyček křivku, dostaneme závislost mezi amplitudou napětí a amplitudou plastické deformace v saturovaném stavu (často se také používají hodnoty  $\sigma_a$  a  $\epsilon_{ap}$  v polovině života). Tato křivka se v literatuře označuje jako cyklická křivka napětí-deformace nebo také cyklická deformační křivka. Je to významná únavová charakteristika popisující cyklické plastické deformační vlastnosti materiálu po dobu jeho převážné životnosti. Platí, jak pro nízkocyklovou, tak i pro vysokocyklovou oblast zatěžování. Porovnáme-li tuto křivku s tahovým diagramem (tedy s křivkou statického zatěžování), viz. ilustrační obr. 12, získáme představu, zda zkoumaný materiál cyklicky zpevňuje nebo změkčuje. Průběh cyklické deformační křivky lze pro potřeby inženýrské praxe popsat touto mocninou funkcí:

$$\sigma_a = k(\epsilon_{ap})^n \quad (13)$$

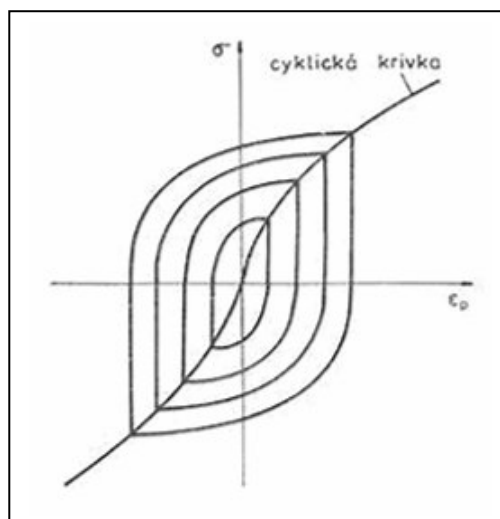
kde:  $k$  je součinitel cyklické pevnosti

$n$  je součinitel cyklického zpevnění.

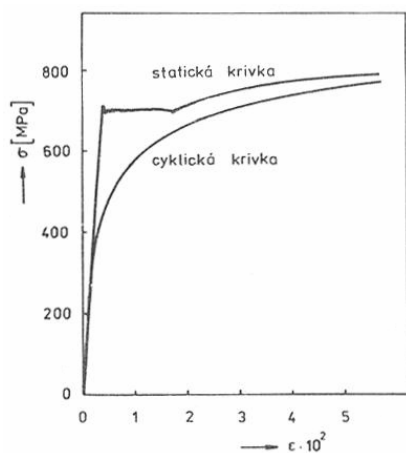
Křivky zpevnění, hysterzezní smyčka a cyklická deformační křivka závisí na teplotě a rychlosti deformace. Čím je nižší teplota a čím vyšší je rychlost deformace, tím vyšší je saturovaná amplituda napětí při dané amplitudě deformace. Tato skutečnost platí jak pro kovy s bcc (kubickou prostorově centrovanou) mřížkou, tak pro kovy s krystalovou mřížkou typu fcc (kubickou plošně centrovanou).



Obr. 10. Průběh cyklického zpevňování při volbě řízené veličiny



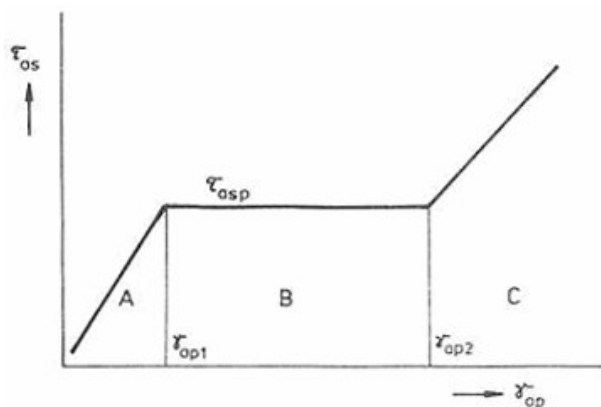
Obr. 11. Definice cyklické deformační křivky



Obr. 12. Srovnání cyklické deformační křivky se záznamem tahové zkoušky

### 2.3.4. Vývoj dislokační struktury

V průběhu cyklického zatěžování dochází k vývoji dislokační struktury působením vnějšího zatížení. Tento vývoj je možné popsat pomocí cyklické deformační křivky, jejíž schéma je uvedeno na obr. 13. Je to závislost amplitudy saturovaného napětí  $\tau_{as}$  na amplitudě deformace  $\gamma_{ap}$ . Průběh této křivky byl naměřen na monokrystalech kovů s fcc (kubickou plošně centrovanou) mřížkou a je typický pro mnoho kovů a slitin jako Cu, Ni a Ag. Je to znázornění napěťové reakce v saturovaném stavu, určované rovnováhou mezi aplikovaným napětím a spektrem vnitřních napěťových polí, které vznikly interakcí dislokací během procesu cyklického zpevňování. Lze ji rozdělit na tři části, s tím že jednotlivým částem odpovídají různé dislokační struktury.



Obr. 13. Tvar cyklické deformační křivky monokrystalů kovů s fcc mřížkou

#### Oblast A

V této oblasti závisí amplituda smykového napětí  $\tau_{as}$  na amplitudě smykové plasticke deformace  $\gamma_{ap}$ . Pozorováním bylo zjištěno, že proces zpevňování zde probíhá díky tvorbě dislokačních dipólů a smyček. Vezmeme-li v úvahu, že dislokace generované Frankovým-Readovým zdrojem mají různá znaménka a že aplikované napětí mění v každém zatěžovacím cyklu svůj smysl, potom se dislokace různých znamének mohou potkávat v blízkých skluzových rovinách a vytvářet tak velmi stabilní dipólové konfigurace, které jsou kolmé na směr primárního skluzu. Tyto dislokační dipóly a smyčky tvoří protáhlé shluky mezi nimiž jsou oblasti s nízkou hustotou dislokací.



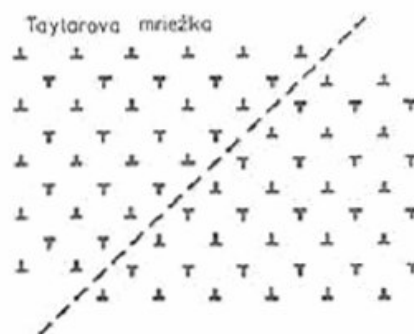
Při dalším cyklickém zatěžování roste hustota dipólů a zároveň roste odpor proti pohybu generovaných dislokací - probíhá proces cyklického zpevnování, o kterém již bylo zmíněno v předchozí kapitole. Výsledkem tohoto procesu je saturace mechanických vlastností a tomuto stavu materiálu odpovídá tzv. žilová struktura, která je prvním stádiem vývoje dislokační struktury cyklicky zatěžovaného materiálu, skládající se z „měkkých“ pásů s nízkou hustotou dislokací a z „tvrdých“ shluků s vysokou hustotou dislokačních dipólů a smyček. Tato dislokační struktura je stabilní jen při nízkých amplitudách plastické deformace, tzn. pro  $\gamma_{ap} < 10^{-4}$ .

#### Oblast B

Při zvyšování amplitudy deformace (amplituda napětí je stejná) se dislokační struktura matrice stává nestabilní, dochází k destrukci shluků dislokačních dipólů a smyček a vytváří se jiná nová struktura, která je schopna přenášet vyšší amplitudy deformace. Žilová struktura transformuje na pásy s tzv. strukturou žebříkovou o tloušťce typicky 1  $\mu\text{m}$ . Podle modelu, který se snaží tento proces popsat, může transformace probíhat takto: Uvažujme Taylorovu mřížku, což je uspořádání dislokačních dipólů reprezentující konfiguraci s minimální potenciální energií vzájemných interakcí, jejíž schéma je uvedeno na obr. 14. Sekundárním skluzem dochází k posuvu o vzdálenost dipólů, tím se do skluzové roviny dostanou dislokace opačných znamének a vzájemně anihilují. Vzniknou tak místa s nižší hustotou dislokací a úzké stěny žebříkové struktury, které mají až dvakrát vyšší hustotu dislokací než okolní matrice.

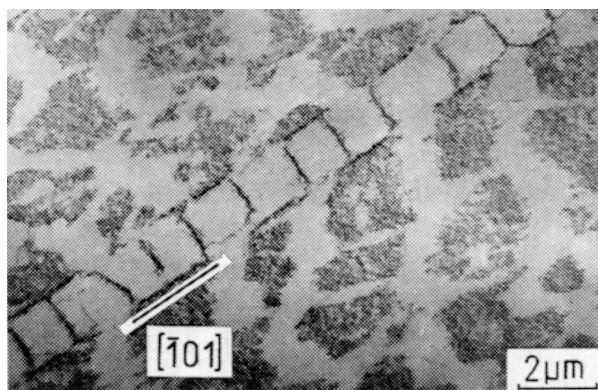
Právě díky tomu je pás se žebříkovou strukturou schopen akumulovat plastickou deformaci nad hodnotou  $\gamma_{ap1}$ , neboť velkou část jeho objemu tvoří oblasti bez dislokací zatímco dislokace v žebříkové struktuře jsou koncentrovány do tenkých stěn o tloušťce přibližně 0,1  $\mu\text{m}$ .

Pásy se žebříkovou strukturou v intervalu  $\gamma_{ap1} < \gamma_{ap} < \gamma_{ap2}$  leží rovnoběžně s primární skluzovou rovinou a jsou rozšířené přes celý průřez vzorku. S rostoucím  $\gamma_{ap}$  hustota pásů narůstá a při amplitudě  $\gamma_{ap2}$  je celý objem monokrystalu vyplněn žebříkovou strukturou.

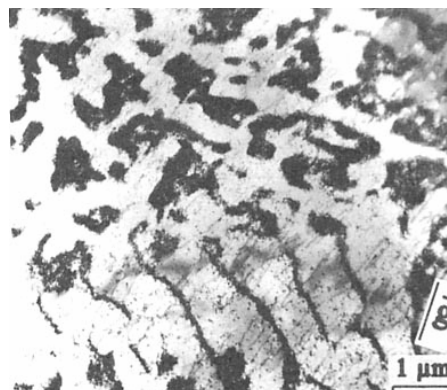


Obr. 14. Model multipólové konfigurace hranových dislokací

Typický příklad žebříkové struktury uprostřed matrice tvořené žilovou strukturou v čisté mědi je uveden na obr. 15, obdobná struktura u feritické oceli pak na obr. 16.



Obr. 15. Žebříková struktura v čisté Cu



Obr. 16. Žebříková struktura ve feritickém oceli

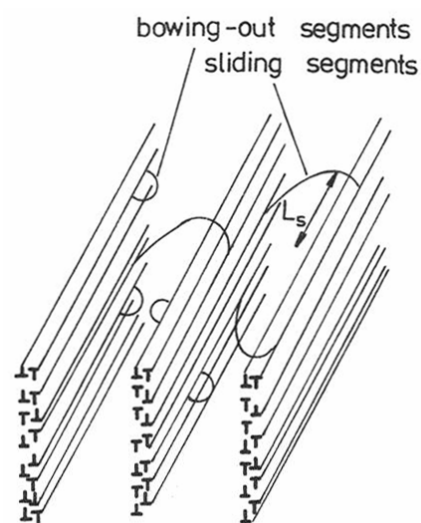
## Oblast C

Pokud se s přibývajícím počtem cyklů zvýší amplituda plastické deformace nad hodnotu  $\gamma_{ap2}$ , která ohraničuje oblast ustáleného stavu B, začne perzistentní struktura přecházet do třetího a posledního stádia vývoje dislokační struktury cyklicky zatěžovaného materiálu označovaného jako buněčná struktura. Důvod je stejný jako v případě předchozí transformace, stávající struktura již není schopna akomodovat zvýšenou plastickou deformaci. Teorie, snažící se tuto transformaci vysvětlit uvádí, že v důsledku zvýšení plastické deformace vznikne nadbytek dislokací (jak hranových v dipólových stěnách, tak i šroubových v oblastech s nízkou hustotou dislokací), což vyvolá napětové pole. Toto pole aktivuje sekundární skluz, v jehož důsledku dochází k destrukci stěn v žebříkové struktuře. K tvorbě buněk tedy dochází aktivací více skluzových systémů. A jelikož jsou rozměry buněk vždy větší jako vzdálenosti mezi jednotlivými stěnami žebříkové struktury, je možné, že tyto stěny bývají zárodky těchto nově vznikajících buněk.

Buněková struktura je obecně nejodolnější strukturou. Dokazuje to fakt, že je finální strukturou cyklické plastické deformace s nejvyšší amplitudou deformace a s nejvyšší napětovou reakcí. Vysoké amplitudy deformace struktura přenáší převážně šroubovými dislokacemi primárního systému.

### 2.3.5. Lokalizace plastické deformace

V oblasti B viz. obr. 13, kdy je amplituda plastické deformace v intervalu  $\gamma_{ap1} < \gamma_{ap} < \gamma_{ap2}$  tedy vzniká nehomogenní dislokační uspořádání, kde matricí se žilovou strukturou prochází pásy žebříkové struktury. Tyto pásy jsou charakteristické vysokou skluzovou aktivitou, což znamená, že do těchto pásů je převážně soustředěn pohyb dislokací, co by nositelů plastické deformace. Jak ukázaly četné experimenty, jde konkrétně o dislokace šroubové, zatímco hranové segmenty jsou zabudovány do dislokačních stěn. Důkazem této vyšší skluzové aktivity je vznik povrchového reliéfu, který je možné pozorovat v místech průniku pásů s povrchem zatěžovaného materiálu, a které způsobují právě převážně šroubové dislokace. Mechanismus vzniku těchto nerovností bude podrobněji vysvětlen v následující kapitole. Pro lepší představu ještě uveďme mechanismus pohybu šroubových dislokací v perzistentním skluzovém pásu. Na obr. 17 je uvedeno ilustrační schéma tohoto pohybu. Uvnitř krystalu se účinkem napětí aktivuje úsek primární hranové dislokace, která se rozšiřuje z dislokační stěny perzistentního pásma, než se začlení do protější stěny. Dynamickým účinkem se aktivuje další úsek dislokace na protější straně stěny. Při reverzi napětí (tj. při změně smyslu zatížení), dislokace, ať už se jedná o ty samé nebo o dislokace aktivované v jiných místech, běží v opačném směru.

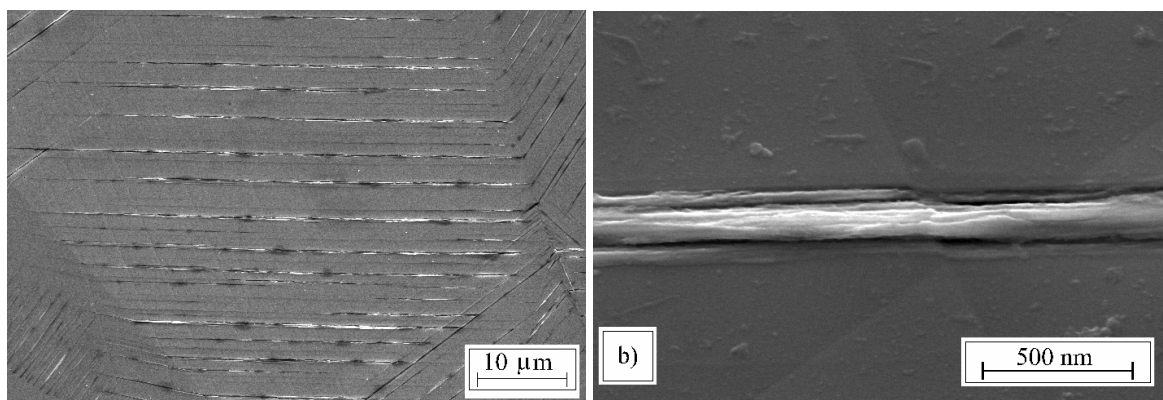


Obr. 17. Schématické znázornění pohybu šroubových dislokací perzistentním skluzovým pásem [12]

### 2.3.6. Vytvoření povrchového reliéfu

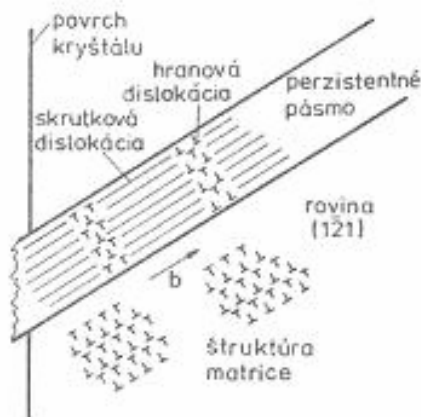
Vlivem vysoké skluzové aktivity lokalizované do pásů s žebříkovou strukturou vznikají na povrchu materiálu pásy (viz. obr. 18a). Jestliže odleštíme povrchovou vrstvu a toto místo naleptáme, pásy se opětovně objevují na svých původních místech, a proto jsou označovány jako perzistentní-stálá. Dále bylo zjištěno, že se tyto pásma leptají s jinou intenzitou než okolní zpevněná matrice. Tuto rozdílnou odolnost proti chemickému působení lze považovat jako důkaz, že jejich struktura je odlišná od struktury matrice. Vznikla tedy dvoufázová struktura, kdy lamela perzistentního skluzového pásu (PSP) je méně odolná vůči plastické deformaci než okolní cyklicky zpevněná matrice. A dále bylo upozorováno, že počet a intenzita těchto perzistentních skluzových pásů s počtem cyklů roste, přičemž nezáleží na typu materiálu, způsobu zatěžování ani teplotě. V případě fcc kovů se snadným příčným skluzem je perzistentní skluzový pás tvořen žebříkovou strukturou; v jiných případech může být dislokační uspořádání v PSP odlišné.

Povrchové nerovnosti perzistentních pásem, tj. povrchový reliéf, jenž se vzniká s přibývajícím plastickou deformací, je charakteristický svými výstupky a prohlubněmi. Výstupek, tedy „vytlačený“ materiál z povrchu kovu se nazývá extruze. Prohlubeň, tj. materiál „vtlačený,“ je nazývána intruze. Obr. 18b oba typické prvky reliéfu schématicky znázorňuje. Extruze a intruze vznikají zejména nereverzibilním pohybem šroubových dislokací. Ztráta dislokací, které vyběhly na povrch způsobuje nerovnováhu vnitřních napětí blízko povrchu. To způsobí iniciaci dalších dislokací v nejbližší dislokační stěně perzistentního pásma. Znamená to, že vnitřní struktura perzistentního skluzového pásma zásobuje povrchové vrstvy dislokacemi a umožňuje tak vznik povrchového reliéfu. Na obr. 19 je právě takový povrchový reliéf na rozhraní perzistentního skluzového pásma a povrchu materiálu patrný.



Obr. 18. a) Rovnoběžné skluzové pásy v autenitické oceli 316L; b) detail skluzového pásu, intruze se tvoří v místě rozhraní PSP - matrice

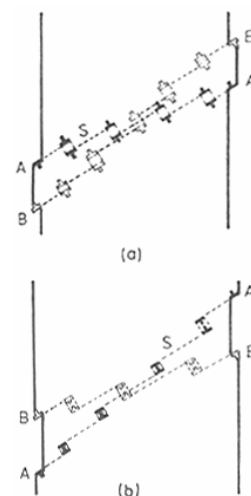
Po dosažení saturace mechanických vlastností, existuje rovnováha mezi generací a anihilací dislokací. Toto tvrzení je ale v rozporu se skutečností, že s přibývajícím plastickou deformací, tj. se zvyšujícím se počtem cyklů, roste zároveň i členitost samotného reliéfu. Za podmínek dokonalé rovnováhy by to nebylo možné. Modely popisující vznik povrchového reliéfu proto připouští „mikroskopickou“ ireverzibilitu pohybu dislokací. Skluz v jednom smyslu pohybu neprobíhá na té samé atomové (skluzové) rovině jako skluz v opačném smyslu, tzn. že mezi rovinou skluzu v tahovém cyklu a mezi rovinou skluzu v tlakovém cyklu je již několik atomových rovin jakoby vložených. Závěr vyplývající z tohoto modelu tedy zní, že makroskopicky je skluz reverzibilní, ale mikroskopicky je nereverzibilní.



Obr. 19. Schéma perzistentného pásma v rovině  $(\bar{1}21)$

Pro vznik povrchového reliéfu tímto způsobem je však nutné, aby dislokace při změně směru pohybu přešly na rovnoběžnou skluzovou rovinu, která je oproti původní posunutá. V případě šroubových dislokací je tento proces možný prostřednictvím příčného skluzu. To jen potvrzuje výše uvedené tvrzení, že šroubové dislokace (v kombinaci s příčným skluzem) hrají významnou úlohu při tvorbě povrchového reliéfu. Existují ale případy, kdy povrchový reliéf vytvářejí dislokace hranové. Zde však přechod na jiné atomové roviny skluzem není možný. Bylo vytvořeno mnoho modelů snažících se vysvětlit vznik reliéfu tímto způsobem. Z experimentů vyplývalo, že při cyklické deformaci roste hustota bodových poruch, především vakancí. Proto byly i tyto modely založeny na procesech vedoucích k tvorbě bodových mřížkových poruch. Z celého spektra těchto modelů, zde uveďme alespoň dva hlavní představitele:

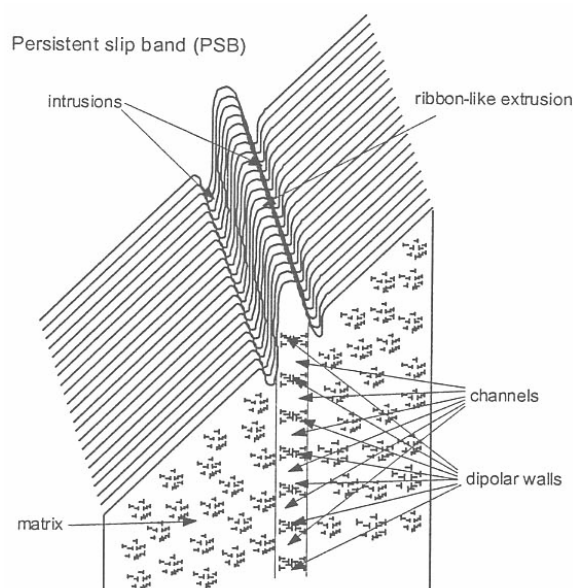
Prvním je model Essmana, Göseka a Mughrabiho [10], jehož základní dislokační mechanismus je schématicky znázorněn na obr. 20. Linie A - A' znázorňuje tahový půlcyklu, linie B - B' tlakový půlcyklu. Schody A - B a A' - B' v místech, kdy skluz přechází na jinou rovinu rovnoběžnou s rovinou původní, ale vzdálenou o několik mezirovinových vzdáleností, vytvářejí extruze (obr. 20a). Vytlačený objem, je přímo úměrný množství vakancí (tj. bodových poruch, kdy v uzlovém bodě mřížky chybí atom základního materiálu), které vznikly rozpadem dislokačních dipólů (anihilací hranových dislokací) v těchto místech. Uvažujeme-li tvorbu intersticiálních bodových poruch (atom nacházející se v meziuzlové poloze), potom výsledným produktem procesu jsou intruze (obr. 20b). Je zřejmé, že povrch extruze nebude v realitě tak hladký, jak předpovídá model. Další skluz může vést k vytvoření dalších intruzí v rámci vytlačeného materiálu, tj. v extruzi, což je ve shodě s experimentálním pozorováním. Tvorba vakancí je však energeticky snazší než tvorba intersticiálů a proto podle tohoto modelu by na povrchu materiálu měly vznikat pouze extruze. Profesor Mughrabi skutečně dodnes odmítá připustit existenci intruzí a nazývá tyto objekty krátkými trhlinami.



Obr. 20. Základní dislokační mechanismus v perzistentních skluzových pásmech

Druhý model Poláka [12] rovněž předpokládá vznik vakancí v průběhu procesu. Zde se ale vakance a jejich usměrněná migrace mezi pásem a okolní maticí podílejí na vzniku intruzí v místech rozhraní perzistentního skluzového pásu a okolní matrice (viz. obr. 21), což předchozí model neuvažoval. Difúzním mechanismem tyto bodové poruchy migrují směrem z pásu a zanikají na volném povrchu. V opačném směru toku vakancí je přemísťován okolní materiál a vytlačován na povrch skluzového pásu. Jeho objem odpovídá vzniklé extruzi.

Lokalizace skluzu do žebříkové struktury není nevyhnutelnou podmínkou tvorby intenzivního povrchového reliéfu. Detaily 3D uspořádání dislokací v pásech tvořících členitý povrch v řadě případů zatím neznáme.



Obr. 21. Schématicky znázorněný Polákův model vzniku intruzí [12]

### 2.3.7. Nukleace trhlin

Vlastní mechanismus nukleace není zdaleka tak podrobně zdokumentován, jako přípravná stádia k nukleaci. Dnes je již obecně známo, že trhliny vznikají téměř vždy na volném povrchu zatěžovaného materiálu (výjimkou mohou být nehomogenní tělesa jako např. tělesa se zpevněnou povrchovou vrstvou). Působením cyklické plastické deformace se na povrchu materiálu objevují persistentní skluzová pásma. Dalším cyklickým působením vznikají extruze a intruze. Předpokládá se, že, zejména intruze mají vrubové účinky. V jejich kořenech se koncentruje napětí (lokální hodnoty mohou být až několiknásobky napětí minimálního) a v okolí těchto vrubů dochází k lokalizaci plastické deformace. Se zvyšujícím se počtem cyklů, resp. s vyšší amplitudou plastické deformace dochází k rychlejšímu vývoji povrchového reliéfu a další koncentrace napětí vede k další koncentraci skluzu. Výsledkem je rostoucí vrubový účinek.

Dalším důvodem, proč ke vzniku trhlin dochází na povrchu součástí je, že se právě na něm vyskytují maximální hodnoty napětí (např. maximální ohybový moment, maximální kroutící moment, aj.). Probíhá zde tedy kombinace maximální skluzové aktivity a rostoucího vrubového účinku. Mnohé experimenty prokázaly, že u homogenních materiálů, které neobsahovaly žádné defekty ani trhliny, vznikaly první mikrotrhliny na volném povrchu právě důsledkem maximálních smykových napětí.

Vznikly řady teorií a modelů určujících konkrétní místo, kde první mikrotrhliny vznikají. Asi nejfrekventovanější a i nejpravděpodobnější variantou je model, který předpokládá vznik těchto prvních mikrotrhlin na rozhraní únavového skluzového pásu a okolní matrice. V řadě případů bylo pozorováno, že k prvním nukleacím těchto místech skutečně dochází. Jiná teorie ztotožňuje první mikrotrhliny s hlubokými a ostrými intruzemi.

Tuto variantu je možné připustit, neexistuje-li ostrá hranice mezi intruzí a samotnými mikrotrhlinami. Další teorie přichází s myšlenkou, že mikrotrhlina vzniká díky lokální křehkosti. Materiál v okolí kořene intruze má omezenou možnost skluzu sekundárních systémů, proto se nemůže deformovat a dochází k lokálnímu překročení meziatomových sil, tedy k lokálnímu křehkému porušení. Růst trhliny je ale čistě tvárný. Zdůrazněme, že místa vzniku prvních mikrotrhlin v případě homogenního monokrystalu byla vždy pozorována v povrchových intruzích.

V případě polykrystalického materiálu probíhá nukleace mikrotrhlin i na hranicích zrn (opět na volném povrchu), díky skluzové aktivitě v sousedních zrnech. Únavová skluzová pásma se zastavují na hranicích zrn, což vede to ke koncentraci napětí v průsečíku pásma a hranice zrna. Toto napětí relaxuje, přičemž jsou možné dva způsoby: vytvoří se skluzové pásmo i v sousedním zrně (musí mít ovšem vhodnou orientaci) nebo dojde k poškození hranice zrn. I tento způsob nukleace byl již pozorován, nelze ale nikdy dopředu předpovědět-predikovat transkrystalický nebo interkrystalický charakter nukleace. Závisí na vlastnostech matrice a vlastnostech samotných hranic zrn. Vyšší teploty v kombinaci s vysokými amplitudami zatěžování však u většiny materiálů podporují interkrystalickou nukleaci. U materiálů (ve slitinách) s velkými nekoherentními precipitáty nukleují trhliny často na hranicích zrn, protože bezprostřední okolí hranic je bez precipitátů. Jde tedy o relativně měkké oblasti v materiálu. A protože je zde skluzová aktivita dosti homogenní, netvoří se únavová skluzová pásma (plastická deformace se nelokalizuje) a tudíž na povrchu nejsou patrné téměř žádné stopy jemného skluzu, jenž by postačoval pro nukleaci mikrotrhlin. Jiným místem, kde mohou první mikrotrhliny také vznikat je bezprostřední okolí inkluzí (vměstků). Velké inkluze fungují rovněž jako koncentrátoři napětí. I zde platí, že vlivem vysoké koncentrace skluzu v okolí těchto vměstků, dochází k výraznější tvorbě únavových skluzových pásů, ve kterých potom vznikají trhliny. Shrňme-li, na jakých aspektech závisí poloha nukleačních míst u komerčních slitin, vychází nám vliv typu vyskytujících se precipitátů, velikost a rozdělení inkluzí a v neposlední řadě amplituda napětí.

Závěr této kapitoly věnujme povrchu zatěžovaných součástí. Bylo zjištěno, že velkou roli hraje stav tohoto povrchu, který samotný proces nukleace velmi významně ovlivňuje. Lze dokonce říci, že stav povrchu rozhoduje přímo o únavové pevnosti daného materiálu, resp. dané součásti. Proto není divu, že je všeobecnou snahou provádět taková opatření, jejichž cílem je zvýšit mez únavy zatěžované součásti a prodloužit tak její životnost. Zdokonalují se tak nejrůznější formy různých technologií úprav povrchů, jenž mají za úkol ve výsledku znesnadňovat nežádoucí důsledky degračního únavového procesu.

### 2.3.8. Interakce mezi trhlinami

V průběhu cyklického zatěžování vznikne na povrchu často veliký počet mikrotrhlin. Ty ve svém okolí vytvářejí určité specifické napěťové a deformační pole. Před čelem trhliny vzniká plastická zóna, která ovlivňuje rychlost růstu jiné blízké trhliny. Dochází tedy ke vzájemnému ovlivňování trhlin. Bylo pozorováno, že tyto interakce rychlost růstu trhlin zpomalují. To je jeden z důvodů, proč se některé krátké trhliny dále nešíří. V otázce této selekce hraje také významnou roli poloha těchto mikrotrhlin vůči působícímu vnějšímu napětí a zejména překážky v šíření trhliny jako jsou hranice zrn, které mohou krátkou trhlínu zastavit.

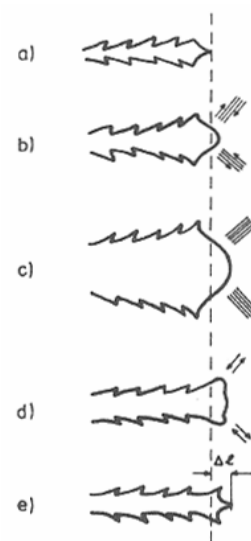
### 2.3.9. Šíření krátkých trhlin

Nukleace končí vytvořením mikrotrhliny kritické velikosti  $l_c$ . Dodnes však není přesně definována hranice mezi koncem stádia nukleace a počátkem etapy šíření, což je spíše otázka konvence než změny fyzikálního mechanismu.

Mikrotrhliny se vytvářejí skluzovými mechanismy, proto zpravidla leží podél skluzových rovin, které s osou vnějšího napětí svírají úhel zhruba  $45^\circ$ . Toto bývá označováno jako první stádium šíření únavové trhliny. S dalším zatěžováním se směr šíření stáčí kolmo na směr hlavního normálového napětí (II stádium šíření).

Velikost počátečních mikrotrhlin je řádově několik mikrometrů a jejich délky se zvětšují nepravidelně, rychlost růstu krátkých trhlin může významně kolísat.

Základní model šíření únavových trhlin, který je založen na opakující se plastické deformaci na špičce trhliny, navrhl Laird. Výchozí stav je bez zatížení (obr. 22a). Při tahovém zatěžování probíhá na čele trhliny intenzivní plastická deformace, jako důsledek výrazné koncentrace napětí. Deformace probíhá v rovinách s maximálním smykovým napětím, tj. v rovinách svírajících přibližně  $45^\circ$  s rovinou trhliny (obr. 22b). Při dalším zvyšování napětí se skluzové zóny rozšíří a čelo trhliny se otupí, čímž se vlastně efektivně posune (obr. 22c). Reverzní napětí vede ke změně smyslu deformace ve skluzových zónách, obě dvě poloviny trhliny se přiblíží, ale nemohou se již znovu spojit. Ve směru aktivních skluzových zón zůstávají jakési „ušičky“, které potom můžeme pozorovat na únavové ploše jako únavový žlábek nazývaný striace (obr. 22d). Výsledná konfigurace po ukončení zatěžovacího cyklu (obr. 22e), tedy opět vykazuje původní stav, ale délka trhliny je o  $\Delta l$  větší. Tento model vede vždy k tvorbě únavových žlábků. I když jde o mechanismus základní a převažující, rozhodně však není jediným mechanismem šíření.



Obr. 22. Lairdův model šíření únavové trhliny

### 2.3.10. Šíření dlouhých trhlin, iniciace magistrální trhliny a lom

Důležitým aspektem stádia šíření je rychlost s jakou se daná trhlina šíří. Cílem bylo nalézt spolehlivý aparát v závislosti na parametrech zatěžování a materiálu, pro určování reziduální životnosti součástí s trhlinou, velikosti přípustného defektu vzhledem k podmínkám zatěžování, a zejména k určení podmínek, při nichž se existující trhliny nemohou šířit. Přelom nastal s metodou lineární lomové mechaniky. Začátkem šedesátých let Paris postuloval, že rychlost šíření trhliny je jednoznačně funkcí faktoru intenzity napětí, který v sobě zahrnuje geometrii tělesa a vnějších sil. Závislost rychlosti šíření na faktoru intenzity napětí je potom stejná pro všechna tělesa.

Rychlost šíření únavových trhlin  $\Delta l/\Delta N$  se definuje jako přírůstek délky trhliny  $\Delta l$  za zvolený přírůstek zatěžovacích cyklů  $\Delta N$ . V limitním případě má potom rychlost šíření diferenciální podobu  $dl/dN$  a je funkcí amplitudy faktoru intenzity napětí  $K_a = (K_{\max} - K_{\min})/2$ , kde  $K_{\max}$  a  $K_{\min}$  jsou extrémní hodnoty K-faktoru v průběhu zatěžovacího cyklu. Schéma této závislosti je uvedeno na obr. 23. Ve své střední části je lineární (souřadnice jsou logaritmické), směrem k malým rychlostem šíření se asymptoticky blíží k prahové hodnotě  $K_{apz}$ , což je jedna z nejdůležitějších materiálových charakteristik. Pro  $K_a$  menší než je prahová hodnota podle této závislosti k šíření trhlin nedochází.  $K_{apz}$  může být použito pro definici

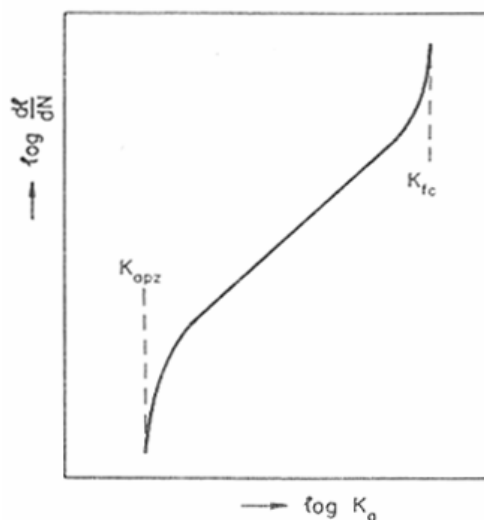
přechodu mezi krátkou a dlouhou únavovou trhlinou. Směrem k vysokým rychlostem se křivka na obr. 23 asymptoticky blíží k hodnotě únavové lomové houževnatosti  $K_{fc}$ , při které vzniká závěrečný nestabilní lom. Její tvar se liší pro různé materiály a prostředí, jedná se tedy o materiálovou křivku. Matematický popis křivky rychlosti šíření trhliny je následující:

$$dl/dN = AK_a^\beta \quad (14)$$

kde  $A$  a  $\beta$  jsou materiálové konstanty a  $K_a$  je amplituda faktoru intenzity napětí má obecný tvar:

$$K_a = \sigma_a \sqrt{\pi l} f(1/w) \quad (15)$$

kde  $\sigma_a$  je nominální napětí a  $w$  je šířka vzorku ve směru šíření trhliny; funkce  $f(1/w)$  určuje vliv geometrie tělesa na faktor  $K$ . Rovnice 1.33 se nazývá Parisův (nebo Paris-Erdoganův) zákon.



Obr. 23. Schéma závislosti rychlosti šíření únavových trhlin na amplitudě faktoru intenzity napětí

Z následující úvahy vyplývá rozhodující význam prahové hodnoty jako materiálového parametru. Pro těleso s trhlinou délky  $l_0$  je podmínkou nešíření nerovnost:

$$K_a \leq K_{apz} \quad (16)$$

kde  $K_a$  má význam působícího faktoru intenzity napětí. Použitím rovnice (15) potom dostáváme pro prahovou hodnotu faktoru intenzity napětí rovnici:

$$\sigma_a \cdot \sqrt{\pi l} \cdot f(1/w) = K_{apz} \quad (17)$$

Tuto rovnici je možné také chápat jako rovnici pro výpočet meze únavy tělesa s trhlinou. Mez únavy je v ní přímo úměrná právě materiálové konstantě  $K_{apz}$ .

Důsledkem Parisova zákona je fakt, že šíření únavových trhlin je spojitý opakující se proces, tzn. že každý cyklus vede k zvětšení délky trhliny. Důkazem je přítomnost únavového žlábkování neboli striací na lomové ploše. Vzdálenost mezi striacemi zpravidla odpovídá přírůstku délky trhliny za jeden cyklus. Někdy je ale na vytvoření jedné striace nutné více cyklů. Striace jsou typickým a výhradním znakem únavového procesu. Existují

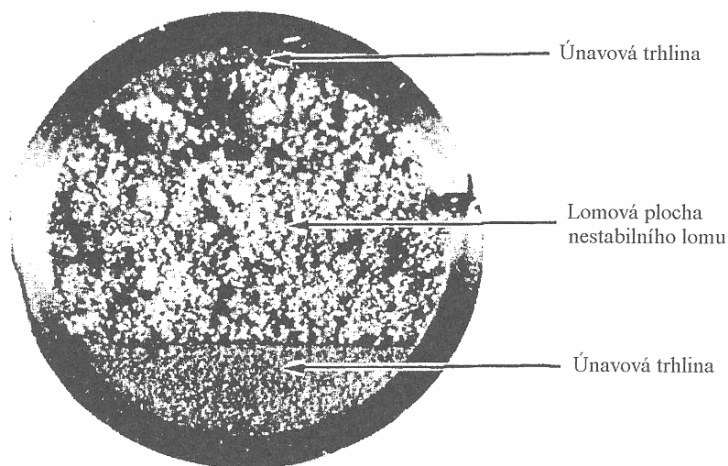


však materiály, na jejichž lomových plochách je téměř nemožné, nalézt oblasti se zřetelným žlábkováním, neboť výskyt striací je závislý na druhu materiálu a na zatěžovacích podmínkách. Ovšem i v těchto případech platí, že se velikost trhliny postupně zvětšuje.

V průběhu cyklického zatěžování se v celém objemu šíří zpravidla více trhlín v různých místech součásti. Může docházet i k jejich spojování, pokud se v průběhu svého šíření k sobě přiblíží. Trhlina vzniklá koalescencí dvou kratších trhlín se zpočátku nešíří s takovou rychlostí, jež by příslušela její délce podle Parisova zákona. Povrchová trhlina má (od povrchu směrem do materiálu) obecně elipsovitý tvar, v ideálním případě tvar půlkruhový. Jakmile se spojí dvě (popř. i více trhlín), na povrchu materiálu se její růst zpomalí. V této fázi, těsně po spojení, probíhá její šíření převážně směrem do materiálu, kdy se zaobluje nepravidelná hranice dvou sloučených trhlín. V okamžiku, kdy je dokončeno vyhlazování této hranice uvnitř materiálu, začne se tato trhlina na povrchu součásti šířit s rychlostí, jež odpovídá její délce.

Jakmile jedna z těchto dlouhých trhlín překoná určitou specifickou velikost, šíří se již v celém zatěžovaném objemu pouze tato sama, a je dále označována jako trhlina magistralní. U měkkých materiálů je tato kritická velikost maximálně několik desetin milimetru, u vysocepevných materiálů jsou to setiny milimetru. Samotné šíření magistralní trhliny dnes již snadno popisuje lomová mechanika.

Je-li příčný průřez součásti oslaben natolik, že již není tato zbylá neporušená část schopna snášet působící napětí, dochází (u součástí degradovaných únavou) k náhlému statickému nestabilnímu dolomení součásti. Samotné dolomení nesouvisí s únavovým porušením, ale jedná se o statický lom mající křehkou povahu (viz. obr. 24). Vzhled lomové plochy je zřetelně odlišný od části vzniklé postupným šířením trhliny.



Obr. 24. Lomová plocha součásti po únavovém porušení

## 2.4. TYPY ZATĚŽOVACÍCH ZKUŠEBNÍCH STROJŮ

### 2.4.1. Elektromechanické zkušební stroje

Tyto stroje se používají pro nižší jmenovité síly (5 kN až 250 kN) [13]. Jedná se zejména o stroje pro monotónní zatěžování zkušebních vzorků. K testování únavy nejsou vhodné. Je to odvislé od principu, na jakém tyto stroje pracují. Posuv příčnicku zajišťuje pohybový šroub poháněný elektromotorem, přes vřeteno a převodová skřín [2]. Jednoduché schéma znázorňující tento princip je uvedeno na obr. 25. Toto uspořádání není schopné vyvinout rychlý reverzní pohyb charakteristický právě pro únavové zkoušky.

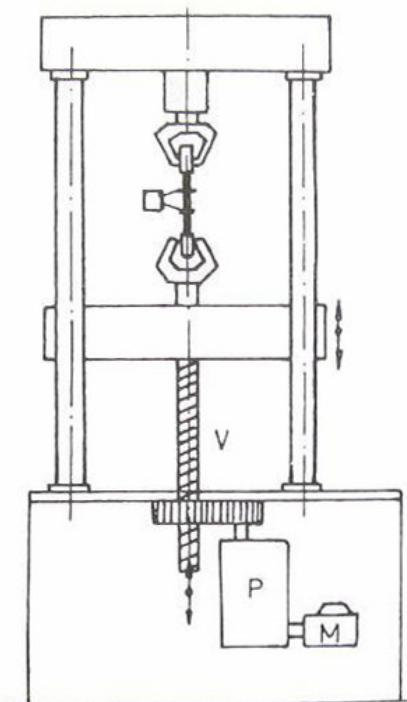
V dnešní době již existují moderní zkušební stroje, u nichž je minimální rychlost příčnicku dokonce  $1\mu\text{m/hod}$ . Jde o testovací systém firmy Instron s typovým označením Instron 8862 (viz. příslušný katalog firmy) a těchto malých rychlostí je dosaženo díky vysokému převodovému stupni.

Výhody:

- při vypnutí pojezdového motoru zůstává příčnick v konstantní poloze
- vhodné pro monotónní testování
- snadná instalace
- nízká hlučnost
- nízká pořizovací cena

Nevýhody:

- nižší jmenovité síly
- nejsou vhodné pro cyklické zatěžování



Obr. 25. Zjednodušené schéma elektromechanického zkušebního stroje [2].

## 2.4.2. Elektrohydraulické (servo-hydraulické) zkušební stroje

Zkušební stroje pracující na tomto principu jsou určeny pro vyšší jmenovité síly. Nejčastěji jde o dynamické zkušební stroje. Umožňují řízení síly, deformace nebo pohybu příčnicku v průběhu zkoušky v závislosti na čase. Maximální frekvence cyklování je až 20 Hz, tzn. že  $10^7$  cyklů může být dosaženo přibližně do dvou dnů [2, 4].

Podíváme-li se na elektrohydraulické stroje z pohledu přenosu energie, lze říci, že jde o seskupení hydraulických prvků schopných přeměnit mechanickou energii přiváděnou do hydrogenerátoru na tlakovou energii kapaliny, přenést ji na jiné místo a zde ji opět transformovat na mechanickou práci [13], viz. obr. 26.

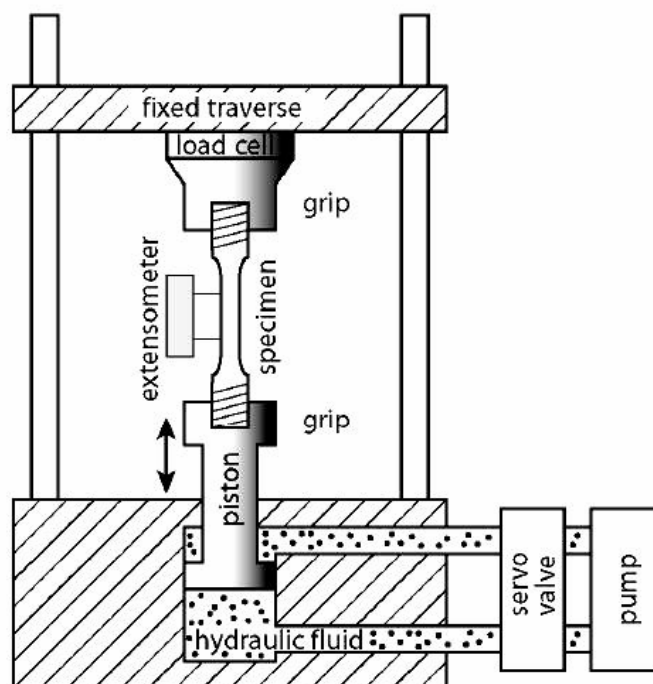
Akčním členem každého elektrohydraulického stroje je přímočarý nebo torzní hydraulický motor (hydromotor). Hydromotor by měl vykazovat minimální pasivní odpory z důvodů požadované přesnosti sledovaných zátěžných veličin. Tomuto požadavku vyhovují hydromotory s hydrostatickým uložením. Vícestupňové servoventily umožňují přesné řízení pohybu pístnice při velkých (přesně řízených) průtocích v širokém propustném frekvenčním pásmu (až do 400 Hz). Těmto poměrům jsou přizpůsobeny veškeré hydraulické připojovací bloky a multiventily [13].

Výhody:

- vyšší jmenovité síly
- vysoké výkonové zesílení
- vhodné pro cyklické zatěžování

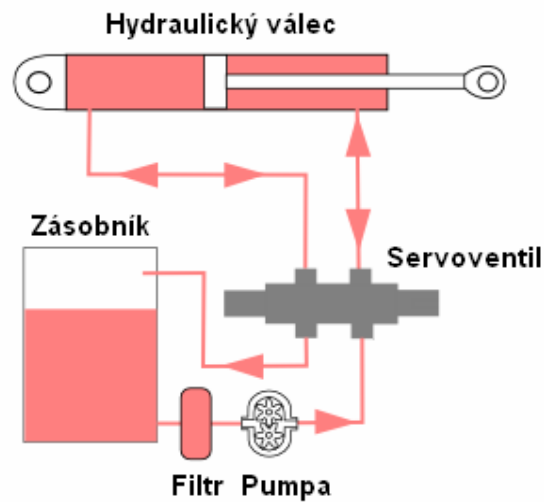
Nevýhody:

- vyšší nároky na prostor
- obtížnější instalace zařízení
- nutný servis
- vyšší finance
- méně vhodné pro monotónní zatěžování

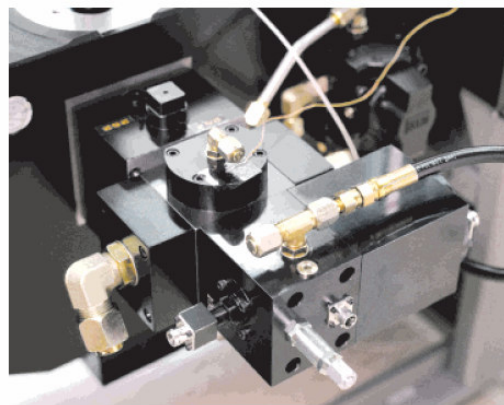


Obr. 26. Zjednodušené schéma elektrohydraulického zkušebního stroje [4]

Cesta hydraulického oleje se nazývá kapalinovým okruhem (obr. 27). Jednotlivé prvky tohoto obvodu jsou propojeny sérií rozvodů. Pumpou, jež slouží k získání potřebného provozního tlaku a udržení konstantního průtoku pracovního média, je olej čerpán ze zásobníku. Ve filtru je zbaven nečistot, které mohou jednotlivé prvky obvodu poškodit. Servoventil (obr. 28) řízený PID regulátorem distribuuje olej do příslušných komor hydraulického válce. Je-li uzavřen, brání oleji vrátit se z komor zpět do zásobníku. Pokud však má tekutina příliš vysoký tlak, je přepuštěna zpět pomocí přetlakového ventilu. Píst hydraulického válce vykonává přímočarý pohyb a jeho poloha je závislá na tom, do jaké z válcových komor je olej servoventilem směrován.



Obr. 27. Schéma jednoduchého kapalinového okruhu



Obr. 28. Servoventil řízený PID regulátorem

## 2.5. MONOTÓNÍ A CYKICKÉ TESTOVÁNÍ VYSOCE PEVNÝCH KERAMICKÝCH VLÁKEN

### 2.5.1. Úvod

V této kapitole je popsán experiment, realizovaný na ústavu Chemického a materiálového inženýrství ve státě Arizona, USA, který prováděli členové výzkumného týmu N. Chawly a M. Kerra [14]. V tomto experimentu byla testována tenká keramická vlákna v tahu a při únavě. K zatěžování těchto zkušebních vzorků byl použit testovací systém Tytron 250 od firmy MTS.

Podle našich vědomostí, je to zatím jediný článek v literatuře, který popisuje aplikaci stroje MTS Tytron 250 v materiálové vědě. To je důvodem, proč je tento výťah odborného článku zařazen do teoretické části této diplomové práce (jejímž cílem je právě zmíněný zkušební stroj MTS Tytron 250 otestovat s využitím různých materiálů a různých zkušebních vzorků).

### 2.5.2. Testovaný materiál a jeho využití

Zkušební vzorky byly v tomto experimentu zatěžovány staticky a cyklicky. Cílem monotónního zatěžování bylo získat mechanické charakteristiky testovaných materiálů a cyklickým zatěžováním v režimu tah-tah určit citlivost těchto materiálů vůči únavovému poškození. Testovanými materiály byly dva druhy keramických vláken, i)  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3$  keramika (Nextel 312) a ii) jednofázová  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  keramika (Nextel 610). Označení Nextel je obchodní název těchto materiálů společnosti 3M Corporation, jenž oba typy těchto keramických vláken vyrobila procesem sol-gel. Tyto tenká vlákna se obecně používají v několika strukturních aplikacích, ve formě tkaniva nebo jako kontinuální vlákna, co by výztuha kompozitních materiálů. Hlavním záměrem tohoto projektu bylo lépe porozumět únavovému chování těchto kompozitních výztuh, neboť do té doby, byla tato problematika poměrně málo prostudována.

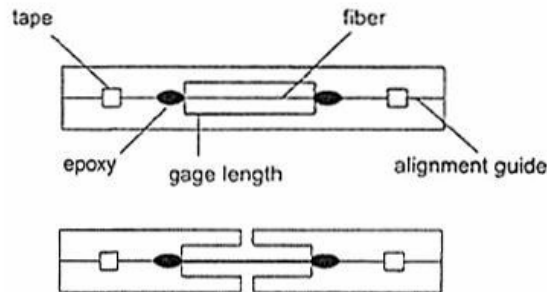
### 2.5.3. Příprava zkušebních vzorků a parametry zkoušek

Jednotlivá vlákna byla stříhána z cívky na předem stanovený rozměr. U všech testovaných vzorků (na tah i únavu) byla použita měrná délka 20 mm. Před samotným testováním byly na povrchu vláken spáleny organické částice, při teplotě 725 °C (na vzduchu) po dobu 5 minut, neboť v jiných experimentálních měřeních bylo zjištěno, že environmentální částice v kombinaci se zatížením velmi silně přispívají k degradaci těchto materiálů.

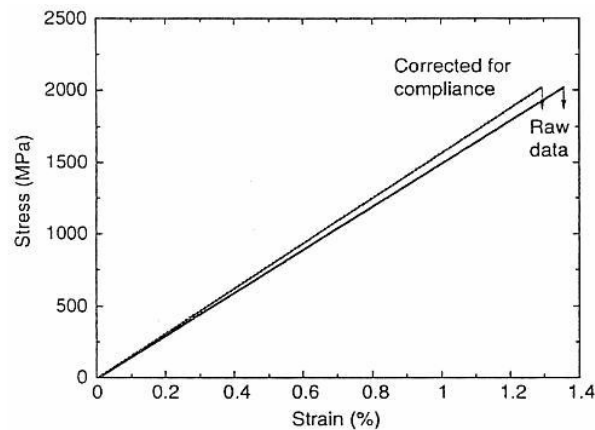
Pro upnutí zkušebních vzorků při testu byla použita technika papírových rámečků dle ASTM standardu pro testování vláken, neboť testovaná vlákna mají průměr kolem 10  $\mu\text{m}$ . K vystředění vláken byl použit optický mikroskop. Schématické znázornění papírového rámečku s nalepeným vzorkem je uvedeno na obr. 29. Testováno bylo vždy pouze jediné vlákno. Průměr některých vláken byl změřen pomocí scanovacího elektronového mikroskopu (SEM) pro vypočtení střední hodnoty průměrů a směrodatné odchylky, jenž byly následně použity pro výpočty příčného průřezu a napětí.

Jak již bylo výše uvedeno, pro testování (tah i únavu) byl použit univerzální zkušební stroj MTS Tytron 250. Autoři uvádějí, že dosažené rozlišení v měření síly se pohybovalo okolo 0,001 N a v měření deformace okolo 1  $\mu\text{m}$ . Při tahových zkouškách bylo řízeno přemístění, s rychlostí deformace  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Při únavových testech byla řízenou veličinou síla, zatěžování probíhalo v režimu tah-tah s parametrem asymetrie  $R = 0,2$  a frekvencí 2 Hz. Všechny testy byly prováděny za pokojové teploty ( $\sim 28 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Obr. 30 ukazuje vliv tuhosti zkušebního stroje na výsledná-získaná data mechanických zkoušek. Je zde uvedena závislost napětí – deformace vlákna Nextel 312, v níž jsou srovnávány skutečné-naměřené hodnoty a korigované-teoretické hodnoty. Naměřené přemístění testovaného vlákna je při konstantní hodnotě napětí vždy větší než předpokládané-teoretické přemístění daného vlákna, způsobené právě poddajností testovacího systému. Tato závislost je jedním z výsledů získaných testováním těchto dvou typů keramických vláken. Jak je možné očekávat, vlákna se chovají křehce a žádná plastická deformace není na křivce viditelná.

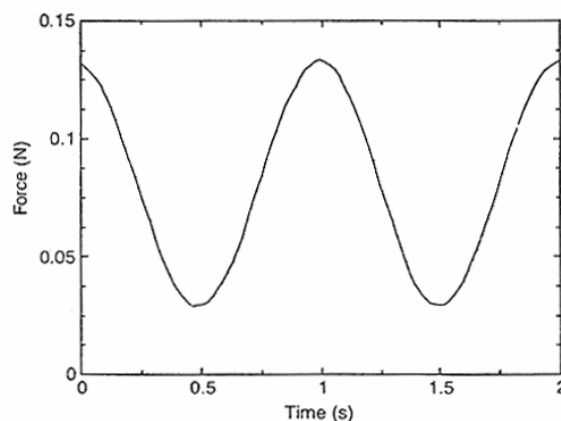


Obr. 29. Schématické znázornění papírového rámečku s nalepeným vzorkem



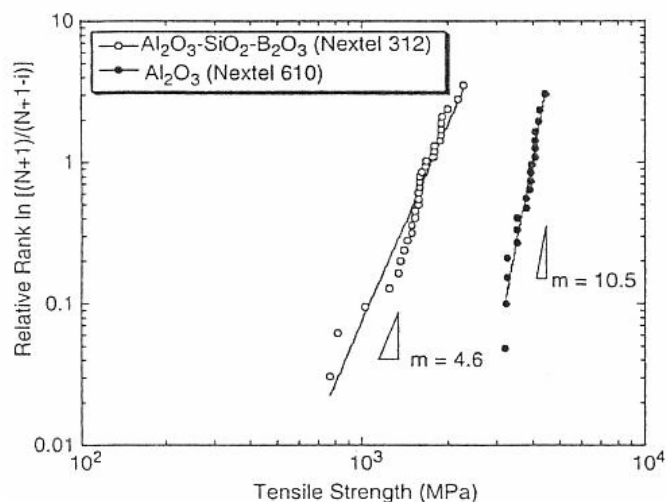
Obr. 30. Skutečná a korigovaná závislost napětí – deformace vlákna Nextel 312

Na obr. 31 je uveden typický sinusový průběh zatěžování, který byl použit při únavových zkouškách zkušební vzorků. Autoři článku upozorňují na vysokou přesnost řízení aplikovaného zatížení s časem.



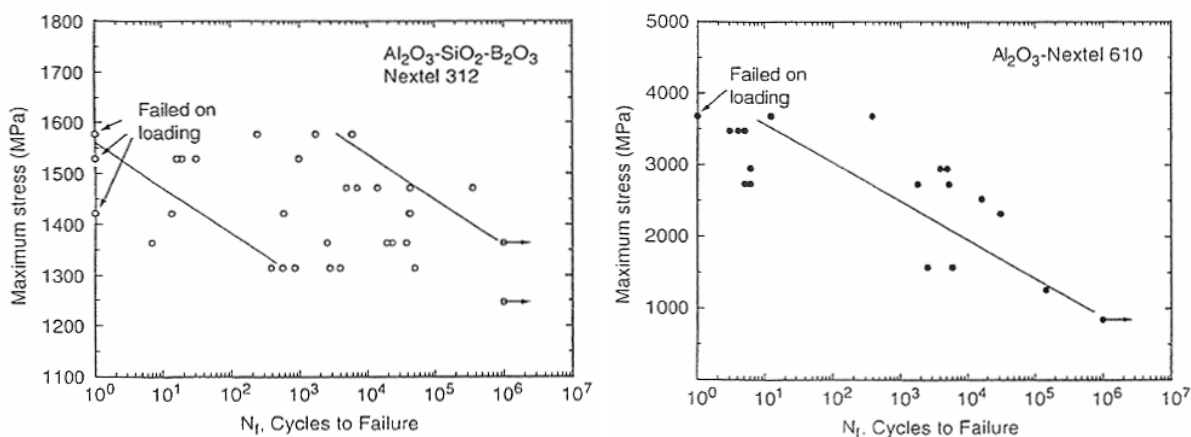
Obr. 31. Sinusový průběh zatěžování použitý při únavových zkouškách

Chawla a Kerr úspěšně provedli sérii tahových a únavových zkoušek na obou materiálech. V případě tahové zkoušky je v článku uveden pouze obr. 32 znázorňující Weibullovo rozdělení pevnosti v tahu testovaných vláken. Weibullův modul  $m$  uvedený v obrázku charakterizuje rozptyl výsledků; vyšší  $m$  pro Nextel 610 znamená nižší rozptyl dat. Je vidět, že  $R_m$  je vyšší (cca 4 GPa) pro Nextel 610 než v případě materiálu Nextel 312 (cca 2 GPa). Tyto extrémně vysoké hodnoty  $R_m$  opravňují výrobce materiálu k použití termínu „high performance ceramic fibres.“



Obr. 32. Weibullovo rozdělení pevnosti v tahu testovaných vláken

Únavové životnosti obou materiálů jsou uvedeny na obr. 33a) a obr. 33b). Nextel 312 je méně odolný proti cyklickému zatěžování a má mnohem vyšší rozptyl výsledků než Nextel 610.

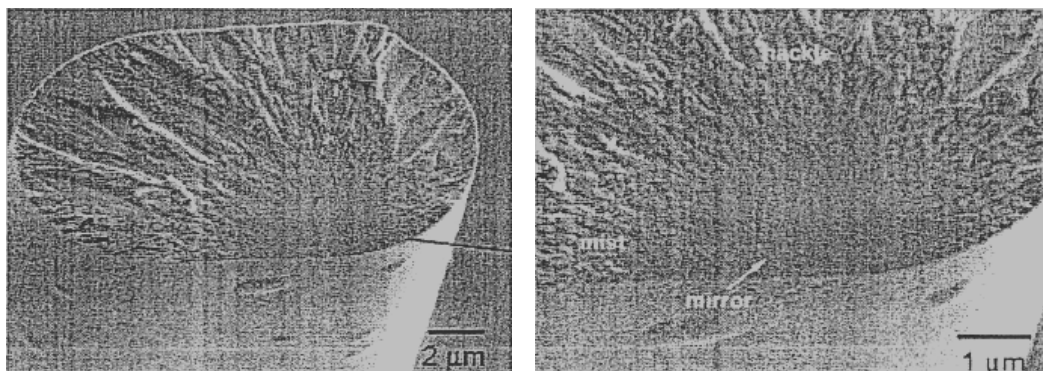


Obr. 33. Závislost počtu cyklů do lomu na maximálním aplikovaném cyklickém napětí (cyklování bylo provedeno v mívivém cyklu) pro a) Nextel 312 a b) Nextel 610. Vlákná mají delší životnost pro nižší maximální napětí.

#### 2.5.4. Fraktografická analýza lomových ploch

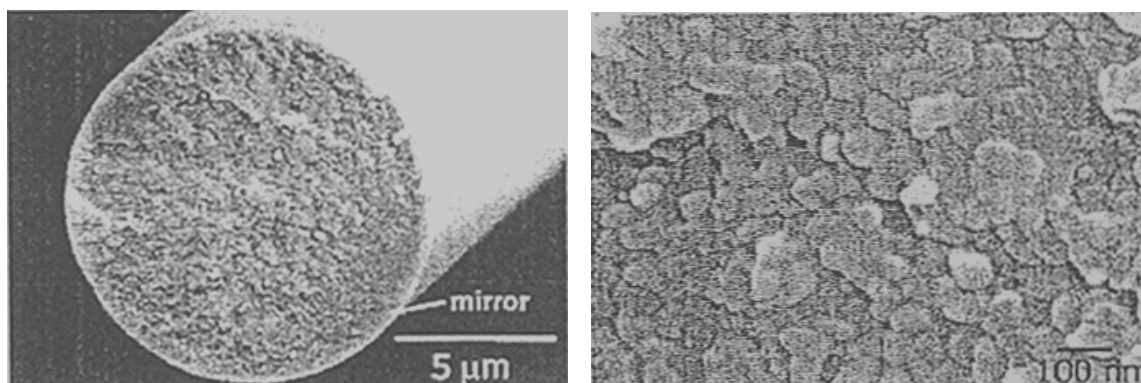
Po tahových i únavových testech byla v SEM provedena fraktografická analýza lomových povrchů těchto (zdeformovaných) zkušebních vzorků. V této podkapitole jsou pro ilustraci některé z pořízených snímků uvedeny a okomentovány.

Na obr. 34 je znázorněn typický lomový povrch vláken Nextel 312 po zatěžování v tahu. Nodule na povrchu jsou zbytky petroleje, který byl na některé vzorky před zkouškou nanesen jako pomůcka pro následnou fraktografickou analýzu, a který má za úkol absorbovat dissipovanou lomovou energii na povrchu.



Obr. 34. Typický lomový povrch vláken Nextel 312 po tahové zkoušce

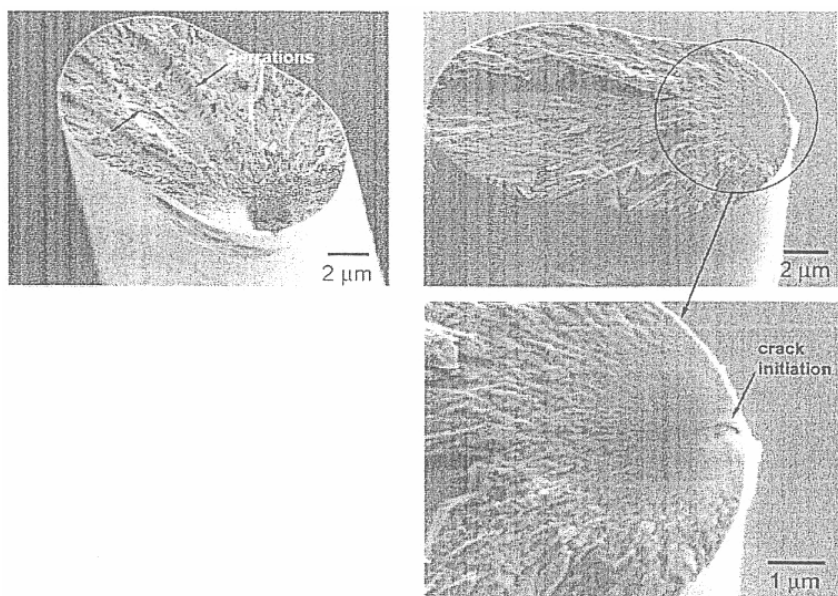
Na obr. 35 je lomový povrch vlákna Nextel 610 opět po zatěžování v tahu. Na první pohled je zřejmé, že tento lomový povrch je mnohem více členitý než v případě Nextel 312. Je to způsobeno rozdílnou velikostí zrn obou typů vláken. Nextel 610 má velikost zrn přibližně 0,1 μm, kdežto Nextel 312 má až nanokrystalickou strukturu.



Obr. 35. Lomový povrch vláken Nextel 610 po tahové zkoušce

Hlavním smyslem fraktografické analýzy lomových povrchů vzorků po únavě bylo objasnění mechanismu únavového poškození keramických materiálů a srovnání vzhledu lomových ploch vzorků po cyklickém zatěžování s lomovými plochami vzorků vystavených (pouze) monotónnímu zatížení. Jak lze (ale) předpokládat, lomové plochy se ve výsledku znatelně lišily. Obr. 36 ukazuje lomový povrch vlákna Nextel 312 (práve) po cyklickém zatěžování. Je na něm vyznačeno také místo iniciace únavové trhliny, která se začala šířit z defektu na povrchu vlákna. Vyšší členitost lomových povrchů vláken po únavě může být způsobena také subkritickým poškozením v podobě mikrotrhlin vytvořených v průběhu únavového procesu, jenž se vzájemně propojily (koagulovaly) v konečných stádiích únavového procesu.





Obr. 36. Lomový povrch vlákna Nextel 312 po cyklickém zatěžování

## 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1. TESTOVANÉ MATERIÁLY

#### 3.1.1. Al vlákna vyrobená protahováním

(materiál zasláný v rámci spolupráce s prof. Bernardem Viguierem, Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs en Arts Chimiques et Technologique, Toulouse, Francie)

Studovaná vlákna získal francouzský partner od firmy Goodfellow. Jednalo se o hliníková vlákna o chemické čistotě 99.5% a dvou průměrech: 125 a 500  $\mu\text{m}$ . Vlákna byla zpracována tažením za studena a bylo ověřeno, že rozptyl průměru vláken je vždy menší než 5%. Více detailů o materiálu (např. velikost zrna, přítomnost precipitátů atd.) není známo.

#### 3.1.2. Al vlákna připravená replikační technikou

(materiál zasláný v rámci spolupráce s prof. Andreasem Mortensenem, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Švýcarsko)

##### 3.1.2.1. Úvod

V této kapitole je citován vědecký článek, ve kterém je uveden postup přípravy kovové pěny s otevřenými kulovitými póry [15]. Touto studií se zabýval výzkumný tým pod vedením prof. Mortensena. Jde o metodu využívající předpřipravených kulovitých částic soli jako částic, jejichž následným rozpuštěním vznikne vysoce porézní materiál s rovnoměrně distribuovanými kulovitými póry přibližně stejné velikosti. Tento způsob rozšířil replikační proces, jímž jsou běžně připravovány kovové pěny s širokou škálou hustoty o technologii umožňující výrobu právě dutin kulovitého tvaru, a která současně umožňuje řízení tvaru těchto pórů.

Metodou založenou na podobném principu byla připravována také i hliníková vlákna o průměru 180  $\mu\text{m}$ , která byla v tomto diplomovém projektu použita, jako jeden ze zkušebních vzorků sloužících k otestování stroje MTS Tytron 250.

Technologie replikace tekuté infiltrační hmoty, která produkuje pěny s kulovitými buňkami byla známa již dříve a NaCl částic připravených z roztoku bylo využíváno k výrobě kovových pěn. Pěny s kulovitými buňkami byly připraveny např. B. Jiangem a kolektivem [16, 17], využívající podobné metody. I v tomto případě bylo docíleno lepších pevnostních charakteristik než u pěn s protáhlými buňkami.

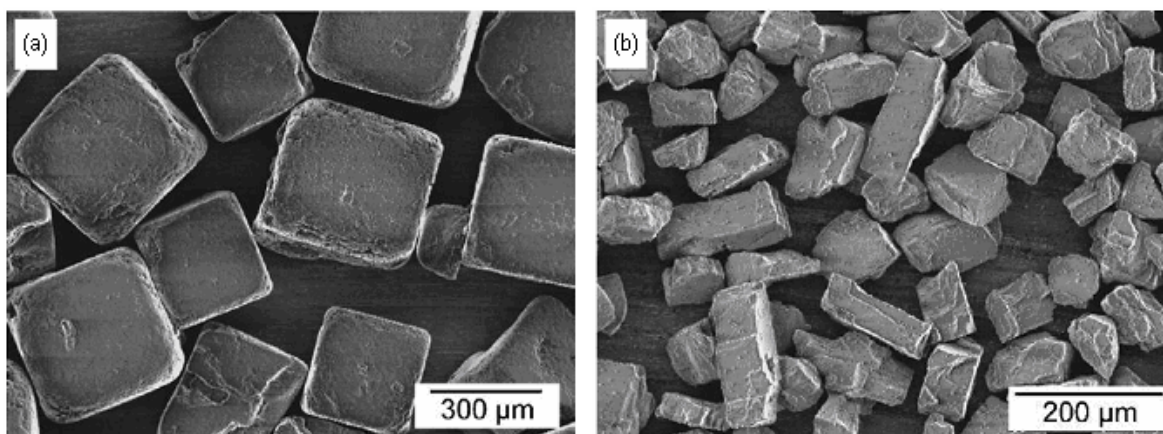
V tomto odborném článku [15] je mimo detailního popisu metody samotné přípravy kovových pěn dále uvedeno i použití takto připravených materiálů a také výsledky testů vlivu tvaru dutin na mechanické vlastnosti pěny. V této kapitole však bude uvedena pouze část odborného článku popisující přípravu materiálu.

##### 3.1.2.2. Příprava kulovitých NaCl částic

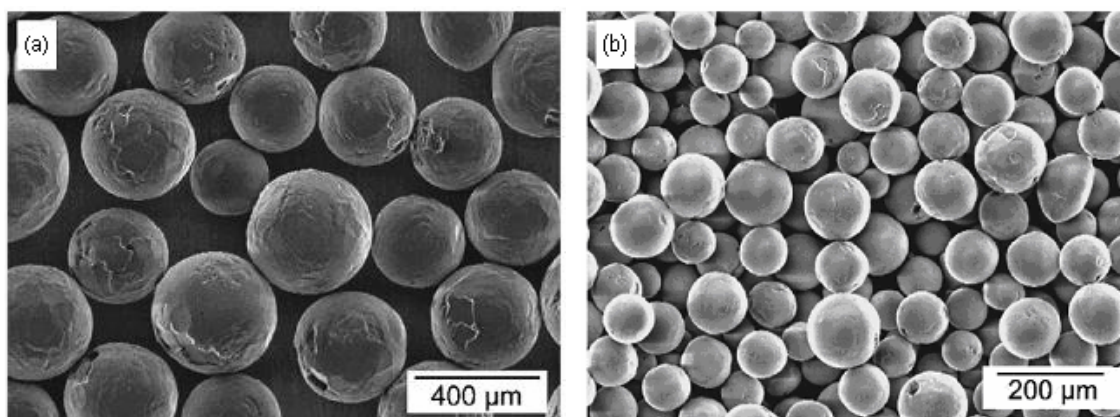
V experimentu byly použity dvě velikosti NaCl částic. První o průměrné velikosti 400  $\mu\text{m}$  a druhé, jejichž rozměr byl 63 až 90  $\mu\text{m}$  s průměrnou velikostí 75  $\mu\text{m}$ , získané prosetím přes síto. Částice mají nepravidelný tvar blízký kubickému formě s výstupky popř. otupenými hranami, viz. obr. 37.

Samotnou výrobu kulovitých částic, lze ve zkratce popsat takto: krystaly NaCl jsou roztaveny a následně dispergovány (rozptýleny) ve vzduchu. Během jejich letu opětovně ztuhnou, přičemž částice již mají kulovitý tvar, který jim zůstává. Schéma, na němž jsou znázorněny jednotlivé kroky této metody je uvedeno na obr. 39. K roztavení krystalů NaCl

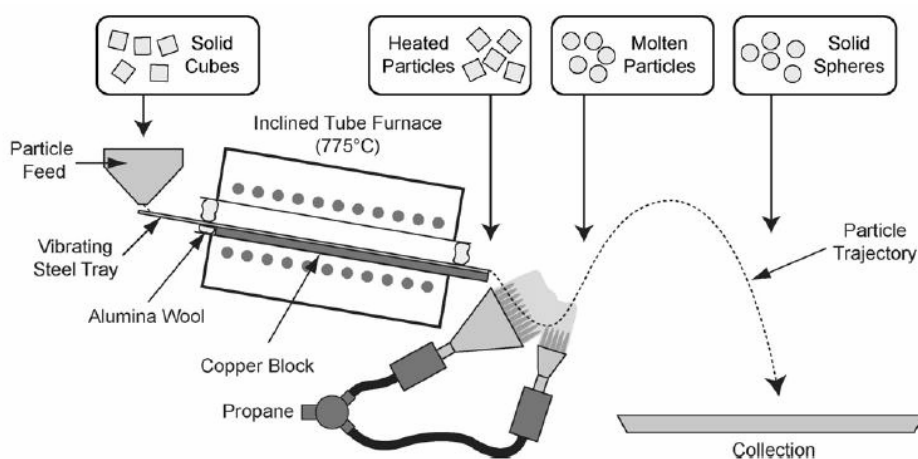
jsou použity dva propanové hořáky. Bylo zjištěno, že pro přípravu kulovitých částic s průměrnou velikostí 400  $\mu\text{m}$ , je nezbytné předehřívací zařízení, bez něhož nebylo možné krystaly NaCl této velikosti průchodem přes propanové hořáky zcela roztavit. Jako předehřívací zařízení proto byla použita trubková pec s konstantní teplotou 775  $^{\circ}\text{C}$  (teplota nižší než bod tavení NaCl 800,7  $^{\circ}\text{C}$ ). Částice procházejí touto pecí vibračním pohybem skloněného ocelového kanálu, který leží na měděném bloku, zajišťujícím konstantní teplo po celé jeho délce. V případě částic s průměrnou velikostí 75  $\mu\text{m}$  předehřívání nebylo nutné, krystaly byly roztaveny pomocí stejného zařízení pouze s řízeným přísunem prášku. Poté, co částice opustí pec, v níž byly přibližně 30 sekund, padají do plamene prvního propanového hořáku. Ten je opatřen přípravkem, který tvaruje jeho plamen podél směru trasy soli a současně je skloněn tak, aby částice setrvali v nejteplejší zóně plamene co možná nejdéle. Z plamene prvního hořáku přecházejí částice plynule do plamene druhého hořáku, který je naopak natočen šikmo vzhůru, aby prodloužil jejich dobu strávenou ve vzduchu. Když částice vycházejí z plamene druhého hořáku, jsou již roztavené. Během jejich letu dostávají kulovitý tvar díky povrchovému napětí těchto kapek. Ve vzduchu urazí vzdálenost přibližně 400 mm, během níž se ochladí a ztuhnou. Obě velikostní varianty částic NaCl po sferoidizaci znázorňuje na obr. 38. Na závěr jsou odebrány vzorky na kontrolu jejich tvaru pomocí mikroskopu. Bylo zjištěno, že se velikost částic po absolvování procesu téměř neliší od výchozího stavu, a proto se již neopakuje prosívání.



Obr. 37. Částice NaCl a) s průměrnou velikostí 400  $\mu\text{m}$ ,  
b) s průměrnou velikostí 75  $\mu\text{m}$  před sferoidizací. SEM, zobrazení v sekundárních elektronech.



Obr. 38. Částice NaCl a) s průměrnou velikostí 400  $\mu\text{m}$ ,  
b) s průměrnou velikostí 75  $\mu\text{m}$  po sferoidizaci. SEM, zobrazení v sekundárních elektronech.



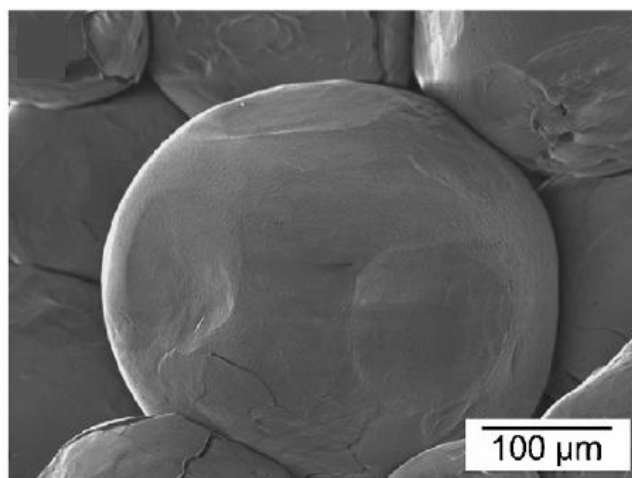
Obr. 39. Schéma procesu přípravy kulovitých částic NaCl

### 3.1.2.3. Výroba kovové pěny

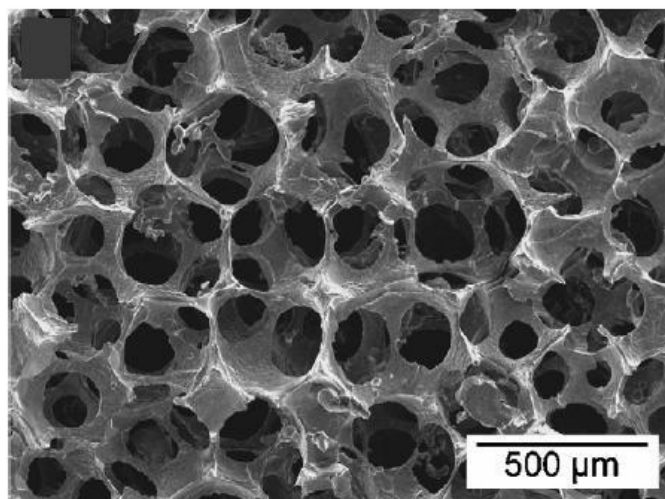
Připravené kulovité částice soli výše uvedeným způsobem byly následně použity v replikačním procesu pro výrobu pěny s otevřenými póry z čistého Al. Částice NaCl jsou vsypány do formy z pružné silikonové pryže a vibračním pohybem je docíleno zahuštění těchto částic. Forma je následně izostaticky stlačena (za pokojové teploty) tlakem v rozsahu 6 až 60 MPa, pro dosažení požadované objemové frakce soli, který odpovídá pórovitosti finální pěny. Velikost tlaku ovlivňuje hustotu takto získaného skeletu, která se pohybovala v rozmezí 0,7 až 0,9 hustoty NaCl. Na obr. 40 je pro ilustraci uvedena částice NaCl v kompozitu po stlačení s relativní hustotou 0,85.

Skelet tvořený částicemi NaCl je poté vyjmut z formy. Částice NaCl během stlačení vytvořily vzájemné vazby a skelet si udržuje svůj tvar i bez vnější opory. Skelet je dále umístěn v tavícím kelímku, kde je do jeho mezer infiltrován roztavený čistý Al (99,99 %) při teplotě 710 °C v ochranné argonové atmosféře. Pro skelety tvořené částicemi o průměrné velikosti 400 μm je použit infiltrační tlak 0,4 MPa. V případě skeletů tvořených částicemi o průměrné velikosti 75 μm, mající jemné mezery, a které tedy vyžadují vyšší tlaky, byla infiltrace provedena pod tlakem do 8 MPa.

Po ztuhnutí kovu může být kompozit Al-NaCl obroben do finálního tvaru součástí nebo za účelem zhotovení zkušebních vzorků. Po obrobení následuje poslední krok, rozpuštění solných částic v destilované vodě. Obr. 41 znázorňuje hliníkovou pěnu s kulovitými póry s průměrnou velikostí 400 μm a objemovým zlomkem  $V_S = 0,1$ .

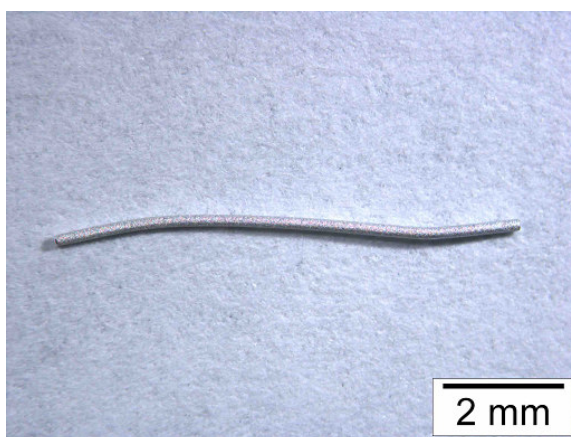


Obr. 40. Kulovitá částice NaCl uvnitř skeletu po stlačení na relativní hustotu 0,85



Obr. 41. SEM, Al (99,99 %) pěna s kulovitými póry o průměrné velikosti 400 μm vyrobená replikačním procesem s objemovým zlomkem  $V_S = 0,1$

Skupina prof. Mortensena ovšem neznala mechanické charakteristiky základního materiálu, tj. Al po popsaném technologickém postupu. Proto byla s ÚFM uzavřena spolupráce na tomto tématu. Pro tyto účely byla připravena hliníková vlákna metodou založenou na podobném principu, kdy do NaCl prášku byla před lisováním umístěna polymerní vlákna. Po vytvoření skeletu lisováním byla tato vlákna vypálena a do vzniklých válcových prostor uvnitř skeletu byl infiltrován roztavený Al. Následovalo opět rozpuštění NaCl skeletu v destilované vodě a získání Al vláken o proměnlivé délce, nejčastěji však 6-7 mm a o průměru 180 mikrometrů (viz. obr. 42). Dodaná vlákna nebyla perfektně přímá a na jejich povrchu se nacházely kulové jamky odpovídající poloměru použitých kulových zrn NaCl skeletu.



Obr. 42. Al vlákno o průměru 180 mikrometrů

### 3.1.3. Nylonová vlákna

(materiál zasláný v rámci spolupráce s prof. Bernardem Viguierem, Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs en Arts Chimiques et Technologique, Toulouse, Francie)

Nylon je označení pro skupinu syntetických polymerů, které jsou také často označovány jako polyamidy. Nylon je první syntetický polymer a první syntetické vlákno, které bylo vyrobeno přímo z uhlí, vody a vzduchu, a které mělo komerční úspěch.

Studovaný materiál byl francouzským partnerem zakoupen od firmy Goodfellow. Jedná se o variantu nylon 6/66, což je pravděpodobně nejběžněji používaný typ. Výrobce udává 2 materiálové parametry: hustota  $1140\text{kg/m}^3$  a Youngův modul 3.3 GPa.

### 3.1.4. Al fólie

(materiál zasláný v rámci spolupráce s Výzkumným ústavem kovů, s.r.o., Panenské Břežany)

Hliníkové fólie ze slitiny AW – 3003 byly zaslány v podobě plátů o rozměrech cca 300 x 300 mm a tloušťce 77 mikrometrů. Tyto materiály jsou určeny k aplikacím v chladících jednotkách. Chemické složení materiálu je uvedeno v tabulkách 1 a 2. Materiál byl odlit metodou spojitého odlévání mezi rotující válce (tzv. *Twin-roll casting*). Odlity měly nejdříve tloušťku 8,5 mm a poté válcovány za studena na tloušťku 1,1 mm. Následně byly popouštěny při teplotě v rozsahu 220-380°C a doválcovány na finální tloušťku.

**Tabulka 1.:** Složení materiálu AW - 3003

Slitina		Mn	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti
AW - 3003	min	1.0	-	-	0.05	-	-	-
	max	1.5	0.6	0.7	0.2	0.05	0.1	0.05

**Tabulka 2.:** Konkrétní složení zasláné tavby

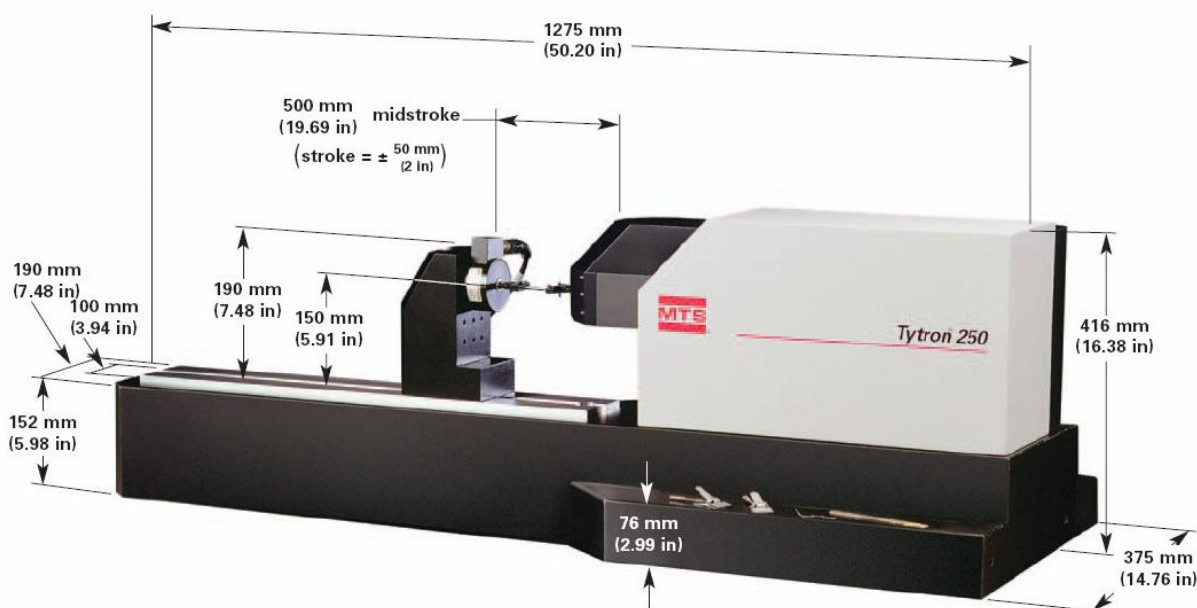
Tavba	Slitina	Vzorky	Mn	Si	Fe	Cu
E 217/03	AW - 3003	S*	1.13	0.11	0.32	0.14

## 3.2. STROJ MTS TYTRON 250 – POPIS VÝROBCE

### 3.2.1. Úvod

V této kapitole je uveden popis, technická data a využití testovacího stroje MTS Tytron 250, který uvádí ve svém propagačním materiálu výrobce, tedy společnost MTS [18]. Současně jde o jediný dostupný informační materiál o tomto zkušebním zařízení. Praktické zkušenosti s vlastnostmi stroje, které jsou někdy v rozporu s tvrzeními výrobce, jsou uvedeny v kapitole 5.

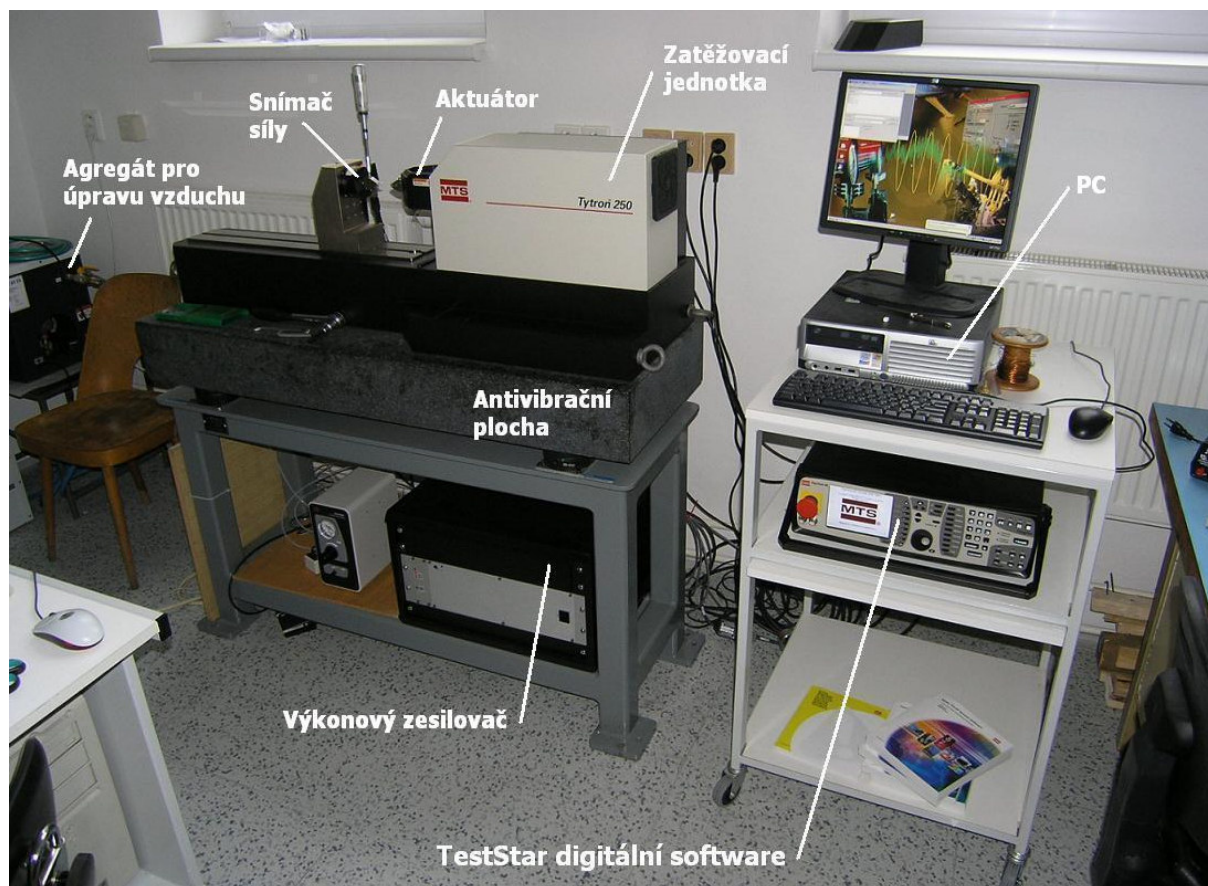
MTS Tytron 250 (viz. obr. 43) je univerzální zkušební stroj navržený pro testování miniaturních zkušebních vzorků. Jedná se o flexibilní, přesný a ve své kategorii unikátní zkušební stroj, neboť pro jeho konstrukci byla použita zcela ojedinělá technologie, principiálně odlišná od dosavadních konvenčních testovacích strojů. Výjimečnost tohoto zařízení tkví nejen v rozměrech zkušebních vzorků, ale především v bezkontaktním uložení jeho pojezdového zařízení, realizovanému pomocí tenké vzduchové vrstvy. V dnešní době, již ale konkurenční firma Instron vyvinula zkušební stoj s označením MicroTester<sup>TM</sup>, pracující na podobném principu.



Obr. 43. Testovací stroj MTS Tytron 250

### 3.2.2. Části testovacího systému Tytron 250

Testovací systém (uvedený na obr. 44) je složen z několika zařízení, z nichž každé zajišťuje určitou funkci.



Obr. 44. Popis kompletního testovacího systému MTS Tytron 250

#### Pohonná jednotka

Pohonnou jednotkou zkušebního stroje MTS Tytron 250 je lineární stejnosměrný servomotor s uzavřeným regulačním servoobvodem, který je schopen vyvinout rychlost v rozsahu 1  $\mu\text{m/hod}$  až 0.5 m/sec.

Posuvový člen (aktuátor) je uložen na tenké vzduchové vrstvě, která plní funkci nosného média. Touto technologií je docíleno plynulé přemísťování aktuátoru bez tření. Aktuátor je ovládán pomocí elektromagnetů. Jeho rozsah pohybu je 10 cm. Jedna upínací čelist je připevněna na aktuátoru, druhá na jezdcí, který je během zkoušky nepohyblivý. Jezdce je možno posunovat tak, že pracovní vzdálenost mezi ním a aktuátorem lze volit v rozsahu 0 až 500 mm. Tato variabilita umožňuje testovat zkušební vzorky s různou měrnou délkou a vkládání příslušenství a komor pro simulaci nejrůznějších prostředí.

Podrobnější informace o tomto novém principu pohonu se nám nepodařilo zjistit, neboť nejsou výrobcem zveřejňovány z důvodů ochrany výrobního tajemství.

#### Snímače síly

V základní výbavě Tytronu 250 jsou obsaženy dvě siloměrná zařízení (loadcell) kalibrována v rozsahu  $\pm 250 \text{ N}$  a  $\pm 25 \text{ N}$ . Jejich rozlišení je 25 mN.



K dispozici jsou i citlivější měřiče síly kalibrované v rozsahu:

- 1)  $\pm 25$  N a  $\pm 2,5$  N. Rozlišení činí 2,5 mN. Jsou-li správně připevněny, výrobce garantuje nosnost 2 kg.
- 2)  $\pm 5$  N a  $\pm 1$  N. Rozlišení činí méně než 1 mN. Jsou-li správně připevněny, výrobce garantuje nosnost 500 g. Tento snímač byl také zakoupen na ÚFM.

### Snímač přemístění s vysokým rozlišením

Uvnitř zatěžovací jednotky je vestavěn snímač přemístění (LVDT) pokrývající celý rozsah pohybu aktuátoru. Kromě toho je možné zapojit snímač menšího rozsahu, zato vyšší přesnosti měření. Tento měřící člen (fine displacement gage; viz. obr. 45) slouží pro přesnější snímání polohy aktuátoru, není tedy připevněn na vzorek (což je vzhledem k rozměrům vzorků vyloučeno pro jakýkoli kontaktní snímač). Je možné jej připevnit na spodní část aktuátoru a získat tak přesnější data změny délky zkušební vzorku. Jeho pracovní oblast činí  $\pm 2$  mm s rozlišením vyšším než  $0,1 \mu\text{m}$  v  $\pm 200 \mu\text{m}$  rozsahu. Rovněž je dostupný snímač s pracovní oblastí  $\pm 6$  mm a rozlišením  $0,0003$  mm.



Obr. 45. Snímač přemístění s vysokým rozlišením

### Upínací čelisti

Výrobce nabízí několik typů upínacích čelistí:

- 1) 110 N ... pneumatické čelisti
- 2) 250 N ... mechanické čelisti
- 3) 100 N ... mechanické čelisti s 15 mm širokým ozubením (pro vzorky do tloušťky až 4 mm)
- 4) čelisti umožňující tři nebo čtyř bodový ohyb
- 5) čelisti typu „Clothes Pin“ („kolíčky na prádlo“) ... pro nízké síly ( $\leq 10$  N)

### Antivibrační stůl

Zkušební stroj je umístěn na antivibračním pneumatickém stole s horní žulovou deskou. Účelem je udržovat pohonnou jednotku v klidu tím, že stůl tlumí a vyrovnává vnější vibrace, které mohou negativně ovlivnit průběh samotné zkoušky. Zároveň má stroj speciální rám zajišťující vysokou tuhost celého zařízení. Jde o obdobné zařízení, jaké se používá i v některých typech mikroskopů atomárních sil.

### **Vzduchový agregát**

Zkušební stroj vyžaduje pro svoji funkci nepřetržitou dodávku vzduchu o tlaku  $6 \div 8$  barů. Vzduch musí být zbavený vlhkosti a nečistot, s rozptýleným olejem, který zajišťuje mazání pneumatických prvků. Výrobce dodává moduly pro úpravu vzduchu a spotřební materiál k této jednotce. Stlačený vzduch je poskytován kompresorem, který není na obr. popř. vidět, protože je umístěn v suterénu budovy. Tím je zajištěno, že vibrace kompresoru se nepřenesou do místnosti se zkušebním strojem.

### **Řídící elektronika**

MTS Tytron 250 obsahuje moderní řídicí systém MTS TestStar™ IIs, který podporuje velmi přesné testování, umožňuje vysokorychlostní číslicovou kontrolu a pokročilý software pro náročné testy. Součástí je i (vestavěná) interní paměťová oblast pro ukládání software-ových doplňků a příslušenství, databázi a zálohu dat vzorků, aj. Ovládání řídicího systému je stejné jako u všech (předchozích) produktů MTS a provádí se pomocí ovládacího panelu nebo prostřednictvím PC v rozhraní Windows. Ovládací prvky zahrnují panely pro nadefinování parametrů zkoušek, jako nastavení snímače síly, nastavení limit, auto-nulování snímačů, atd.

### **Výkonový zesilovač**

Výkonový zesilovač slouží pro dodávku stejnosměrného proudu zatěžovací jednotce.

### **Software**

Celý stroj je ovládán přes PC prostřednictvím softwaru vyvinutého firmou MTS pro všechny její zatěžovací stroje „TestStar software“. Je to uživatelské rozhraní sloužící pro nastavování testů, generování zátěžových funkcí, řízení lineárního servomotoru, kontrolu nadefinovaných limit, ukládání naměřených dat, jejich analýzu a pro připojení k síti. Výrobce uvádí dokonce možnost dálkové kontroly probíhajících testů prostřednictvím internetu.

V místnosti je rovněž umístěn agregát pro ohřev a vysouší přiváděného pracovního vzduchu do stroje.

### 3.2.3. Technické parametry testovacího stroje MTS Tytron 250

Technická data zkušebního stroje MTS Tytron 250 jsou pro přehlednost uvedeny v následující tabulce 3:

**Tabulka 3.:** Technické parametry testovacího stroje MTS Tytron 250

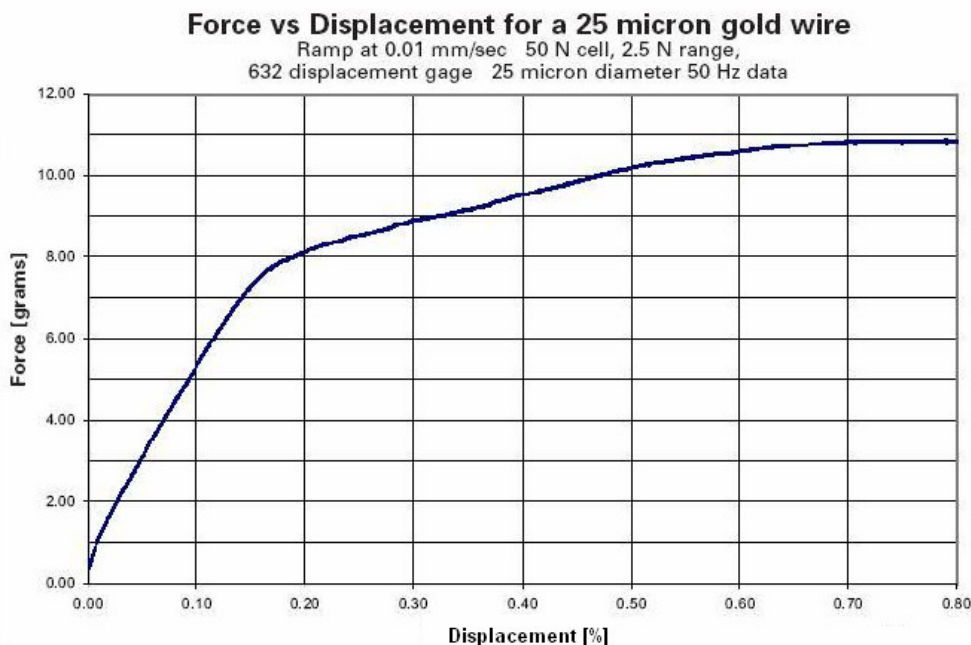
<b>MTS Tytron 250 Technické parametry</b>	
Orientace	Horizontální
Pohyb aktuátoru	100 mm
Testovací prostor	0 ÷ 500 mm
Max. rychlost aktuátoru	500 mm/s
Maximální zatížení	± 250 N
Režim řízení síly	Ano
Režim řízení deformace	Ano
Frekvence	až 50 Hz
Napájení	100, 110, 220, 240 V (jednofázový)
Půdorys	1275 mm x 375 mm
Hmotnost	170 kg
<b>Snímač přemístění</b>	
Rozlišení (normální)	0,005 mm
Rozlišení (s vysokým rozlišením)	0,0001 mm
<b>Lineární servomotor</b>	
Rozsah rychlosti	0,0000003 ÷ 500 mm/s
Rozsah frekvence	0,001 ÷ 50 Hz
<b>Vzduchotechnika</b>	
Tlak	6 ÷ 8 Bar
Průtok	128 l/min
Max. velikost částic	0,05 µm
Rosný bod	(-20 °C)
<b>TestStar IIs</b>	
Použitelné A/D kanály	6 kanálů
Použitelné D/A kanály	6 kanálů
D/A kanály	2 kanály
A/D a D/A rozlišení	16 bit
Digitální vstup/výstup	4 vstup / 4 výstup

### 3.2.4. Možnosti využití MTS Tytonu 250

Na stroji MTS Tytron 250 je možné testovat miniaturní zkušební vzorky díky zátěžným silám pohybujícím se na stupnici v řádu desítek  $\mu\text{N}$  a snímači síly s rozsahem  $0,001 \div 250 \text{ N}$ . Lze provádět tyto typy mechanických zkoušek: tah, tlak, cyklické zatěžování a tři nebo čtyř bodový ohyb, přičemž při testech může být řízena buď síla, přemístění nebo deformace.

Plejáda materiálů, jež je tento stroj schopen otestovat zasahuje do celé řady průmyslových odvětví, od strojírenství přes elektrotechniku, lékařství, atd. U materiálů pro strojírenské aplikace je cílem zjišťovat zejména mechanické vlastnosti, které jsou následně využity při návrhu a konstruování nových nebo stávajících výrobků. V oboru elektroniky, může být tento systém využit pro simulaci tepelného cyklování u součástek vystavených tepelné únavě, která způsobuje tepelnou dilataci. Výrobce uvádí, že únavová data jsou zde získána v mnohem kratším čase (z měsíců na dny) než v případě reálného teplotního cyklování. Elektronické součástky, jež je možné tímto strojem testovat jsou např. integrované obvody, tenké vrstvy a fólie, zlaté izolační svorky, popř. dráty, plastové izolace vodičů, nástřikové vrstvy kovů, aj. V oboru lékařství může jít o simulaci zatížení a deformace biologických implantátů (měkkých tkání), jimž budou vystaveny po jejich implantování. Tuto simulaci umožňuje použití příslušenství, konkrétně environmentální komory, o níž bude zmínka později. Dále je možné tento testovací stroj využít pro zjišťování materiálových charakteristik polymerů, čistých materiálů, kompozitů a jejich (fázového) rozhraní. V neposlední řadě se jedná o užitečným pomocníkem při analytické modelování. Získaná data mohou být použita jako vstupní hodnoty pro modelování v metodě konečných prvků a potvrdit nebo zpřesnit předpoklady modelu.

Na obr. 46 je pro zajímavost uveden záznam zkoušky v tahu zlatého vlákna o průměru  $25 \mu\text{m}$ , který výrobce uvádí v propagačních materiálech testovacího stroje MTS Tytron 250.



Obr. 46. Záznam tahové zkoušky Au vlákna o průměru  $25 \mu\text{m}$

### 3.2.5 Příslušenství

Výrobce k testovacímu stroji nabízí sortiment příslušenství, s jejíž pomocí je uživatel schopen přiblížit podmínky zkoušky podmínkám, jimž je zatěžovaný vzorek v reálu vystaven a získat tak co nejpřesnější data z prováděných mechanických zkoušek. Přehled nejdůležitějšího příslušenství je uveden v následujících odstavcích.

#### **Komory**

- *horká/studená komora*: umožňuje regulaci teploty, jíž je zkušební vzorek vystaven. Teplotní interval činí -75 až 200 °C. Dále tato komora izoluje hluk a chvění vzniklé při testu a zabraňuje ovlivnění vzorku vzduchem, který vytváří tenkou vrstvu pro bezkontaktní pohyb aktuátoru.

- *environmentální-tekutinová komora*: umožňuje zatěžovat zkušební vzorek, který je ponořen ve fyziologickém roztoku (obvykle vodní roztok 1 % NaCl) simulující podmínky živého organismu za současné konstantní teploty 37 °C.

#### **Mikroskop**

MTS Tytron 250 může být také vybaven optickým mikroskopem pro vizuální kontrolu vzorků v průběhu testování.

### 3.3. PŘEHLED TESTOVANÝCH VZORKŮ

Přehled všech testovaných vzorků s uvedením čísla vzorku, způsobu uchycení, typu zkoušky a zhodnocení zkoušky je uspořádán do následující tabulky 4. Jednotlivé způsoby uchycení jsou popsány dále v kapitole 1.4. Ve sloupci zhodnocení zkoušky používáme tyto symboly: OK zkouška proběhla v pořádku a je platná, X neplatná zkouška (ať již díky vibračním stroje, problému s uchycením nebo z jiného důvodu).

**Tabulka 4.:** Přehled testovaných vzorků

Číslo vzorku	Způsob uchycení	Typ zkoušky	Zhodnocení zkoušky
<b>Al vlákna 125 µm</b>			
Al vlákno 125 µm_01	epoxid	tahová	X
Al vlákno 125 µm_02	epoxid	tahová	OK
Al vlákno 125 µm_06	Belzona	tahová	OK
Al vlákno 125 µm_08	Belzona	tahová	OK
Al vlákno 125 µm_09	Belzona	tahová	OK
Al vlákno 125 µm_10	brusný papír	tahová	OK
<b>Al vlákna 500 µm</b>			
Al vlákno 500 µm_01	epoxid	tahová	X
Al vlákno 500 µm_02	Belzona	tahová	X
Al vlákno 500 µm_04	Belzona	tahová	X
Al vlákno 500 µm_05	Belzona	tahová	OK
Al vlákno 500 µm_06	brusný papír	tahová	OK
Al vlákno 500 µm_07	brusný papír	tahová	OK
<b>Al vlákna 180 µm</b>			
Al vlákno 180 µm_01	epoxid	tahová	OK
Al vlákno 180 µm_02	epoxid	tahová	OK
Al vlákno 180 µm_03	epoxid	tahová	X
Al vlákno 180 µm_04	epoxid	relaxace	OK
Al vlákno 180 µm_05	epoxid	tahová	X
Al vlákno 180 µm_06	epoxid	tahová	X
Al vlákno 180 µm_07	epoxid	tahová	OK
Al vlákno 180 µm_08	Belzona	tahová	X
Al vlákno 180 µm_11	Belzona	tahová	OK
Al vlákno 180 µm_12	Belzona	relax+zm rych	X
Al vlákno 180 µm_13	Belzona	relax+zm rych	OK
Al vlákno 180 µm_14	Belzona	relax+zm rych	OK
Al vlákno 180 µm_15	brusný papír	relax+zm rych	OK
Al vlákno 180 µm_16	brusný papír	relax+zm rych	OK
<b>Nylonová vlákna 250 µm</b>			
Nylonové vlákno 250 µm_01	epoxid	tahová	X
Nylonové vlákno 250 µm_02	epoxid	tahová	X
Nylonové vlákno 250 µm_03	brusný papír	zm rych	OK
Nylonové vlákno 250 µm_04	brusný papír	proc odtížení	OK
Nylonové vlákno 250 µm_05	brusný papír	zm rych	OK
Nylonové vlákno 250 µm_06	brusný papír	tah rychlá	OK
Nylonové vlákno 250 µm_07	brusný papír	tah pomalá	OK

**Tabulka 4.:** Přehled testovaných vzorků (pokračování tabulky)

Číslo vzorku	Způsob uchycení	Typ zkoušky	Zhodnocení zkoušky
<b>Nylonová vlákna 500 <math>\mu\text{m}</math></b>			
Nylonové vlákno 500 $\mu\text{m}$ _04	brusný papír	proc odtížení	OK
Nylonové vlákno 500 $\mu\text{m}$ _05	brusný papír	tah rychlá	OK
Nylonové vlákno 500 $\mu\text{m}$ _06	brusný papír	tah pomalá	OK
Nylonové vlákno 500 $\mu\text{m}$ _07	brusný papír	zm rych	OK
<b>Al fólie 77 <math>\mu\text{m}</math> stříh pás</b>			
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ stříh pás_03	čelisti	tahová	OK
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ stříh pás_04	čelisti	únava	OK
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ stříh pás_10	čelisti		X
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ stříh pás_11	čelisti	tahová	OK
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ stříh pás_12	čelisti	tahová	OK
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ stříh pás_13	čelisti	únava	X
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ stříh pás_14	čelisti	únava	OK
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ stříh pás_15	čelisti	únava	OK
<b>Al fólie 77 <math>\mu\text{m}</math> H-typ</b>			
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-typ_01	čelisti	tahová	X
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-typ_02	čelisti	únava	OK
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-typ_03	čelisti	tahová	X
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-typ_04	čelisti	tahová	OK
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-typ_05	čelisti	tahová	OK
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-typ_06	čelisti	tahová	OK
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-typ_07	čelisti	zm rych	OK
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-typ_08	čelisti	únava	OK
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-typ_09	čelisti	únava	OK

### 3.4. ZPŮSOBY UPÍNÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

#### 3.4.1. Upínání tenkých vláken pomocí epoxidového lepidla

V odborném článku N. Chawly a M. Kerra [14], jehož výtah je uveden v kapitole 2.5. této diplomové práce a v němž je popsáno testování (tah a únava) dvou typů keramických vláken Nextel 312 a Nextel 610 na zkušební stroji MTS Tytron 250 autoři uvádějí, že pro snazší uchycení zkušebních vzorků do čelistí zkušebního stroje použili v tomto experimentu techniku papírových rámečků uvedenou v ASTM normě z roku 1989 pro testování vláken [19]. Na tyto papírové rámečky přilepovali testované keramické zkušební vzorky pomocí epoxidového lepidla. Tato americká norma však byla v roce 1998 stažena, neboť jí v tomto roce vypršela platnost a nebyla nahrazena novou platnou normou, dle nařízení normativního institutu ASTM.

I přesto, že tato norma již není v platnosti, byla technika papírových rámečků použita i v tomto diplomovém projektu z důvodů rozměrů zde testovaných vzorků. Jako první způsob upínání testovaných vláken bylo stejně jako v experimentu N. Chawly a M. Kerra použito epoxidové lepidlo a papírová podložka. V tomto projektu bylo konkrétně použito běžné dvousložkové rychleschnoucí epoxidové lepidlo GAT. Pro ilustraci je na obr. 47 uvedeno Al vlákno o průměru 180  $\mu\text{m}$  jenž bylo připraveno replikační technikou a pro jehož upnutí byla použita právě kombinace epoxidového lepidla a papírové podložky.

Obě tyto pomůcky, tj. papírová podložka a epoxidové lepidlo, plní několik funkcí. Papírový rámeček tvoří nosnou podložku, která má za úkol usnadňovat manipulaci se vzorky těchto rozměrů a zároveň snižovat riziko jejich poškození během jejich upínání do čelistí zkušebního stroje.

Epoxidové lepidlo jenž slouží jednak pro přichycení testovacích vláken k papírovým rámečkům, tvoří také pevnou obálku okolo vlákna v místech jeho upínání do čelistí zkušebního stroje, a tím jej chrání před poškozením, neboť ostré hrany čelistí mohou citelně poškodit povrch vzorku. Tato vlákna mají konstantní průřez, není u nich tedy tvarově odlišena měrná délka  $l_0$  od upínací části, proto je poškozena přímo měrná část zkušebního vzorku. Vyvolaný vrubový účinek v místě poškození způsobí předčasné přetržení zkušebního vzorku v průběhu testu a materiálové charakteristiky, tedy výstupní data takovéto zkoušky, nedosáhnou hodnot, jakých by bylo dosaženo na vzorku bez vrubu. Dále musí mít epoxid dostatečnou tuhost, aby byl schopen přenášet definované zatížení zkušebního stroje přímo na vzorek a současně se nesmí v průběhu mechanické zkoušky významně deformovat. Jinak zde opět vyvstává pochybnost nad objektivností zkoušky a správností výstupních dat, neboť takto naměřená data nesouvisí pouze s deformacemi vzorku, ale mohou z části vypovídat také o elastickém popř. elasticko-plastickém chování tohoto lepidla. Dále musí epoxid zaručovat dobrou adhezi (přilnavost) na rozhraní epoxidové hmoty a povrchu vlastního zkušebního vzorku, aby v průběhu zkoušky nedocházelo k povytahování, neboli pokluzům vlákna vůči epoxidové matici. Dále nesmí tento fixační materiál chemicky narušit povrch vzorku, neboť by se opět jednalo o oslabení příčného průřezu zkušebního tělesa a již zmíněný vrubový účinek. V neposlední řadě je epoxid relativně levná a snadno dostupná surovina a samotná příprava zkušebních vzorků je minimálně náročná.

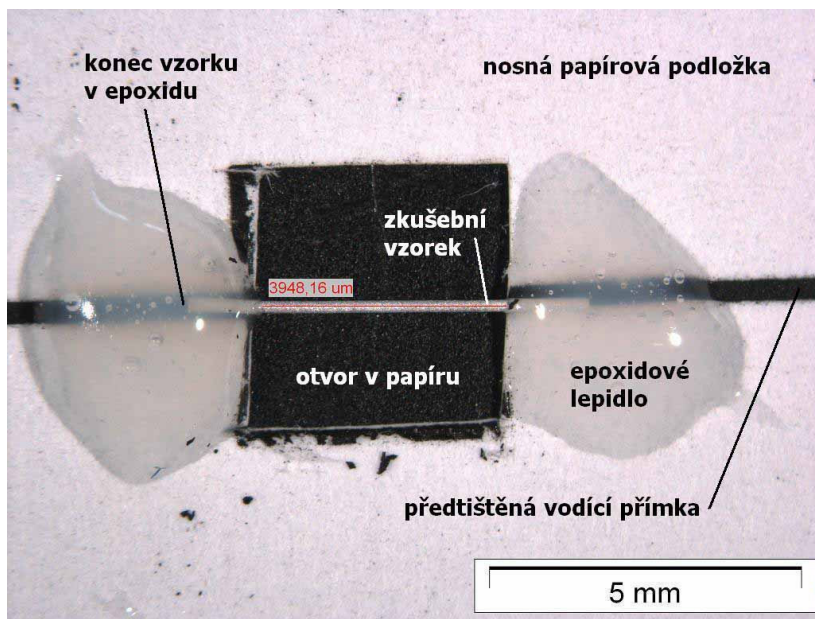
Byly navrženy dva rozměry měrných délek, a tedy stanoveny dva typy zkušebních vzorků, krátké (měrná délka cca 4 mm) a dlouhé (měrná délka cca 11). S rostoucí měrnou délkou, se snižuje hodnota relativní chyby měření, tzn. že dlouhé zkušební vzorky mají lepší statistickou naměřených výstupních dat. Obecně lze říci, že čím je zkušební vzorek delší, tím jsou získaná data mechanických zkoušek přesnější. S rostoucí měrnou délkou se však na povrchu nebo uvnitř vzorku zvyšuje počet vad, na nichž může iniciovat trhlinka.

Pro oba typy zkušebních vzorků byly v programu AutoCAD narýsovány obrysy nosných papírových rámečků, jejichž rozměry vycházejí z navržených měrných délek. Pomocí běžné kancelářské tiskárny byly natištěny v celých sériích na tvrdý bílý papír formátu A4. Tyto plata byla následně rozstříhána na jednotlivé kusy a v každém z nich byl skalpelem vyříznut obdélníkový popř. čtvercový otvor, jehož délka strany odpovídala měrné délce konkrétního zkušebního vzorku. Otvor je v papírové podložce zhotoven proto, aby se v průběhu testu zabránilo kontaktu funkční části vzorku s tímto nosným přípravkem a tedy negativnímu ovlivnění výsledku zkoušky způsobeného třením. Současně byly na papírové podložce předtištěny pomocné osy, jenž slouží pro udržení přibližné rovnoběžnosti zkušebního vlákna s okraji této podložky při jeho přilepování. Poznamenejme, že na jeden papírový rámeček se nalepuje vždy pouze jediný zkušební vzorek.

Samotný proces lepení je následující. Ze svitku hliníkového vlákna byl nůžkami odstřížen zkušební vzorek. Jeho délka  $l_0$  je navýšena o přídavky, které slouží pro přichycení tohoto vlákna na papírovou podložku. Výjimku tvoří pouze Al vlákna o průměru 180  $\mu\text{m}$ ,



jenž nám byly zaslány s již danými rozměry (maximální délka jen 7 mm). Na okraje vyříznutého otvoru byly umístěny kapky epoxidu, přičemž množství bylo zvoleno tak, aby volné konce vzorku z epoxidu po zatuhnutí nevyčnívaly. Vlákno bylo umísťováno do epoxidové hmoty pomocí pinzety. Snahou je, aby vlákno nebylo v kontaktu s podložkou, tj. aby celý jeho povrch byl obalen epoxidem. V místě kontaktu by mohla být snížena adheze, což může výrazně zvyšovat riziko pokluzů vlákna vůči epoxidové hmotě během zkoušky. Celá operace lepení musí být navíc provedena v relativně krátkém časovém intervalu, neboť lepidlo poměrně rychle tuhne a hrozí nedokonalé přilnutí epoxidové hmoty na povrch vzorku. Papírový rámeček s již nalepeným vzorkem, byl následně ponechán v klidu při pokojové teplotě po dobu dvou hodin (dle návodu) během níž dojde ke ztuhnutí a současně vytvrzení epoxidového lepidla.



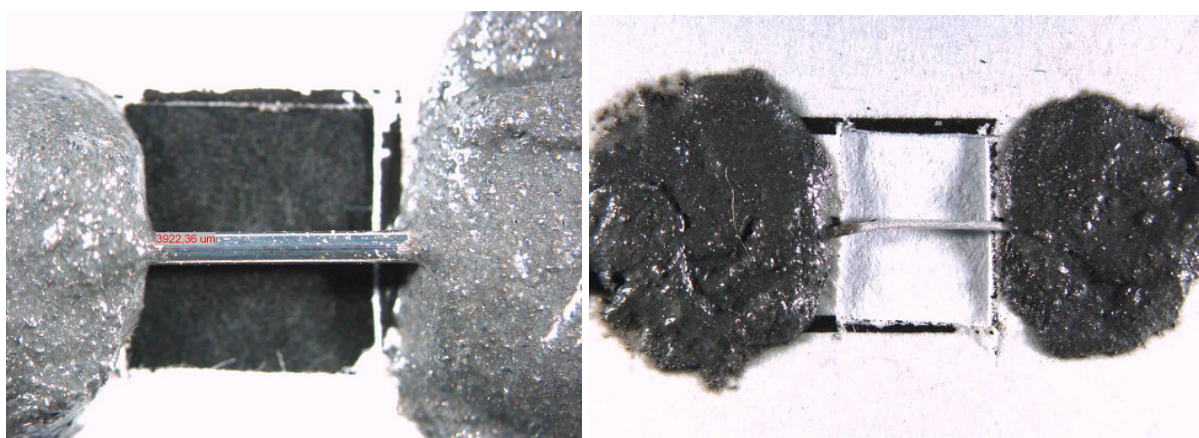
Obr. 47. Al vlákno o průměru 180  $\mu\text{m}$  připravené replikační technikou upnuté pomocí epoxidového lepidla

### 3.4.2. Upínání tenkých vláken pomocí Belzony®

Jako druhý způsob přichycení zkušebních vzorků-vláken na povrch papírového rámečku byl pomocí materiálu s obchodním názvem Belzona. Belzona je dvousložkové lepidlo na bázi polymerů a oligomerů s vysokou molekulární hmotností, který se v technické praxi obecně používá na opravy a inovace strojů a zařízení poškozených korozně-erozním působením. Na trhu je k dostání velké množství různých typů Belzony. V tomto projektu byl konkrétně použit typ Belzona® 1311, který je charakteristický nejvyššími pevnostními charakteristikami. Na rozdíl od běžného epoxidového lepidla jsou u této hmoty výrobcem zaručeny výrazně lepší fyzikální a mechanické vlastnosti, jako např. pevnost v tlaku 914  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (dle normy ASTM D695), pevnost v ohybu 703  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (dle normy ASTM D790), tvrdost podle Rockwellovy stupnice R104, smršťování min. 0,0 % a max. 0,005 % , dále otěruvzdornost, odolnost spojení s opískovaným povrchem ve stříhu, odolnost proti korozi, teplotní odolnost, odolnost proti úderu a chemická odolnost. Tento typ Belzony je pro své vlastnosti nazýván Ceramic R –metal.

Samotný postup přípravy zkušebních vzorků je téměř identický s přípravou pomocí epoxidového lepidla, liší se pouze poměrem komponent Belzony a dobou tuhnutí. Belzona je stejně jako epoxidové lepidlo dvousložková hmota sestávající ze základní složky (tmavě-šedé barvy) a tvrdidla (žluto-bílé barvy). Jejich poměr mísení činí váhově 5 : 1 a objemově 3 : 1. Výrobce v návodu udává různé doby nutné pro ztuhnutí (a vytvrzení) Belzonové hmoty v závislosti na teplotě okolí a tloušťce vrstvy. V našem případě byly papírové rámečky s nalepenými vzorky ponechány v klidu při pokojové teplotě po dobu nejméně 20 hodin. Na obr. 48 jsou uvedeny dva typy zkušebních Al vláken připravených pomocí Belzony a nosné papírové podložky pro upnutí do čelistí testovacího stroje, konkrétně jde o Al vlákno 500  $\mu\text{m}$  (vlevo) a Al 180  $\mu\text{m}$  (vpravo).

Závěrem poznamenejme, že také při tomto způsobu přípravy zkušebních vzorků je snaha, aby vlákno po umístění do Belzonové hmoty nebylo v kontaktu s papírovou podložkou, z důvodu snížené adheze mezi povrchem vzorku a Belzonou během testu, což může částečně komplikovat skutečnost, že Belzona není na rozdíl od epoxidového lepidla transparentní.



Obr. 48. Al vlákno 500  $\mu\text{m}$  (vlevo) a Al 180  $\mu\text{m}$  (vpravo) připravené pomocí Belzony a papírového rámečku

### 3.4.3. Příprava zkušebních vzorků z Al fólií o tloušťce 0,077 mm

#### 3.4.3.1. Stříhané pásky

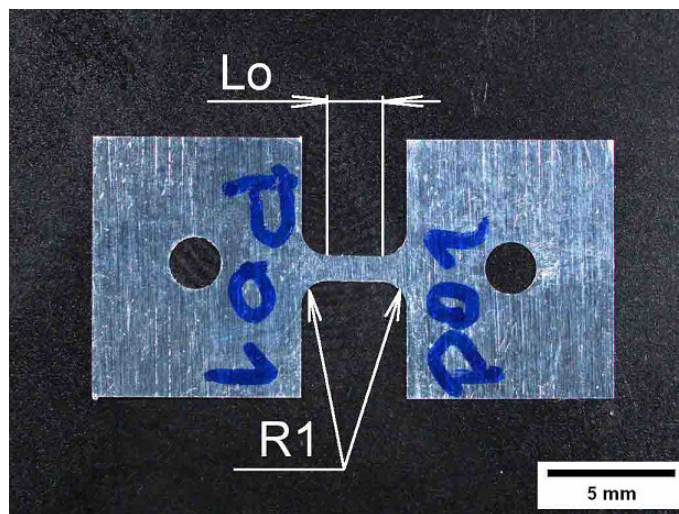
Prvním (pokusným) typem zkušebních vzorků z Al fólií byly ručně stříhané pásky. Z hliníkových plátů o rozměrech cca 300 x 300 mm, jež nám byly zaslány, byly nastříhány jednotlivé zkušební vzorky ve tvaru obdélníku. Vzorky byly určeny jak pro tahové, ale také i únavové zkoušky. Délka činila přibližně 40 mm a šířka se pohybovala v rozmezí 4÷5 mm. Na obr. 49 je uveden makro-snímek tohoto typu zkušebních vzorků (již po lomu). Vzorky měly konstantní průřez, tzn. neměly nijak tvarově odlišenu měrnou délku (např. zúžením šířky pásků), a za kterou se považoval rozměr mezi čelistmi zkušebního stroje po jejich upnutí. Šlo pouze o pokusné vzorky s cílem zjistit zhruba základní charakteristiky materiálu jako je mez kluzu a mez pevnosti a zejména získat zkušenosti s chováním stroje Tytron. Získaná materiálová data byla považována pouze za orientační a nejsou uvedena v kapitole shrnující výsledky.



Obr. 49. Makro-snímek zkušební vzorku stříhaných pásků po lomu

### 3.4.3.2. H – vzorky

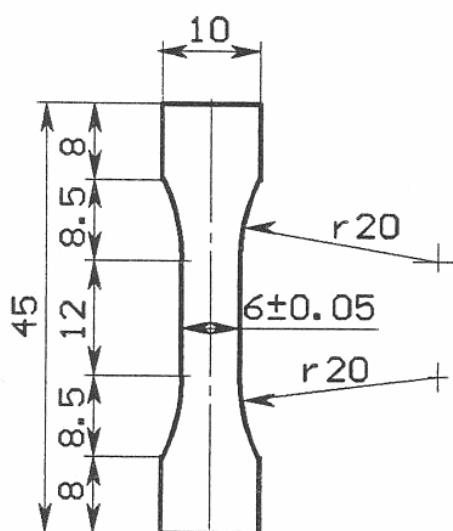
Druhý typ zkušebních vzorků připomíná svým tvarem písmeno H a byl z Al fólie o tloušťce 77  $\mu\text{m}$  připraven frézováním na francouzské univerzitě v Poitiers. Makro-snímek tohoto vzorku je uveden na obr. 50. Na rozdíl od předchozího typu má tvarově definovanou měrnou délku  $L_0$ , jejíž rozměr činí 2 mm. Šířka v místě měrné délky vzorku je 1 mm. Měrná délka je na obou stranách zakončena rádiusy o poloměru 1 mm, které představují plynulý přechod do upínacích částí vzorku. Technologie přípravy vzorků frézováním provádí francouzské partnerské pracoviště již delší dobu a dle jejich sdělení je kvalita výsledného vzorku dostatečná k tomu, aby drsnosti hran po obvodu neovlivňovala měřené mechanické veličiny, zejména mez pevnosti. Tyto vzorky jsou tedy vhodné pro tahové zkoušky.



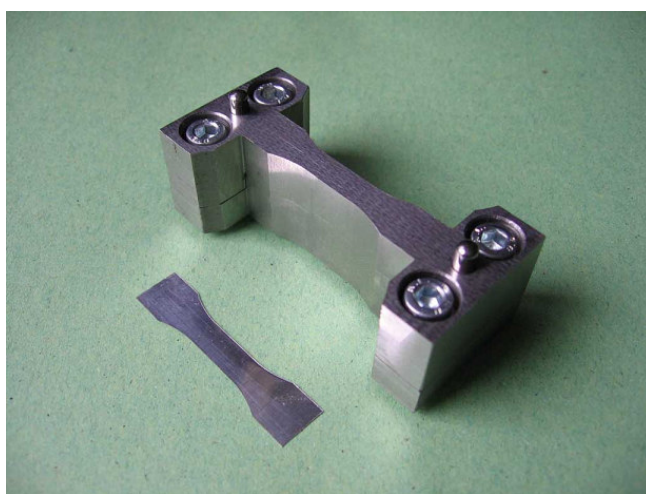
Obr. 50. Makro-snímek zkušební vzorku H-typ o tloušťce 77  $\mu\text{m}$

### 3.4.3.3. R20 – vzorky

Předchozí H – typ zkušebních vzorků byl navržen pro tahové zkoušky materiálu Al fólie a pro získání orientačních hodnot materiálových charakteristik tohoto materiálu. Rádus výběhu měrné části je ovšem pouze 1 mm, což je nevyhovující pro cyklické zkoušky. Na základě měření na H vzorcích byl navržen tvar a vypočteny rozměry třetího typu zkušebních vzorků z Al fólií pro systematické měření únavových vlastností těchto fólií, což bylo také jedním z hlavních cílů této diplomové práce. Tvar a rozměry těchto zkušebních vzorků jsou patrné z obr. 51. Pro dokončovací operaci těchto vzorků byl zhotoven přípravek (viz. obr. 52), do něhož bylo možné upnout sendvič několika Al vrstev vzájemně oddělených jemným papírem a finální rozměr části s měrnou délkou byl dokončen broušením. Povrch hran vzorků má díky této závěrečné operaci velmi malou drsnost. V porovnání s předchozím typem mají tyto vzorky mnohem pozvolnější přechod mezi měrnou částí na upínací částí vzorku. Velikost rádiusu je v tomto případě 20 mm. Tyto dva aspekty, tj. velmi málo členitý povrch hran a vysoká hodnota rádiusu znesnadňující iniciaci únavových trhlin z povrchu signalizuje, že jde o vhodné zkušební vzorky pro testování únavy tenkých fólií.



Obr. 51. Okótovaný schématický náčrt zkušebního vzorku R20



Obr. 52. Zkušební vzorek R20 a přípravek pro broušení měrné části tohoto typu zkušebních vzorků

## 3.5. POSTUP PROVÁDĚNÍ EXPERIMENTU

### 3.5.1. Al vlákna uchycená pomocí epoxidu nebo Belzony

V této části je popsán postup upínání zkušebních vzorků, které byly pro zkoušku připraveny pomocí papírového rámečky a epoxidového lepidla nebo Belzony. Zkušební stroj musí být během samotného upínání vzorku v chodu. Nejprve jsou nastaveny limity pro upínání vzorku. Limity jsou mezní hodnoty síly a prodloužení, jež stroj neustále snímá, a které nesmějí být během upínání překročeny. Před umístěním vzorku do čelistí je vynulována axiální síla, aby bylo zabráněno vnesení systematické chyby do měřených dat. Byly použity ploché čelisti, které jsou svírány pomocí imbusového šroubu. Pro dosažení konstantní upínací síly v čelistech při každém upínání je k utahování použit momentový šroubovák. Je tím současně zajištěna reprodukovatelnost jednotlivých testů.

Zkušební vzorek je nejprve upnut do čelisti u aktuátoru. Pojezdový motor stroje je zatím vypnutý. Pokud by byl v chodu během této fáze upínání, mohlo by při dotahování šroubu čelisti dojít k vychýlení aktuátoru. Protože zkušební stroj neustále snímá jeho polohu a permanentně se snaží vyrovnávat sebemenší odchylky od uživatelem nadefinované hodnoty a tuhost vzduchového pojezdového mechanismu je nízká, tzn. že aktuátor klade jen velmi malý odpor proti silám, jež mohou snadno vzniknout právě během upínání, řídicí jednotka, snažící se tyto výchylky vyrovnávat, může způsobit rozvibrování aktuátoru. Při překročení nastavených limit v síle nebo v přemístění je automaticky vypnut pojezdový motor. Toto vypnutí je doprovázeno podélným rázem aktuátoru (v ose stroje), při němž může dojít ke kontaktu upínaného vzorku s protilehlými čelistmi a k jeho poškození. Proto teprve, až je pravá část vzorku upnuta, je motor spuštěn.

Nyní je možné ovládat polohu aktuátoru. V režimu manuálního ovládání je aktuátor se vzorkem přemístěn na pozici, kde je možné upnout i jeho levou část do protějších čelistí, k nimž je připevněna měrná celá snímající působící sílu na testovaný vzorek. Současná poloha aktuátoru umožňuje přichycení snímače axiálního přemístění s vysokým rozlišením, což doposud nebylo možné, neboť jeho pracovní rozsah činí pouze  $\pm 1$  mm od nulové polohy. Tento druhý doplňkový snímač ovšem nebyl použit při každé zkoušce. V případě vzorků Al vláken s průměrem 180  $\mu\text{m}$ , majících měrnou délku kolem 4 mm, byl však použit vždy. Naopak u nylonových vláken s dlouhou měrnou délkou (40-50 mm) a předpokládaným větším protažením by rozsah snímače přemístění s vysokým rozlišením nebyl dostatečný.

Software zkušebního stroje umožňuje v souřadnicích čas – síla zobrazovat vibrace, jež vzniknou v důsledku změny tuhosti systému stroj – vzorek při dotahování druhých čelistí. Před upínáním levé části vzorku jsou nastaveny parametry tohoto zobrazovacího režimu. Tento krok je nutný, neboť v této fázi již motor běží a je tedy strojem korigována poloha aktuátoru. Během samotného dotahování čelisti obsluha neustále sleduje píky vzniklých vibrací, jež nesmějí opustit pásmo vymezené nadefinovanými limitami pro upínání. V případě jejich překročení hrozí opět vypnutí pojezdového motoru.

Pokud by byl pojezdový motor zkušebního stroje při upínání vzorku do čelisti s měrnou celou vypnutý, nebylo by nutné kontrolovat vibrace. Podélný ráz, který doprovází vypnutí motoru, vzniká však i při jeho zapínání. Proto tedy tento způsob snazšího upínání vzorku při vypnutém motoru není možný.

Bylo pozorováno, že během dotahování čelistí dochází k malému zvýšení síly (z nulové hodnoty na hodnotu nenulovou), která vzniká vzájemným posuvem obou protilehlých dílů čelistí vůči sobě při jejich dotahování. Domníváme se, že tento axiální posuv je způsoben tvarem zubů jimiž jsou opatřeny vnitřní strany čelistí, jež mají zabraňovat pokluzům testovaných vzorků. Proto je v některých případech nezbytné při dotahování vyrovnávat tyto účinky posuvem aktuátoru. Malé hodnoty síly vzorek nepoškodí, neboť se stále pohybujeme v elastické oblasti deformace. Pokud by ale síla takto indukovaná ve vzorku překročila

elastickou mez, dojde k jeho deformaci a před-deformovaný vzorek již není možné použít pro mechanickou zkoušku. Před zahájením vlastní zkoušky je ve vzorku nastaveno mírné tlakové napětí (přibližně - 0,1 ÷ - 0,2) N, aby vzorek nebyl již na začátku testu předeplatý.

Dále je vynulován snímač axiálního přemístění, případně snímač přemístění s vysokým rozlišením, je-li při testu použit. Jsou nastaveny parametry zkoušky, jako např. rychlost deformace, maximální délka přemístění, jednotky snímaných veličin, jsou definovány kanály pro sběr dat aj. Jsou změněny ochranné limity hodnot pro upínání vzorku na ochranné limity pro průběh samotné zkoušky. Nůžkami je přestřížen nosný papírový rámeček po obou stranách měrné délky zkušební vzorku, resp. jsou z něj vystříženy části tohoto rámečku, aby bylo zabráněno vzájemnému kontaktu obou polovin podložky. V tomto okamžiku dochází opět ke změně tuhosti systému stroj – zkušební vzorek, neboť doposud nerostřížený papír plnil funkci tuhého členu a absorboval tak převážnou většinu nežádoucích napětí vzniklých při upínání. S touto změnou tuhosti souvisí opět možný vznik podélných vibrací aktuátoru, následné překročení limit a automatické vypnutí motoru. Jak amplituda podélných vibrací, tak ráz doprovázející vypnutí motoru, mohou opět zkušební vzorek poškodit, popř. zničit. Nedojde-li k žádným komplikacím při přestřihování papírové podložky, je vzorek připraven k mechanické zkoušce. Na obr. 53 je upnuto do čelistí zkušební stroje MTS Tytron 250 testovací Al vlákno o průměru 180  $\mu\text{m}$  pomocí epoxidového lepidla v kombinaci s papírovou podložkou, z níž jsou již vystříženy její části.

Na závěr je v ovládacím softwaru změněn mód z režimu osciloskopu, který zobrazoval vibrace, do režimu zaznamenávajícího průběh zkoušky a jsou nastavena vhodná měřítka os grafu. V tomto kroku jsou z tohoto zobrazovacího rozhraní odstraněny šumové signály, jež vznikly během rozstřihování nosného rámečku. Nyní je možné spustit mechanickou zkoušku.



Obr. 53. Zkušební vzorek (Al vlákno 180  $\mu\text{m}$ ) upnutý do čelistí testovacího stroje MTS Tytron 250 s vystříženými částmi papírové podložky

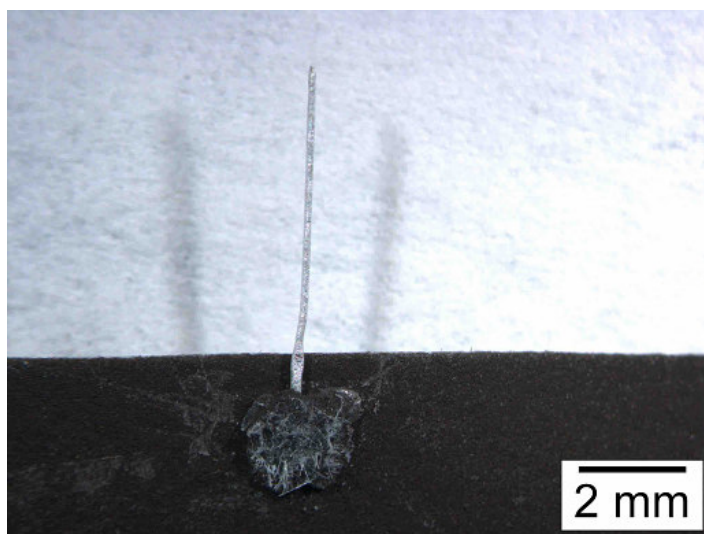
### 3.5.2. Vlákna upnutá pomocí brusného papíru

V následujícím textu je popsán postup upínání zkušebních vzorků, u nichž nebylo použito epoxidové lepidlo ani belzona v kombinaci s nosným papírovým rámečkem. Mezi čelistmi a vzorkem je umístěn pouze jemný brusný papír. S tímto způsobem upnutí byla otestována část vzorků Al vláken a všechny nylonové vzorky (tj. vlákna o průměrech 250  $\mu\text{m}$

a 500  $\mu\text{m}$ ). Byl použit jemný brusný papír s hrubostí 1000 (hrubost brusného papíru byla zvolena s přihlédnutím na rozměry testovaných vzorků). Tento brusný papír má plnit dvě hlavní funkce, za prvé chránit povrch vzorků před poškozením zuby upínacích čelistí a za druhé zabraňovat pokluzům těchto testovaných vláken v průběhu zkoušek.

Z archu brusného papíru byly vystříženy dva obdélníky o rozměrech přibližně 25 x 15 mm. Oba byly přehnuty na polovinu, s tím, že osa ohybu je rovnoběžná s jejich delší stranou. Takto přehnuté byly vloženy mezi upínací čelisti. Při volbě jejich rozměrů bylo vycházeno z parametrů upínacích čelistí, přičemž snahou bylo vytvořit určitý přesah, který jednak usnadňuje samotný proces upínání při centrování vzorku do zátěžné osy zkušebního stroje a podélný přesah chrání povrch vzorku před poškozením vnějšími hranami upínacích čelistí. Měrná délka těchto vzorků je vzdálenost mezi upínacími čelistmi zkušebního stroje na rozdíl od vzorků upínaných pomocí epoxidového lepidla nebo Belzony, u nichž je to rozměr vlákna mezi epoxidovou popř. Belzonovou hmotou.

V případě hliníkových vláken o průměru 180  $\mu\text{m}$ , jejichž celková délka (dodaných vzorků) činila přibližně 5 až 7 milimetrů, bylo na jeden ze smirků umístěno malé množství sekundového lepidla pro usnadnění manipulace při vkládání těchto zkušebních vláken do upínacích čelistí. Sekundové lepidlo však v tomto případě sloužilo pouze pro přichycení vlákna na povrch brusného papíru, tj. neplnilo žádnou zpevňující funkci jako v případě epoxidu nebo Belzony. Na obr. 54 je znázorněno Al vlákno o průměru 180  $\mu\text{m}$  po tahové zkoušce, jež bylo před upnutím do čelistí zkušebního stroje přilepeno na jeden z brusných papírů sekundovým lepidlem. Pro upínání nylonových zkušebních vzorků, jejichž měrná délka byla několikanásobně větší (kolem 50 mm) z důvodů získání lepší statistiky naměřených dat ze zkoušky, nebylo sekundové lepidlo použito.



Obr. 54. Al vlákno o průměru 180  $\mu\text{m}$  (po tahové zkoušce) přichycené k brusnému papíru pomocí sekundového lepidla

### 3.5.3. Vzorky z Al fólií

Vzorky typu H nebo R20 měly vyrobené upínací části – hlavy. Tyto fólie byly upínány přímo do čelistí bez použití brusného papíru. Postup upínání a zahájení zkoušky byl vždy stejný, jako je uveden v předchozí kapitole.

## 4. VÝSLEDKY

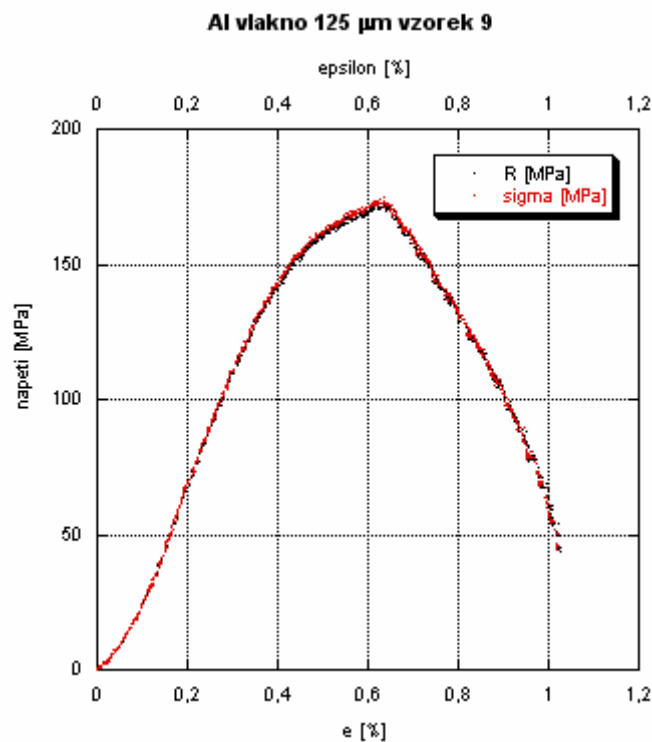
### 4.1. Al vlákna o průměru 125 $\mu\text{m}$ (tažené)

Tahové diagramy Al vláken o průměru 125  $\mu\text{m}$  jsou uvedeny na obr. 55 a 56. V těchto i všech následujících grafech jsou vždy uvedeny jak smluvní, tak skutečné hodnoty napětí a deformace. Smluvní hodnoty jsou vykresleny černými body a označené jako  $R$  a  $e$ ; skutečné hodnoty body červenými a označené  $\sigma$  a  $\epsilon$ .

Je vidět, že vlákna vykazují nevýraznou mez kluzu, tedy plynulou odchylku od přímkové elastické části. Na počátku grafu není závislost  $e - R$  lineární (na obr. 55 zhruba část do 50 MPa), protože vlákna nejsou ideálně rovná a kromě elastické deformace dochází na počátku deformace i k jejich vyrovnávání. Vlákna jsou zpevněná protahováním, což vede k poměrně vysokým hodnotám meze kluzu i meze pevnosti, ovšem k velmi omezené tažnosti  $e_f$ .

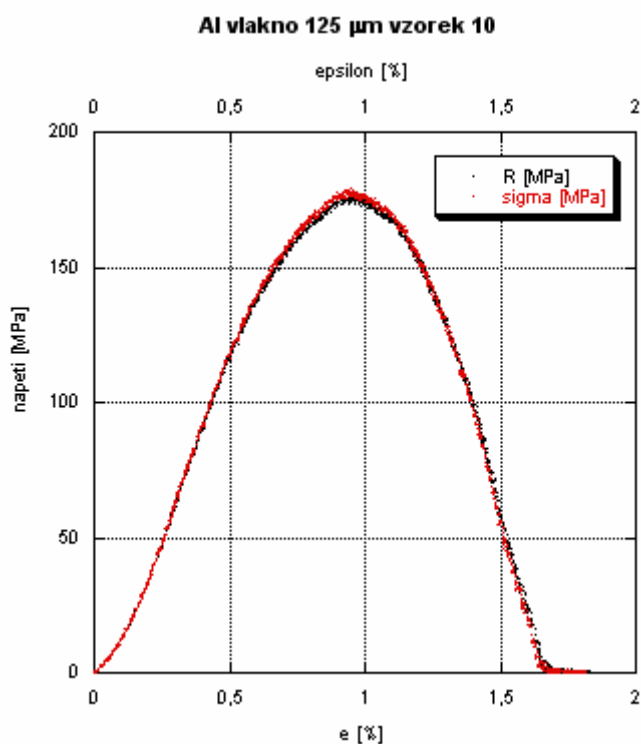
U těchto vláken se nám podařilo provést čtyři platné tahové zkoušky. Jejich výsledky jsou shrnuty v tabulkách 5 a 6.

Pozorování vláken po lomu ukázalo, že u nich došlo před lomem ke tvorbě krčku, jak je ukázáno na obr. 57.



Obr. 55. Záznam tahové zkoušky Al vlákna o průměru 125  $\mu\text{m}$  zkušebního vzorku 9 uchyceného při testu pomocí Belzony a papírové podložky





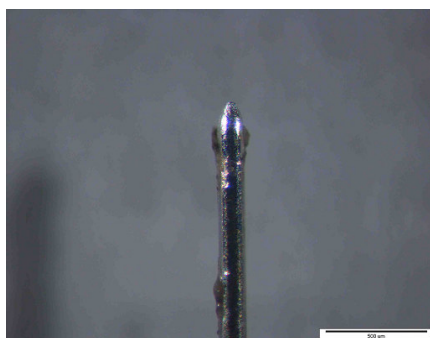
Obr. 56. Záznam tahové zkoušky Al vlákna o průměru 125  $\mu\text{m}$  zkušební vzorku 10 uchyceného při testu pomocí brusného papíru

**Tabulka 5.:** Přehled výsledků testovaných vzorků Al vláken o průměru 125  $\mu\text{m}$

Al vlákna 125 $\mu\text{m}$	$L_0$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{max}}$	$\epsilon_f$	$\Delta\epsilon/\Delta t$
	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[ $\text{s}^{-1}$ ]
Al vlákno 125 $\mu\text{m}$ _06	11,42	169,44	180,42	0,56	$1 \cdot 10^{-4}$
Al vlákno 125 $\mu\text{m}$ _08	9,81	171,53	175,70	0,61	$1 \cdot 10^{-4}$
Al vlákno 125 $\mu\text{m}$ _09	11,23	169,44	173,57	0,90	$1 \cdot 10^{-4}$
Al vlákno 125 $\mu\text{m}$ _10	10,40	170,83	178,26	0,55	$1 \cdot 10^{-4}$

**Tabulka 6.:** Aritmetický průměr a směrodatná odchylka výsledků tahových zkoušek Al vláken o průměru 125  $\mu\text{m}$

Al vlákna 125 $\mu\text{m}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{max}}$	$\epsilon_f$
	[MPa]	[MPa]	[%]
Aritmetický průměr	170,31	176,9875	0,655
Směrodatná odchylka	0,9045	2,5855	0,1433



Obr. 57. Vlákno Al o průměru 125  $\mu\text{m}$  vzorek 6 po lomu s vytvořeným krčkem

## 4.2. Al vlákna o průměru 500 $\mu\text{m}$ (tažené)

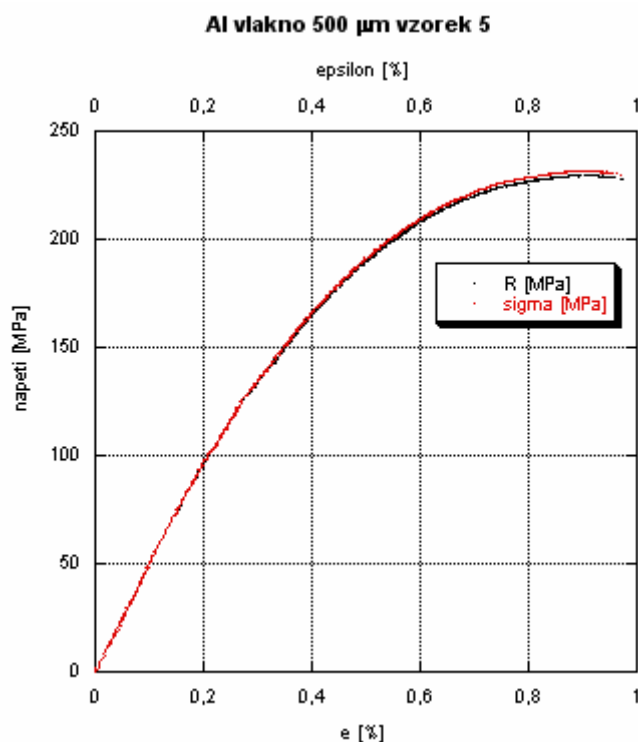
Příklady tahových diagramů Al vláken o průměru 500  $\mu\text{m}$  jsou uvedeny na obr. 58 a 59. Je vidět, že vlákna mají podobné vlastnosti jako vlákna s menším průměrem (viz předchozí kapitola), tj. nevýrazná mez kluzu, vysoký koeficient zpevnění a malá tažnost.

U těchto vláken byly provedeny tři platné tahové zkoušky. Jejich výsledky jsou shrnuty v tabulkách 7 a 8.

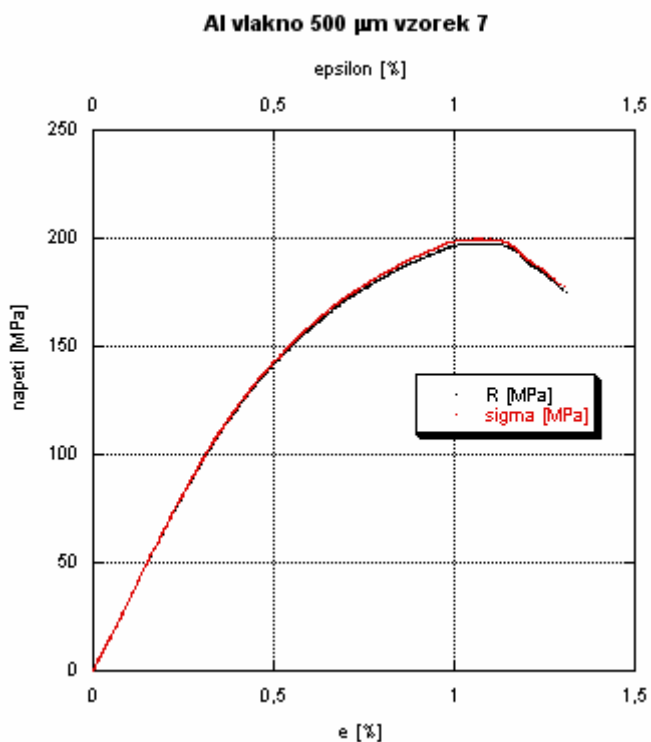
Vlákna o průměru 500  $\mu\text{m}$  mají vyšší pevnostní charakteristiky, tj. mez kluzu a mez pevnosti, v porovnání s výsledky tahových zkoušek Al vláken o průměru 125  $\mu\text{m}$  uvedenými v předchozí kapitole. Naopak tažnost je pro vlákna většího průměru nižší. Toto srovnání ukazuje, že 500  $\mu\text{m}$  vlákna byla při přípravě o něco více zpevněna než vlákna tenčí.

V případě vláken 125  $\mu\text{m}$  je rozptyl naměřených hodnot až překvapivě nízký, což svědčí o výborné reprodukovatelnosti měření zatěžovacího stroje u těchto vzorků. U vláken s větším průměrem je rozptyl dat jak pro mez kluzu, tak pro mez pevnosti poněkud vyšší.

Pozorování vláken po lomu (viz. obr. 60) ukázalo, že u nich před lomem nedošlo ke tvorbě krčku, na rozdíl od tenčích vláken. I to ukazuje, stejně jako vyšší rozptyl dat, na sníženou hodnotu tažnosti vláken o průměru 500  $\mu\text{m}$ .



Obr. 58. Záznam tahové zkoušky Al vlákna o průměru 500  $\mu\text{m}$  zkušební vzorku 5 uchyceného při testu pomocí Belzony a papírové podložky



Obr. 59. Záznam tahové zkoušky Al vlákna o průměru 500  $\mu\text{m}$  zkušební vzorku 7 uchyceného při testu pomocí brusného papíru

**Tabulka 7.:** Přehled výsledků testovaných vzorků Al vláken o průměru 500  $\mu\text{m}$

Al vlákna 500 $\mu\text{m}$	$L_0$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{max}}$	$e_f$	$\Delta e/\Delta t$
	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[ $\text{s}^{-1}$ ]
Al vlákno 500 $\mu\text{m}$ _05	13,57	214,17	231,68	0,52	$1 \cdot 10^{-4}$
Al vlákno 500 $\mu\text{m}$ _06	14,77	189,17	202,36	0,51	$1 \cdot 10^{-4}$
Al vlákno 500 $\mu\text{m}$ _07	16,60	175,83	199,64	0,63	$1 \cdot 10^{-4}$

**Tabulka 8.:** Aritmetický průměr a směrodatná odchylka výsledků tahových zkoušek Al vláken o průměru 500  $\mu\text{m}$

Al vlákna 500 $\mu\text{m}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{max}}$	$e_f$
	[MPa]	[MPa]	[%]
Aritmetický průměr	193,0567	211,2267	0,5533
Směrodatná odchylka	15,8917	14,5053	0,0544



Obr. 60. Vlákno Al o průměru 500  $\mu\text{m}$  vzorek 2 po lomu; lom je pod úhlem přibližně 45°

### 4.3. Al vlákna o průměru 180 μm (infiltrace do NaCl)

Provedení tahových zkoušek těchto vláken bylo nejobtížnější ze všech testovaných materiálů díky jejich malým rozměrům. V tabulkách 9 a 10 jsou uvedeny výsledky testů při nichž byla vlákna uchycena třemi různými způsoby: vzorky 1 až 7 pomocí epoxidového lepidla, vzorky 8 až 14 pomocí Belzony a vzorky 15 a 16 pomocí brusného papíru.

Na obr. 61 je uveden tahový diagram při použití snímače síly o rozsahu 250 N. Silný šum dat je způsoben jednak šumem samotného dynamometru, jednak, a to hlavně, vibracemi stroje během zkoušky. Přes tento šum je zřetelné, že úroveň napětí je výrazně nižší a tažnost výrazně vyšší než v případě vláken vyrobených tažením za studena.

Na obr. 62 je tahový diagram při použití snímače síly s rozsahem 5 N a s vylepšenými parametry zpětné vazby stroje. Šum dat je silně potlačen. U těchto vláken byly provedeny i komplikovanější testy než běžný tahový diagram. Na obr. 63 byla během tahové zkoušky provedena série odlehčení, abychom mohli přesněji zjistit sklon lineární-elastické části diagramu. Bylo zjištěno, že tento sklon nepřesahuje 40 GPa, což je asi polovina očekávaného Youngova modulu pro čistý Al. To je důsledek měření přemístění na aktuátoru a nikoli snímačem upevněným přímo na vzorku. V současné době je tento nedostatek na ÚFM odstraněn zakoupením interferometrického optického systému SPECLE, který však během provádění tohoto experimentu nebyl dosud v provozu.

Na obr. 64 je uveden tahový diagram zkoušky, při níž byla mimo výše popsané série odlehčení, nadefinována změna rychlosti deformace v průběhu zatěžování testovaného vzorku. V plastické části diagramu byla rychlost zatěžování náhle zvýšena 10x. Po přemístění aktuátoru o 5 % původní měrné délky vzorku byla rychlost deformace opět snížena na původní hodnotu. Tímto způsobem je zjišťována citlivost testovaného materiálu na změnu rychlosti deformace, která je popisována parametrem  $S$ , anglicky nazývaném „*strain rate sensitivity parameter*“, viz. rovnice 18. Tento parametr může mít i jiné definice [20]. Hodnoty parametru  $S$  pro testovaná Al vlákna o průměru 180 μm jsou uvedena v tabulce 11. Na obr. 65 je znázorněn způsob, jakým byly měřeny parametry potřebné pro výpočet  $S$  dle rovnice 18:

$$S = \frac{1}{T} \cdot \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \doteq \frac{1}{T} \cdot \frac{\Delta \ln \sigma}{\Delta \ln \dot{\epsilon}} \quad [\text{Pa K}^{-1}] \quad (18)$$

Parametr  $S$  také úzce souvisí s tzv. aktivačním objemem  $V_a$ . Aktivační objem  $V_a$  zatěžovaného vzorku se vypočte dle vztahu 19, hodnoty  $V_a$  jsou uvedeny v další tabulce 12.

$$V_a = \frac{k}{\sigma \cdot S} \quad [\text{m}^3] \quad (19)$$

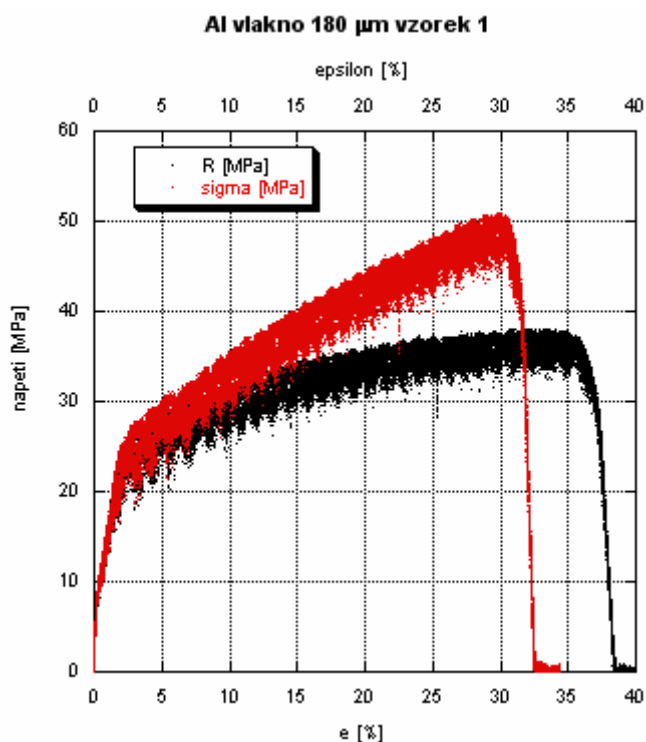
kde  $k$  je Boltzmannova konstanta jejíž hodnota je  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Vezmeme-li v úvahu Burgersův vektor  $b$ , jehož hodnota činí pro hliník  $|b_{\text{Al}}| = 2,863 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ , je poté možné normovat jednotku aktivačního objemu dle následujícího vztahu 20:

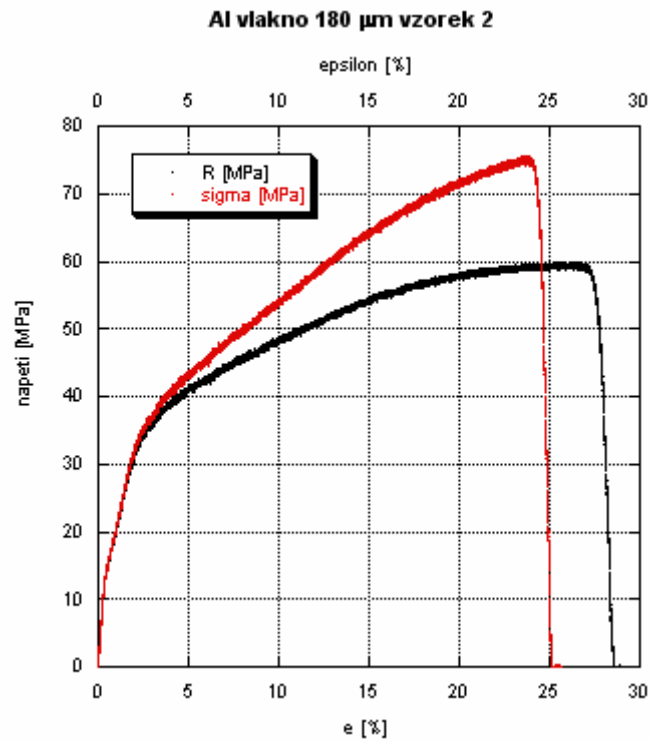
$$V_{a|b_{\text{Al}}} = \frac{V_a}{b^3} \quad [-] \quad (20)$$

Na obr. 66 je tahový diagram reprezentující průběh testu Al vláken, které byly do čelistí zkušebního stroje upnuty pouze pomocí brusného papíru. Při tomto způsobu upnutí však nutně musí dojít k plastické deformaci vzorku čelistmi v místě jeho uchycení již při jeho upínání. Domníváme se, že z těchto míst docházelo k šíření plastické deformace již od počátku zatěžování. Z tohoto důvodu vycházely hodnoty meze kluzu mnohem nižší než u ostatních vláken o průměru 180  $\mu\text{m}$  upnutých jiným způsobem, a proto nebyly tyto hodnoty zahrnuty do výpočtu aritmetického průměru a směrodatné odchylky. Mez pevnosti je přibližně srovnatelná a tažnost dokonce vyšší než u ostatních vláken o průměru 180  $\mu\text{m}$ . Dalším rozdílem v oblasti plastické deformace je v diagramu patrné výrazné deformační zpevnění v průběhu zatěžování.

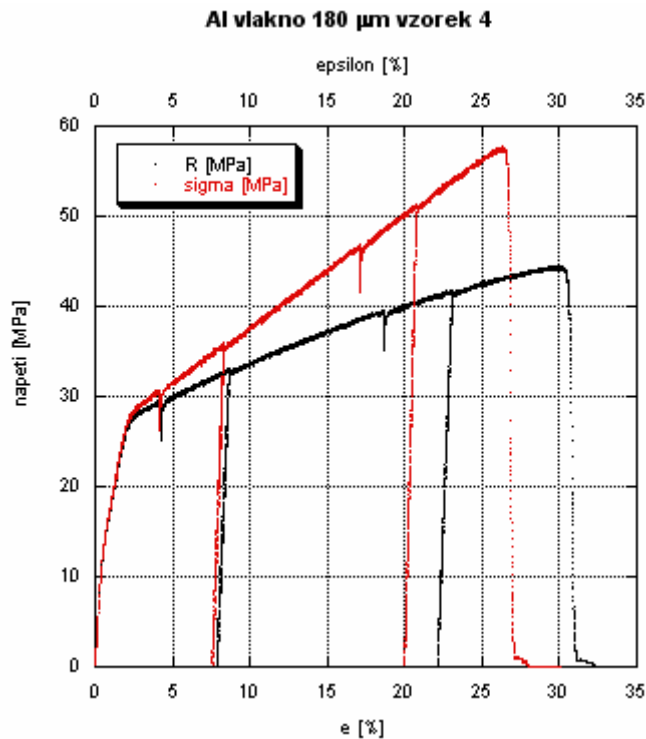
A na obr. 67 je uveden snímek Al vlákna o průměru 180  $\mu\text{m}$  vzorku 16 po zkoušce. V průběhu testu docházelo na několika místech k lokálnímu zúžení vlákna, přičemž v jednom z nich došlo k lomu vzorku, jak je ze snímku patrné.



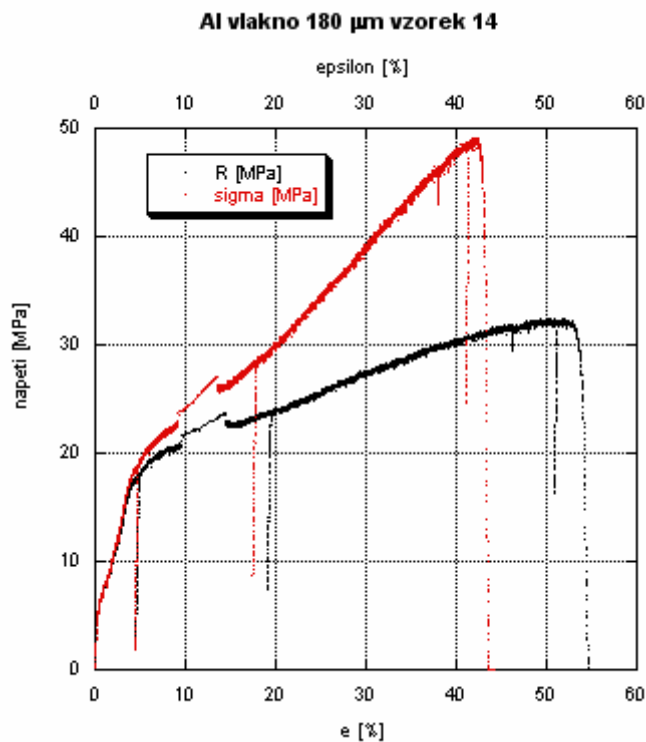
Obr. 61. Záznam tahové zkoušky Al vlákna o průměru 180  $\mu\text{m}$  zkušební vzorku 1 uchyceného při testu pomocí epoxidového lepidla a papírové podložky



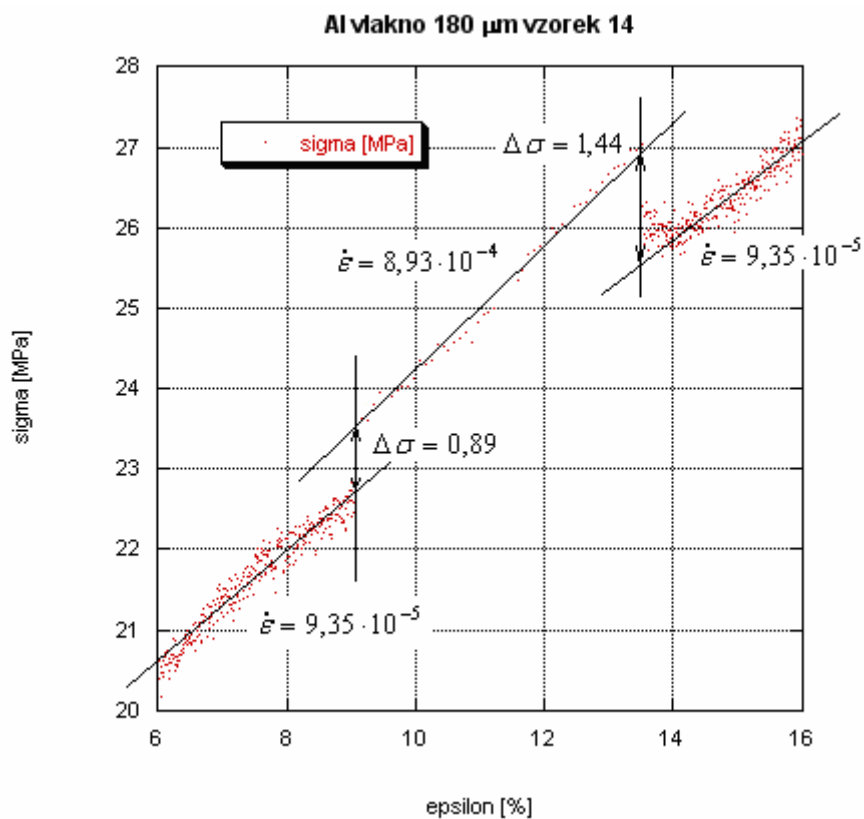
Obr. 62. Záznam tahové zkoušky Al vlákna o průměru 180  $\mu\text{m}$  zkušební vzorku 2 uchyceného při testu pomocí epoxidového lepidla a papírové podložky



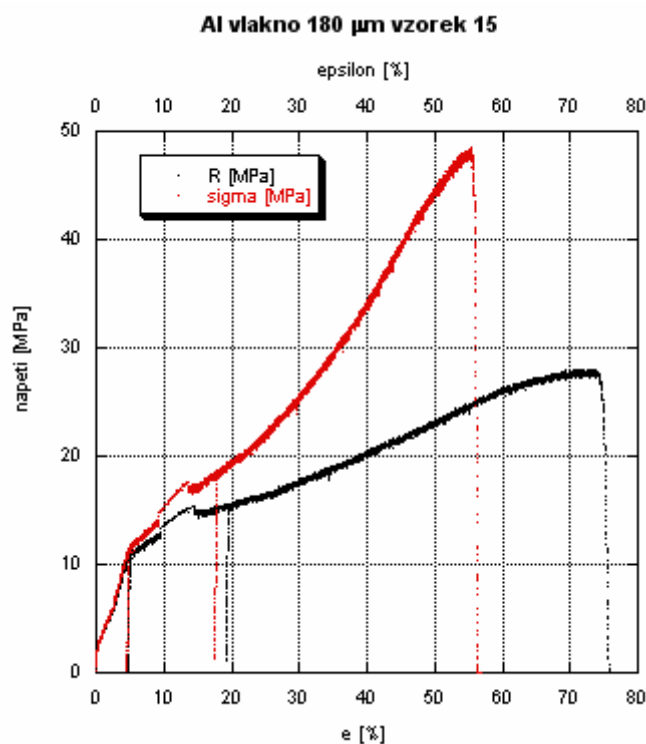
Obr. 63. Záznam tahové zkoušky Al vlákna o průměru 180  $\mu\text{m}$  vzorku 4 uchyceného při testu pomocí epoxidového lepidla a papírové podložky se sérií odtížení v průběhu zkoušky



Obr. 64. Záznam tahové zkoušky Al vlákna o průměru 180  $\mu\text{m}$  zkušební vzorku 14 uchyceného při testu pomocí Belzony a papírové podložky se sérií odtížení a změnou rychlosti deformace v průběhu testu



Obr. 65. Detail tahového diagramu Al vlákna o průměru 180  $\mu\text{m}$  zkušební vzorku 14 se změnou rychlosti deformace a pomocnými přímkami pro odměřování hodnot do rovnice 18



Obr. 66. Záznam tahové zkoušky Al vlákna o průměru 180  $\mu\text{m}$  zkušební vzorku 15 uchyceného pomocí brusného papíru se sérií odtížení a změnou rychlosti deformace v průběhu zkoušky

**Tabulka 9.:** Přehled výsledků testovaných vzorků Al vláken o průměru 180  $\mu\text{m}$

Al vlákna 180 $\mu\text{m}$	$L_0$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\max}$	$e_f$	$\Delta e/\Delta t$
	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[ $\text{s}^{-1}$ ]
Al vlákno 180 $\mu\text{m}$ _01	3,95	9,42	50,86	34,17	$1 \cdot 10^{-3}$
Al vlákno 180 $\mu\text{m}$ _02	4,50	16,88	75,30	25,57	$1 \cdot 10^{-3}$
Al vlákno 180 $\mu\text{m}$ _04	4,51	15,08	57,58	28,56	$1 \cdot 10^{-3}$
Al vlákno 180 $\mu\text{m}$ _07	4,07	7,84	52,22	31,39	procedura
Al vlákno 180 $\mu\text{m}$ _11	3,82	7,96	46,08	21,67	$1 \cdot 10^{-3}$
Al vlákno 180 $\mu\text{m}$ _13	2,65	9,73	34,35	20,76	procedura
Al vlákno 180 $\mu\text{m}$ _14	3,68	6,11	48,95	50,83	procedura
Al vlákno 180 $\mu\text{m}$ _15	3,40	2,60	48,15	73,06	procedura
Al vlákno 180 $\mu\text{m}$ _16	3,60	2,86	53,02	69,44	procedura

**Tabulka 10.:** Aritmetický průměr a směrodatná odchylka výsledků tahových zkoušek Al vláken o průměru 180  $\mu\text{m}$

Al vlákna 180 $\mu\text{m}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\max}$	$e_f$
	[MPa]	[MPa]	[%]
Aritmetický průměr	10,43	51,8	39,5
Směrodatná odchylka	3,71	10,3	18,9



**Tabulka 11.:** Hodnoty parametru S testovaných vzorků Al vláken o průměru 180 μm

Al vlákna 180 μm	$S_{nárůst}$	$S_{pokles}$
	[Pa.K <sup>-1</sup> ]	[Pa.K <sup>-1</sup> ]
Al vlákno 180 μm_13	$9,68 \cdot 10^{-5}$	$9,87 \cdot 10^{-5}$
Al vlákno 180 μm_14	$5,78 \cdot 10^{-5}$	$7,90 \cdot 10^{-5}$
Al vlákno 180 μm_15	$7,32 \cdot 10^{-5}$	$8,43 \cdot 10^{-5}$
Al vlákno 180 μm_16	$9,49 \cdot 10^{-5}$	$7,68 \cdot 10^{-5}$

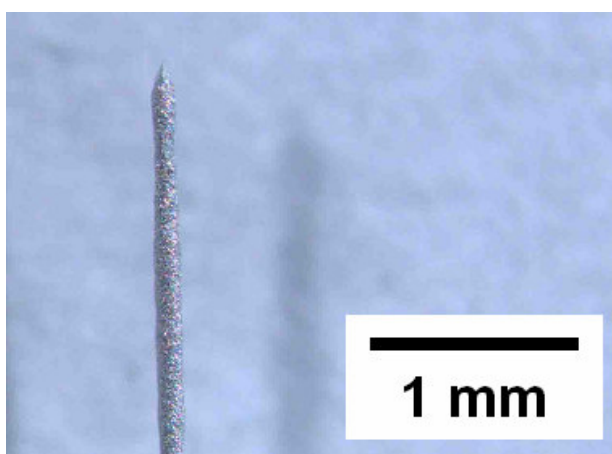
Pozn.: Parametr S je vypočten pro pokojovou teplotu (22°C)

$S_{nárůst}$  označuje hodnotu parametru S při změnu rychlosti deformace z nižší na vyšší a analogicky  $S_{pokles}$  označuje parametr S při poklesu rychlosti deformace z vyšší rychlosti na rychlost nižší. Průměrná hodnota S z 8 hodnot uvedených v tabulce je  $8,275 \pm 1,30$ .

**Tabulka 12.:** Hodnoty aktivačních objemů testovaných vzorků Al vláken o průměru 180 μm

Al vlákna 180 μm	$V_a$ nárůst	$V_a$ pokles	$V_{albl}$ nárůst	$V_{albl}$ pokles
	[m]	[m]	[b <sup>3</sup> ]	[b <sup>3</sup> ]
Al vlákno 180 μm_13	$6,13461 \cdot 10^{-27}$	$4,48565 \cdot 10^{-27}$	261,381	191,123
Al vlákno 180 μm_14	$1,05291 \cdot 10^{-26}$	$6,45747 \cdot 10^{-27}$	448,619	275,137
Al vlákno 180 μm_15	$1,34559 \cdot 10^{-26}$	$9,18583 \cdot 10^{-27}$	573,321	391,386
Al vlákno 180 μm_16	$1,02072 \cdot 10^{-26}$	$9,90493 \cdot 10^{-27}$	434,903	422,025

Stejně jako v případě předchozí tabulky hodnoty  $V_{anárůst}$  označují aktivační objem zatěžovaného vzorku při navýšení rychlosti deformace z nižší na vyšší rychlost a opět hodnoty  $V_{apokles}$  označují aktivační objem zatěžovaného vzorku při snížení rychlosti deformace z vyšší na nižší rychlost. Hodnoty aktivačních objemů s indexem lbl označují aktivační objemy zatěžovaných vzorků při nárůstu resp. poklesu rychlosti deformace během prováděné zkoušky normované pomocí Burgersova vektoru.



Obr. 67. Al vlákno o průměru 180 μm, vzorek 16, po lomu. Velmi vysoká tažnost materiálu je příčinou výrazného krčku.

#### 4.4. Nylonová vlákna o průměru 250 $\mu\text{m}$

Na obr. 68 a 69 jsou uvedeny dva tahové diagramy jejichž průběh má tvar S-křivky, což je typické pro plastové materiály. Rozdíl mezi těmito dvěma testy je v rychlosti zatěžování, vzorek s číslem 6 byl zatěžován 10x vyšší rychlostí deformace než v případě vzorku 7. Obrázek 70 znázorňuje tahový diagram zkoušky, v níž byla opět nadefinováno zvýšení rychlosti deformace (rovněž 10x) v průběhu zatěžování vzorku pro stanovení parametru  $S$ . Stejným způsobem byl zatěžován i vzorek s označením 3, jehož tahový diagram však není uveden. Obě hodnoty parametru  $S$ , jež jsou uvedeny v tabulce 15, dle očekávání vycházejí pro nylon vyšší než pro hliník, neboť je deformační chování u plastů (obecně) silně závislé na rychlosti deformace. V této zkoušce nebyla rychlost zatěžování po jisté době snížena na původní hodnotu, jako tomu bylo v případě Al vláken o průměru 180  $\mu\text{m}$ , ale tahová zkouška nylonových vláken byla dokončena při této vyšší rychlosti deformace.

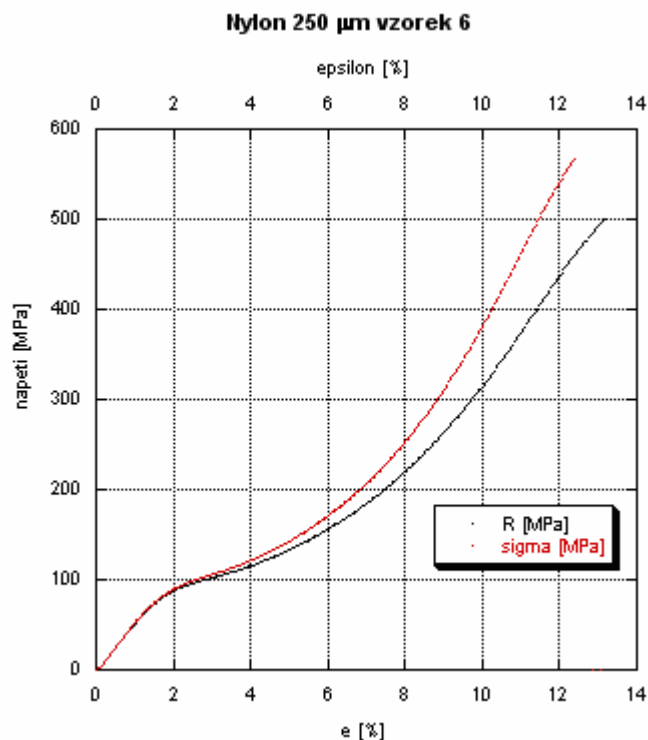
Nylonová vlákna byla v tomto experimentu upínána přímo do čelistí testovacího stroje pouze pomocí brusného papíru. Tento způsob upínání zřejmě nebyl pro nylonová vlákna zcela vhodný, neboť k lomům těchto testovaných vzorků docházelo právě u čelistí stroje. I přes tento handicap však naměřené hodnoty napětí při lomu  $\sigma_{max}$  a hodnoty jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení  $e_{tB}$ , jež jsou pro všechny úspěšně provedené testy těchto nylonových vláken o průměru 250  $\mu\text{m}$  uvedeny v tabulkách 13 a 14, vycházely pouze s minimálním rozptylem.

Jak již bylo uvedeno v rešerši této diplomové práce, ve vyhodnocování tahových zkoušek plastů jsou určité rozdíly oproti vyhodnocování tahových zkoušek kovových materiálů, zejména v názvosloví určovaných veličin. Z tohoto důvodu nebyla u nylonových vláken v tomto experimentu určována velikost tažnosti  $e_f$  jako v případě ostatních zde testovaných materiálů, ale určováno jmenovité poměrné prodloužení při přetržení  $e_{tB}$ . Rovněž i hodnoty smluvní meze kluzu nebyly stanoveny pomocí smluvní plastické deformace 0,2 %, ale na základě schématu (viz. obr. 5), který definuje možné tvary průběhů tahových zkoušek plastů, a který je uveden v příslušné české technické normě pro vyhodnocování tahových zkoušek plastů ČSN EN ISO 527 [6]. Dodavatel, jež poskytl nylonová vlákna pro testy do experimentální části této diplomové práce, nestanovil žádnou konkrétní hodnotu poměrné deformace, pro níž by se stanovovala smluvní mez kluzu.

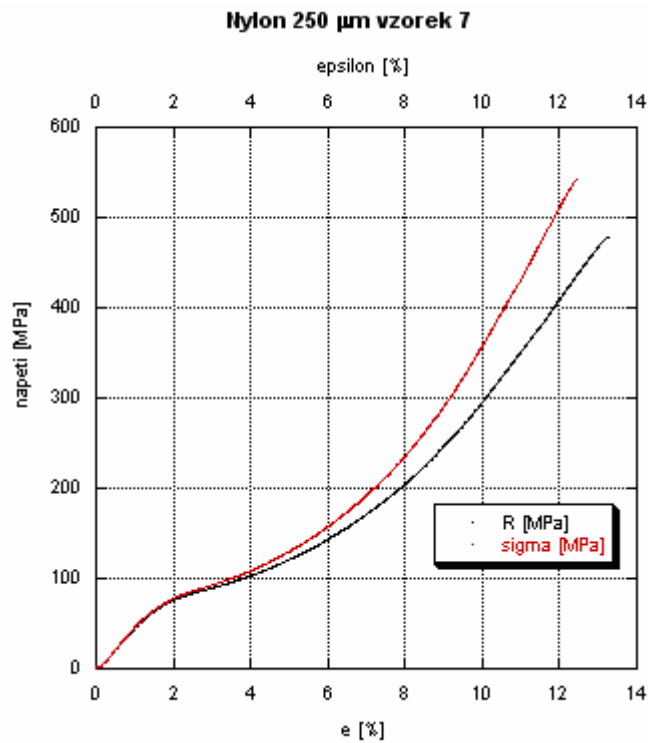
Rovněž i Youngův modul  $E$  byl u nylonových zkušebních vzorků stanoven na základě této normy. Pro jeho určení jsme využili možnost jež tato norma připouští, a to, určení modulu  $E$  pomocí lineární regresní analýzy směrnice tahové křivky mezi hodnotami deformace 0,05 a 0,25 %. Zjištěné hodnoty modulu pružnosti vycházejí přibližně o 1 ÷ 2 GPa vyšší, než uvádí výrobce těchto vláken. Tato odchylka může být způsobena tím, že jsme nebyli obeznámeni se způsobem, který pro určování modulu těchto materiálů výrobce použil. Je možné, že byla použita metoda tangenty k počáteční části tahové křivky (bez přesnější definice "počáteční části"). Tento způsob je dnes již méně používaný pro určení hodnot  $E$  plastů, kvůli své nižší přesnosti zejména u houževnatých plastů [6].

Plasty vykazují viskoelastické chování, tedy elastická deformace je závislá na čase a na teplotě a závislost napětí – deformace je nelineární. Toto chování lze vysvětlit na jednoduchém příkladu, kdy po snížení nebo úplném odstranění zatížení se materiál vrací buď téměř nebo zcela do původního tvaru, ovšem nikoli okamžitě, nýbrž s určitým časovým zpožděním. Abychom mohli tento jev lépe studovat, byla pro zkušební vzorek s číslem 4 nadefinována speciální procedura průběhu zátěžného testu. Na obr. 71 je v souřadných osách  $t$  –  $\varepsilon$  znázorněna první část průběhu deformace testovaného vzorku. Ve vyznačeném bodě  $A$  došlo ke změně směru zatěžování a bylo provedeno odtížení až na nulovou hodnotu  $\varepsilon$ . Tento způsob zatěžování testovaného vzorku se pravidelně opakoval, s tím že při každém

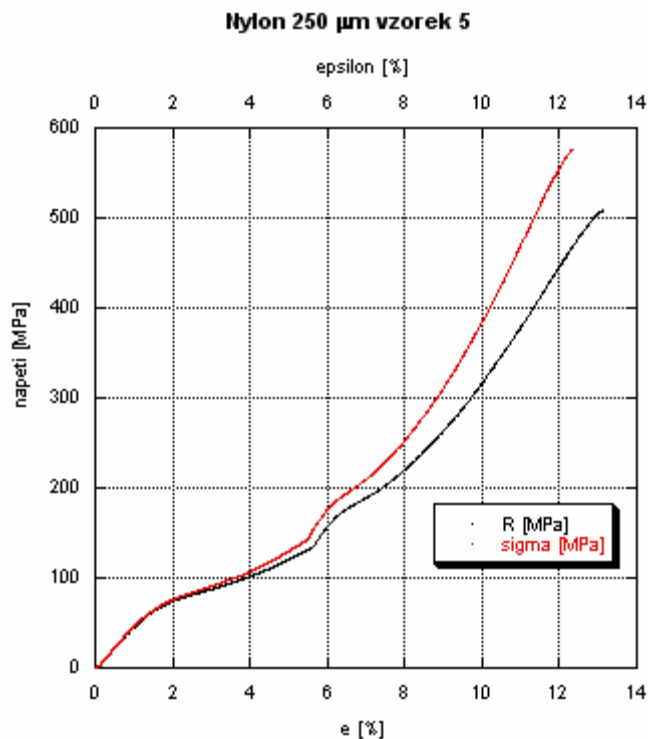
následujícím zátěžném cyklu byla skutečná deformace na vzorku navýšena o 2 %, jak je patrné z tohoto obrázku. Křivky napětí – deformace zkoušky s touto procedurou uvedené na obr. 72 potvrzují předpokládanou skutečnost, a to, že testovaný materiál opravdu vykazoal viskoelastické chování. Při zatížení a odtížení se objevuje výrazná hystereze. Přitom bylo pozorováno, že při opětovném zatížení prochází křivka bodem, v němž došlo ke změně směru zatěžování v předchozím cyklu. Během odtížení tedy nedochází ke změnám mikrostruktury materiálu. Obr. 73 znázorňuje celý průběh zkoušky s touto procedurou až do lomu zkušebního vzorku.



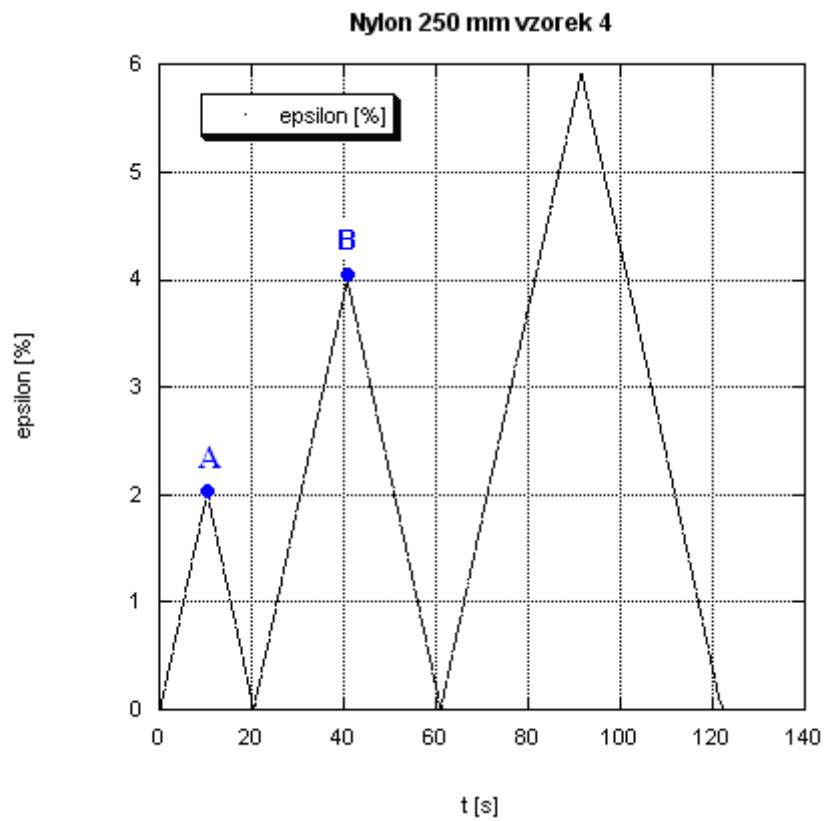
Obr. 68. Záznam tahové zkoušky nylonového vlákna o průměru 250  $\mu\text{m}$  zkušební vzorku 6 uchyceného při testu pomocí brusného papíru



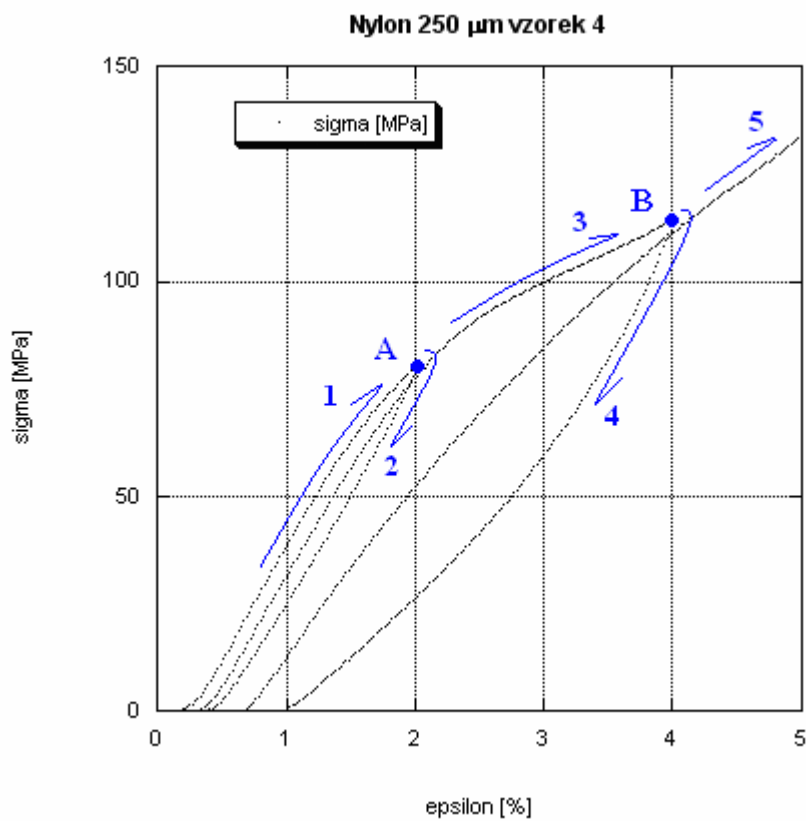
Obr. 69. Záznam tahové zkoušky nylonového vlákna o průměru 250 μm zkušební vzorku 7 uchyceného při testu pomocí brusného papíru



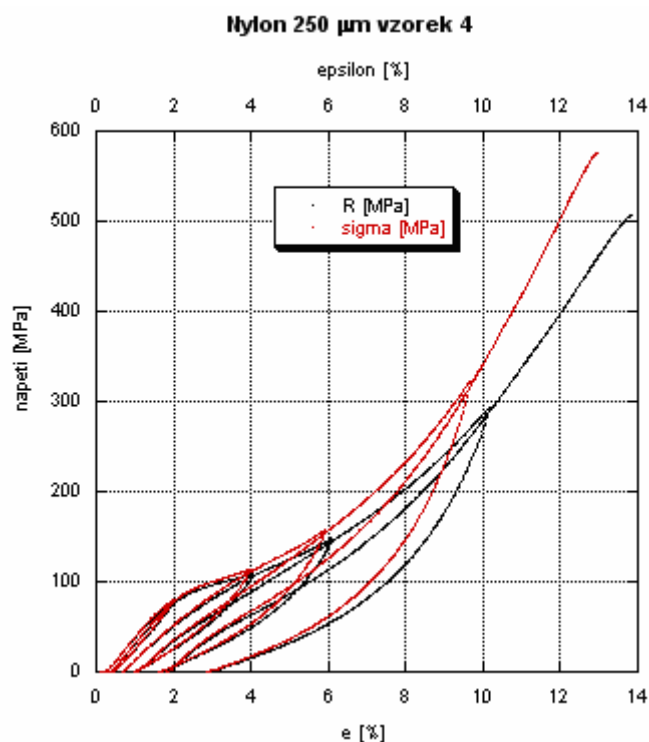
Obr. 70. Záznam tahové zkoušky nylonového vlákna o průměru 250 μm zkušební vzorku 5 uchyceného při testu pomocí brusného papíru se zvýšením rychlosti deformace v průběhu testu



Obr. 71. První část průběhu deformace v závislosti na čase nylonového vlákna o průměru 250  $\mu\text{m}$  vzorku 4



Obr. 72. První část způsobu zatěžování nylonového vlákna o průměru 250  $\mu\text{m}$  vzorku 4 s patrnou výraznou hysterezí



Obr. 73. Znárodnění celého průběhu zatěžování nylonového vlákna o průměru 250  $\mu\text{m}$  vzorku 4 uchyceného při testu pomocí brusného papíru

**Tabulka 13.:** Přehled výsledků testovaných vzorků nylonových vláken o průměru 250  $\mu\text{m}$

Nylonová vlákna 250 $\mu\text{m}$	$L_0$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\epsilon_{tB}$	$E$	$\Delta e/\Delta t$
	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[GPa]	[s <sup>-1</sup> ]
Nylonové vlákno 250 $\mu\text{m}$ _03	50,70	83,33	566,92	13,44	4,58	procedura
Nylonové vlákno 250 $\mu\text{m}$ _04	49,20	108,34	576,22	13,88	5,17	procedura
Nylonové vlákno 250 $\mu\text{m}$ _05	53,00	86,67	575,03	13,17	4,98	procedura
Nylonové vlákno 250 $\mu\text{m}$ _06	52,40	111,81	566,94	13,26	5,11	$2 \cdot 10^{-3}$
Nylonové vlákno 250 $\mu\text{m}$ _07	56,20	90,97	541,81	13,33	4,33	$2 \cdot 10^{-4}$

**Tabulka 14.:** Aritmetický průměr a směrodatná odchylka výsledků tahových zkoušek nylonových vláken o průměru 250  $\mu\text{m}$

Nylonová vlákna 250 $\mu\text{m}$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\epsilon_{tB}$	$E$
	[MPa]	[MPa]	[%]	[GPa]
Aritmetický průměr	96,2240	565,3840	13,4160	4,8340
Směrodatná odchylka	11,6177	12,4176	0,2482	0,3252

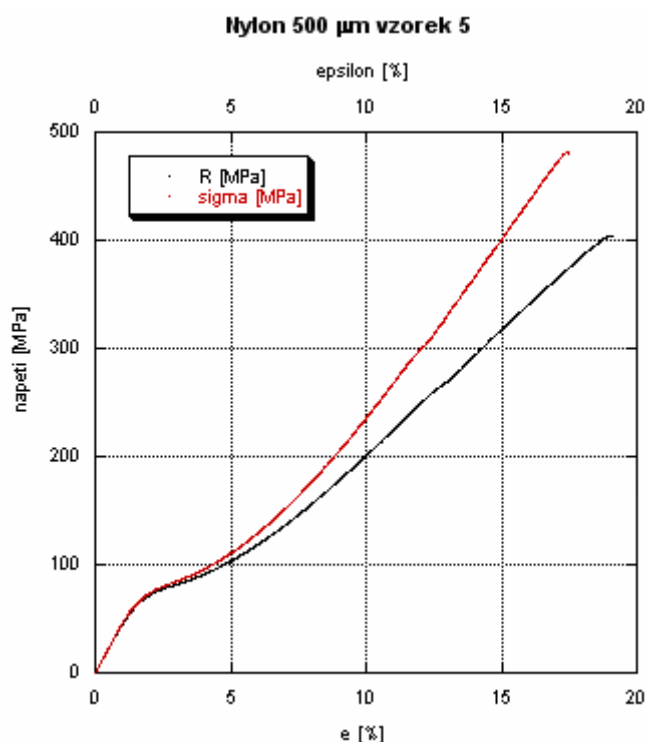
**Tabulka 15.:** Hodnoty parametru S testovaných vzorků nylonových vláken o průměru 250  $\mu\text{m}$

Nylonová vlákna 250 $\mu\text{m}$	$S_{nárůst}$
	[Pa.K <sup>-1</sup> ]
Nylonové vlákno 250 $\mu\text{m}$ _03	$2,35 \cdot 10^{-4}$
Nylonové vlákno 250 $\mu\text{m}$ _05	$2,06 \cdot 10^{-4}$

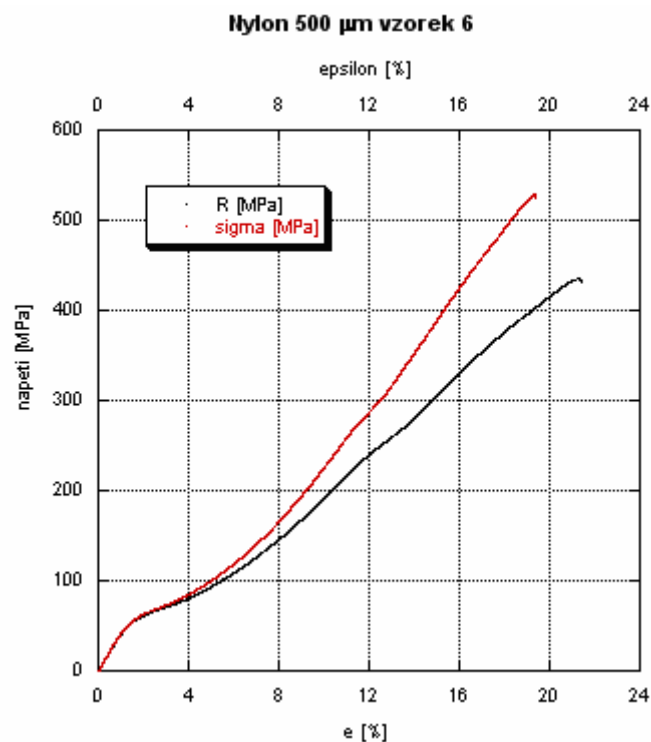
## 4.5. Nylonová vlákna o průměru 500 $\mu\text{m}$

U nylonových vláken o průměru 500  $\mu\text{m}$  byly provedeny stejné typy zkušebních testů, jako v případě nylonových vláken o průměru 250  $\mu\text{m}$ . Z tahových diagramů provedených zkoušek, jenž jsou uvedeny na obr. 74 až 77 vyplývá, že chování nylonových vláken s větším průměrem bylo přibližně stejné jako v případě vláken tenčích. Obr. 74 a obr. 75 ukazují tahový diagram zkoušek, při nichž nebyly použity žádné zátěžné procedury. Jediný rozdíl mezi těmito dvěma testy je v rychlosti deformace zkušebních vláken, na vzorek s číslem 5 (viz. obr. 74) byla aplikována 10x vyšší rychlost deformace než v případě vzorku s číslem 6 (obr. 75). Obr. 76 znázorňuje tahový diagram zkoušky, v jejímž průběhu byla nadefinována změna rychlosti deformace opět pro stanovení parametru  $S$ , jehož hodnota byla  $2,56 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{K}^{-1}$  (viz. tabulka 18). Obr. 77 znázorňuje průběh zkoušky při níž byla použita procedura studující viskoelastické chování testovaného materiálu, stejně jako tomu bylo nylonového vlákna o průměru 250  $\mu\text{m}$  vzorku 4, u něhož je tato procedura detailně okomentována. Všechny výsledky jsou opět shrnuty do tabulek 16 a 17.

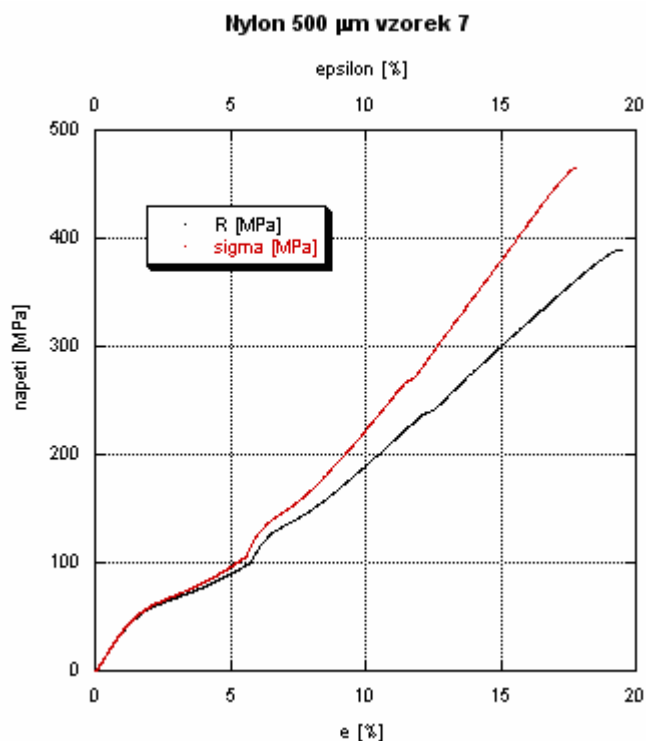
Průměrná hodnota meze kluzu zde vychází nižší než v případě tenčích vláken, stejně tak jako napětí při lomu, které má navíc mnohem vyšší rozptyl. Hodnoty jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení  $e_{IB}$ , jsou naproti tomu vyšší a s vyšším rozptylem. Průměrná hodnota modulu pružnosti je o něco nižší než u vláken s průměrem 250  $\mu\text{m}$ .



Obr. 74. Záznam tahové zkoušky nylonového vlákna o průměru 500  $\mu\text{m}$  zkušebního vzorku 5 uchyceného při testu pomocí brusného papíru

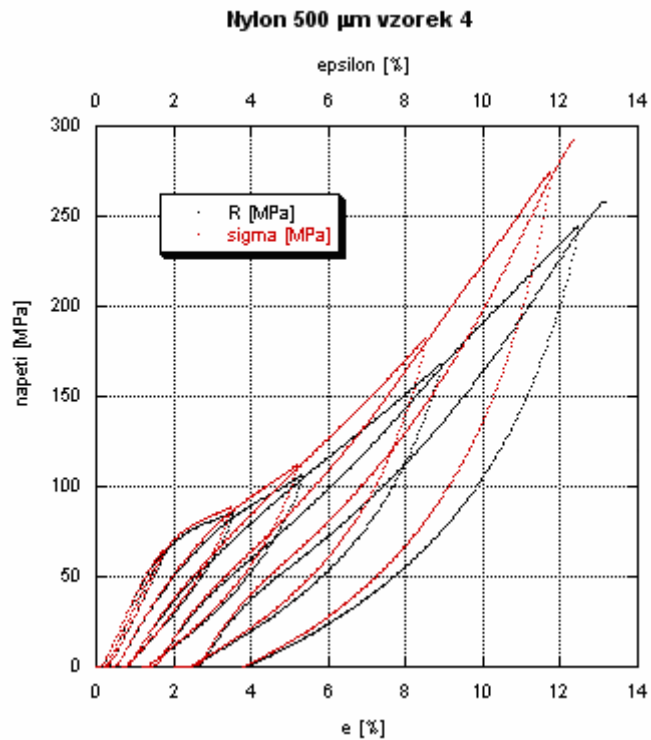


Obr. 75. Záznam tahové zkoušky nylonového vlákna o průměru 500  $\mu\text{m}$  zkušební vzorku 6 uchyceného při testu pomocí brusného papíru



Obr. 76. Záznam tahové zkoušky nylonového vlákna o průměru 500  $\mu\text{m}$  zkušební vzorku 7 uchyceného při testu pomocí brusného papíru se zvýšením rychlosti deformace v průběhu testu





Obr. 77. Znárodnění celého průběhu zatěžování nylonového vlákna o průměru 500  $\mu\text{m}$  vzorku 4 uchyceného při testu pomocí brusného papíru

**Tabulka 16.:** Přehled výsledků testovaných vzorků nylonových vláken o průměru 500  $\mu\text{m}$

Nylonová vlákna 500 $\mu\text{m}$	$L_0$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\epsilon_{tB}$	$E$	$\Delta e/\Delta t$
	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[GPa]	[s <sup>-1</sup> ]
Nylonové vlákno 500 $\mu\text{m}$ _04	56,10	86,17	292,21	13,17	4,29	procedura
Nylonové vlákno 500 $\mu\text{m}$ _05	52,30	83,61	481,68	19,08	4,91	$2 \cdot 10^{-3}$
Nylonové vlákno 500 $\mu\text{m}$ _06	50,80	70,67	527,92	21,39	4,53	$2 \cdot 10^{-4}$
Nylonové vlákno 500 $\mu\text{m}$ _07	49,60	69,06	465,14	19,50	3,83	procedura

**Tabulka 17.:** Aritmetický průměr a směrodatná odchylka výsledků tahových zkoušek nylonových vláken o průměru 500  $\mu\text{m}$

Nylonová vlákna 500 $\mu\text{m}$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\epsilon_{tB}$	$E$
	[MPa]	[MPa]	[%]	[GPa]
Aritmetický průměr	77,3775	441,7375	18,2850	4,3900
Směrodatná odchylka	7,5882	89,3434	3,0787	0,3917

**Tabulka 18.:** Hodnoty parametru S testovaných vzorků nylonových vláken o průměru 500  $\mu\text{m}$

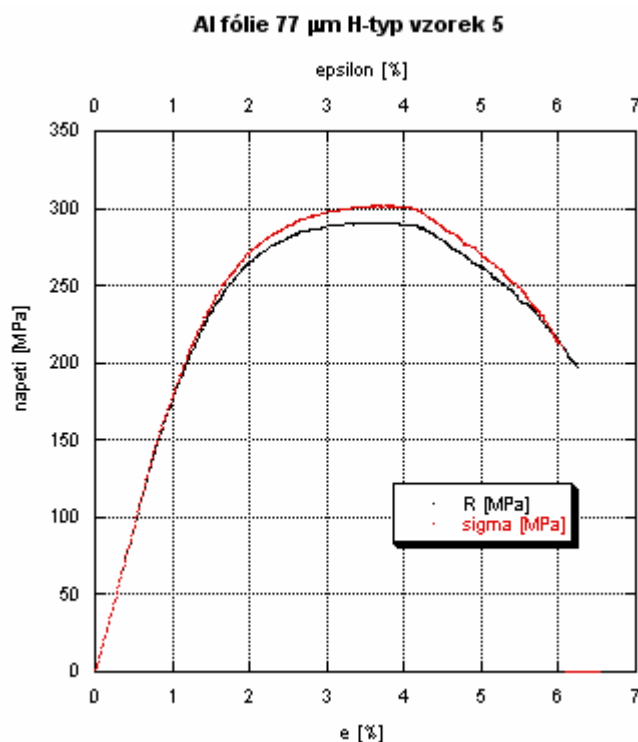
Nylonová vlákna 500 $\mu\text{m}$	$S_{nárůst}$
	[Pa.K <sup>-1</sup> ]
Nylonové vlákno 500 $\mu\text{m}$ _07	$2,56 \cdot 10^{-4}$

## 4.6. Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-typ

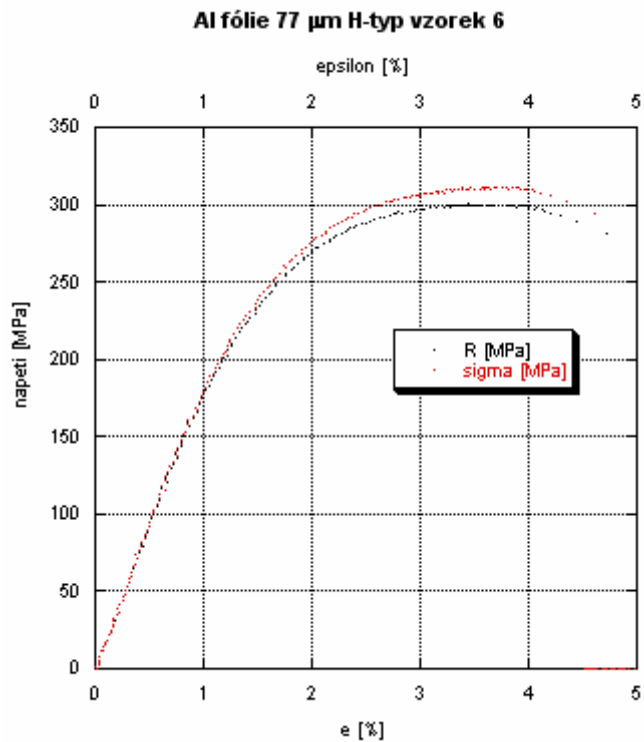
### 4.6.1. Tahové zkoušky

Bylo provedeno několik tahových zkoušek při různých rychlostech zatěžování. Výsledky jsou opět shrnuty do tabulek 19 a 20 a příklady tahových diagramů zkušebních vzorků 5, 6 a 7 jsou uvedeny na obr. 78, 79 a 80. Tento typ zkušebních vzorků z Al fólií byl vhodný pro tahové testy, což je patrné i z tvarů počátečních křivek uvedených tahových diagramů, jenž mají lineární průběh od počátečních hodnot zatěžování a není na nich patrný žádný odklon od linearit ve formě pozvolného náběhu. Dosažené hodnoty meze pevnosti jsou velmi vysoké, vezmeme-li v úvahu, že jde o hliníkové slitiny. Jejich rozptyl je poměrně nízký, při hodnotách tažnosti v rozmezí  $4 \div 6 \%$ . Na obr. 80 je uveden tahový diagram zkoušky, při níž byla opět nadefinována změna rychlosti deformace pro stanovení parametru  $S$ , jehož velikost je v tomto případě  $4,29 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{K}^{-1}$  (viz. tabulka 21). Tento vzorek však nebyl schopen snášet tuto vyšší rychlost deformace a po krátké době došlo k jeho lomu.

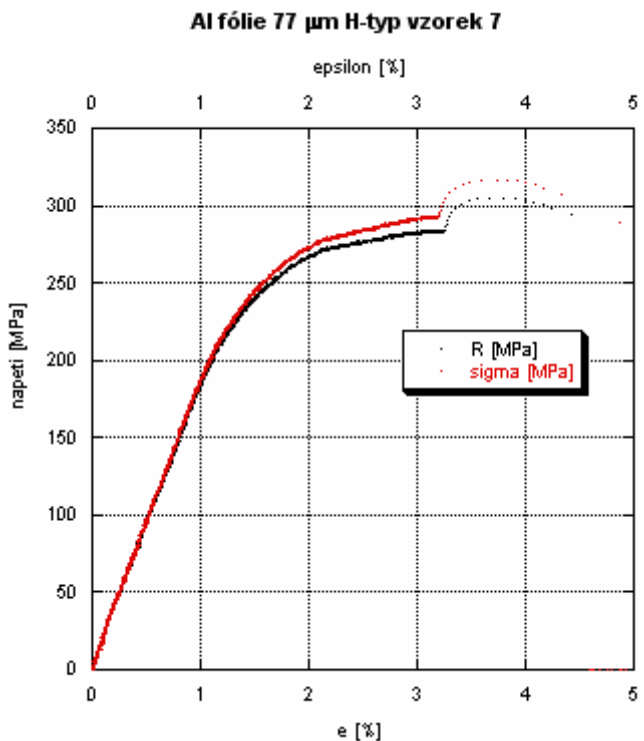
Na obr. 81 je uveden snímek vzorku 6 po lomu, k němuž docházelo u tohoto materiálu pravidelně pod úhlem přibližně  $45^\circ$ . Před vlastním lomem často docházelo k vytvoření skluzového pásu viditelného i pouhým okem. Na obr. 82 je snímek vzorku 4, jehož zatěžování bylo přerušeno těsně před lomem. Skluzový pás je na něm jasně zřetelný.



Obr. 78. Záznam tahové zkoušky Al fólie o tloušťce 77  $\mu\text{m}$  H-typ zkušebního vzorku 5



Obr. 79. Záznam tahové zkoušky Al fólie o tloušťce 77  $\mu\text{m}$  H-typ zkušební vzorku 6



Obr. 80. Záznam tahové zkoušky Al fólie o tloušťce 77  $\mu\text{m}$  H-typ zkušební vzorku 7 se zvýšením rychlosti deformace v průběhu testu

**Tabulka 19.:** Přehled výsledků tahových zkoušek Al fólií 77 µm H-typ

Al fólie 77 µm H-typ	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_f$	$\Delta e/\Delta t$
	[MPa]	[MPa]	[%]	[s <sup>-1</sup> ]
Al fólie 77 µm H-typ_04	201,11	298,17	5,74	1.10 <sup>-4</sup>
Al fólie 77 µm H-typ_05	231,10	301,94	5,22	1.10 <sup>-3</sup>
Al fólie 77 µm H-typ_06	228,06	311,56	2,63	1.10 <sup>-2</sup>
Al fólie 77 µm H-typ_07	246,53	316,83	3,14	1.10 <sup>-4</sup> → 1.10 <sup>-2</sup>

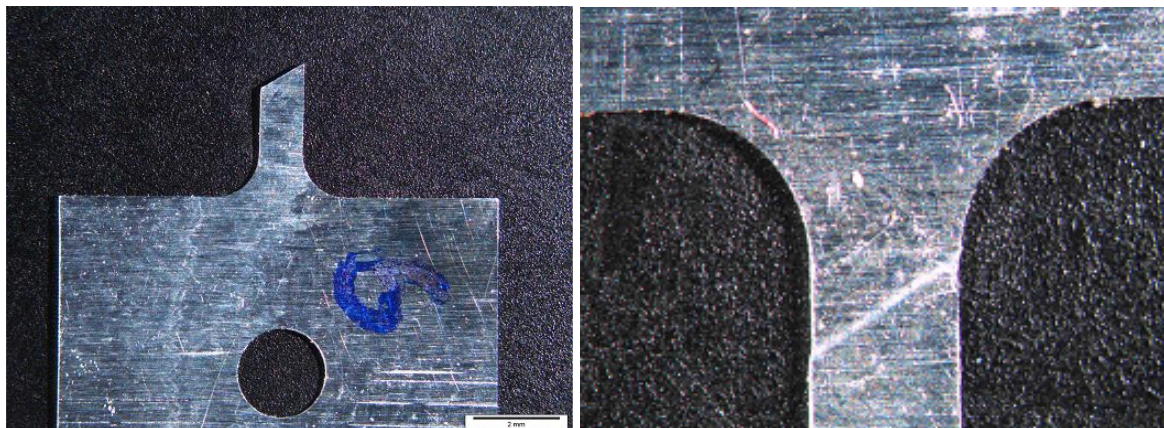
Pozn.: Měrná délka  $L_0$  zkušebních vzorků fólií H-typ byla 2 mm  
a šířka v místě měrné délky vzorku byla 1 mm

**Tabulka 20.:** Aritmetický průměr a směrodatná odchylka výsledků tahových zkoušek Al fólií 77 µm H-typ

Al fólie 77 µm H-typ	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_f$
	[MPa]	[MPa]	[%]
Aritmetický průměr	226,7000	307,1250	4,1825
Směrodatná odchylka	16,3500	7,4319	1,3228

**Tabulka 21.:** Hodnoty parametru S testovaných vzorků Al fólií 77 µm H-typ

Al fólie 77 µm H-typ	$S_{\text{nárůst}}$
	[Pa.K <sup>-1</sup> ]
Al fólie 77 µm H-typ_07	4,29.10 <sup>-5</sup>



Obr. 81 (vlevo). Al fólie o tloušťce 77 µm H-typ vzorek 6 po lomu; lom je pod úhlem přibližně 45°

Obr. 82 (vpravo). Al fólie o tloušťce 77 µm H-typ vzorek 4 po zkoušce přerušené těsně před lomem vzorku; zřetelný skluzový pás pod úhlem přibližně 45°

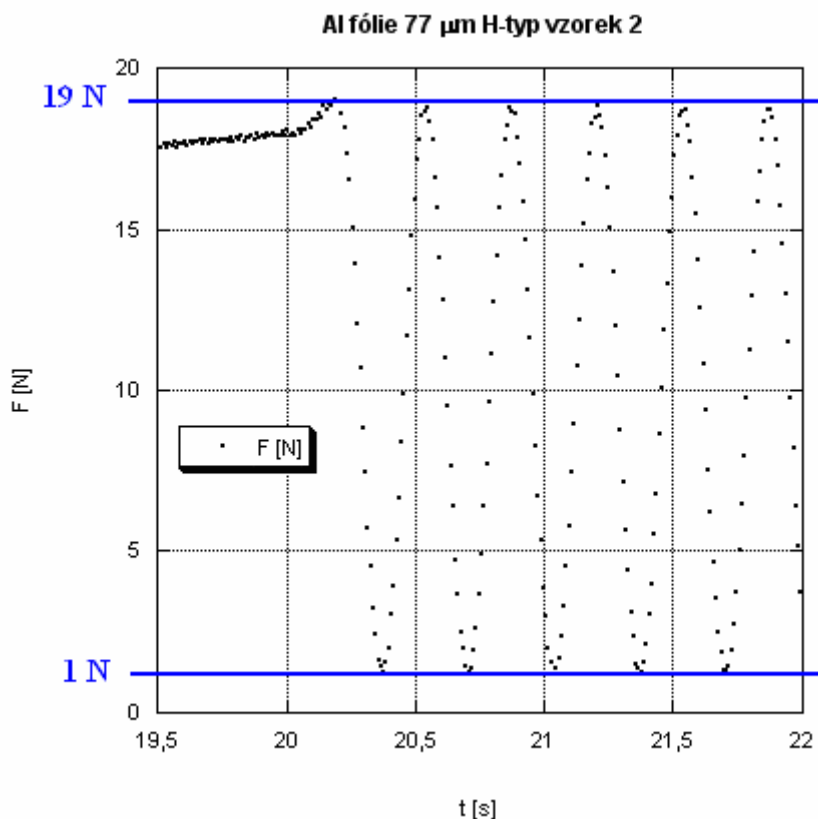
#### 4.6.2. Cyklické zatěžování

Na vzorcích typu H byly provedeny tři zkušební únavové testy v míjivém cyklu. Testy byly provedeny v režimu řízené síly, kdy minimální síla v každém cyklu ve všech zkouškách byla konstantní, rovna 1 N. Maximální hodnota síly byla rovněž udržována na konstantní hladině, konkrétní hodnoty pro jednotlivé testy jsou uvedeny v tabulce 22. Parametr  $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$  se pohyboval okolo 0,05. Zatěžovací frekvence byla zvolena 3 Hz.

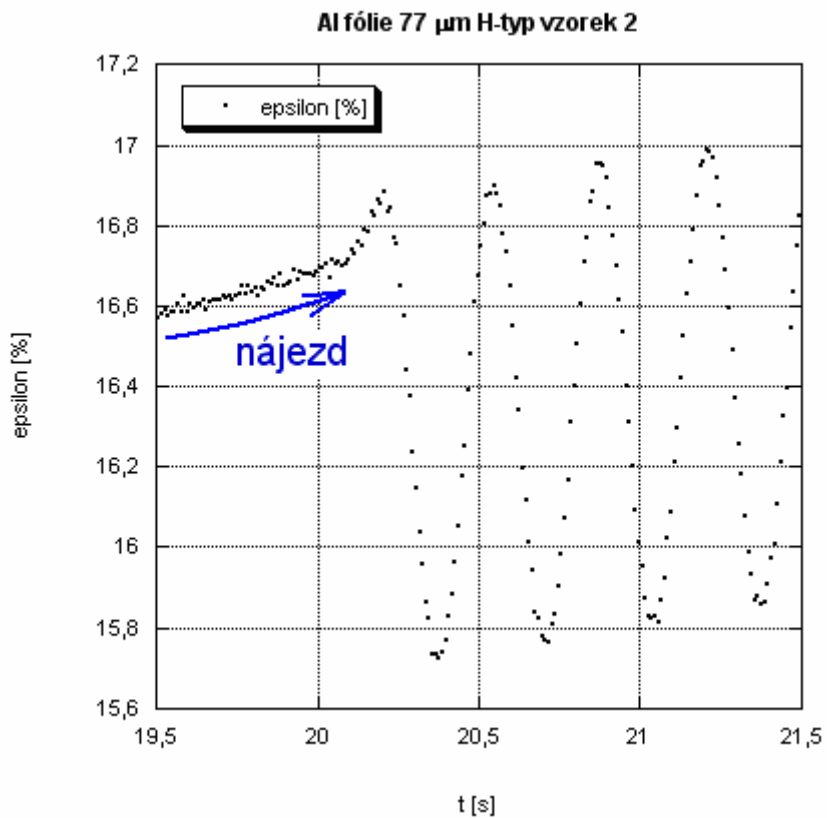
Obr. 83 až 85 ukazují zatěžování a odezvu materiálu pro vzorek 2. Na obr. 83 je vidět počáteční pomalý nájezd síly na maximální hodnotu, po němž následovalo vlastní cyklování. Na obr. 84 je ukázán průběh deformace, kde je zřetelné, že se amplituda deformace zvyšovala s přibývajícím počtem cyklů. Sejná závislost je na obr. 85 pro prvních 120 cyklů, kde je vidět, že změna  $\epsilon_{max}$  a  $\epsilon_{min}$  je nejrychlejší na počátku zatěžování a má saturační chování.

Obdobné grafy pro vzorek 8 jsou uvedeny na obrázcích 86 a 87 a pro vzorek 9 na obrázcích 88 a 89. U těchto vzorků byl zvolen režim postupného zvyšování amplitudy síly před dosažením nadeřinované hodnoty příslušných testů. Životnosti těchto tří zmíněných vzorků jsou uvedeny v tabulce 22 a vykresleny na obr. 90.

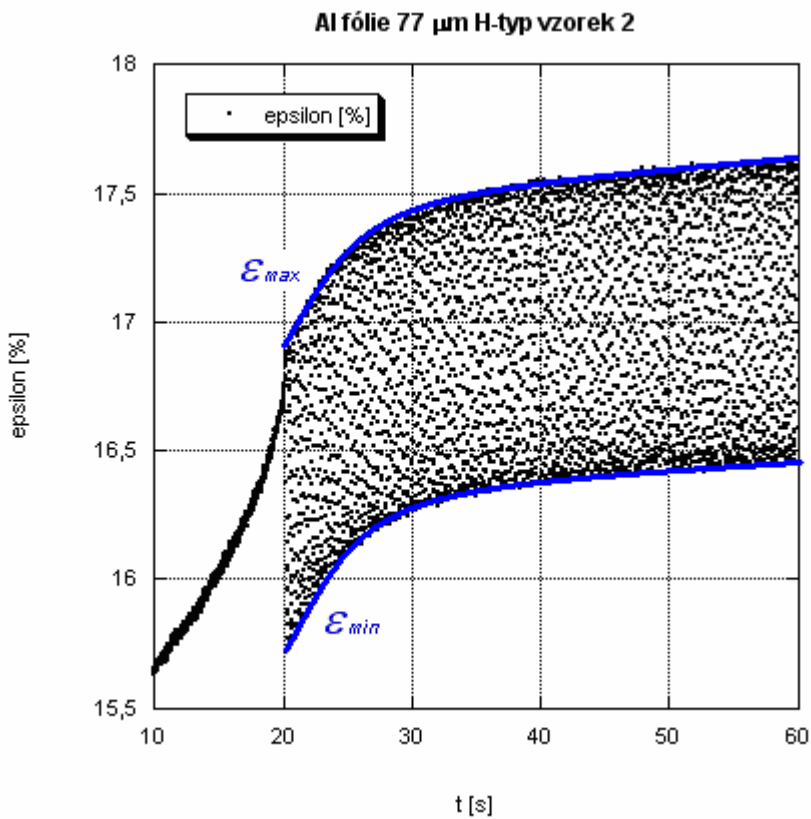
Pozorování vzorků po lomu ukázalo, že u vzorku 2 ( $N_f = 89\ 244$  cyklů) se magistralní trhlinka šířila kolmo na osu vzorku (viz. obr. 91 vlevo), jak je u únavových lomů obvyklé. Naproti tomu u vzorku 9, který praskl ve třetím cyklu, se trhlinka šířila pod úhlem  $45^\circ$  a odpovídá tedy spíše lomům pozorovaným při tahové zkoušce (viz. obr. 91 vpravo).



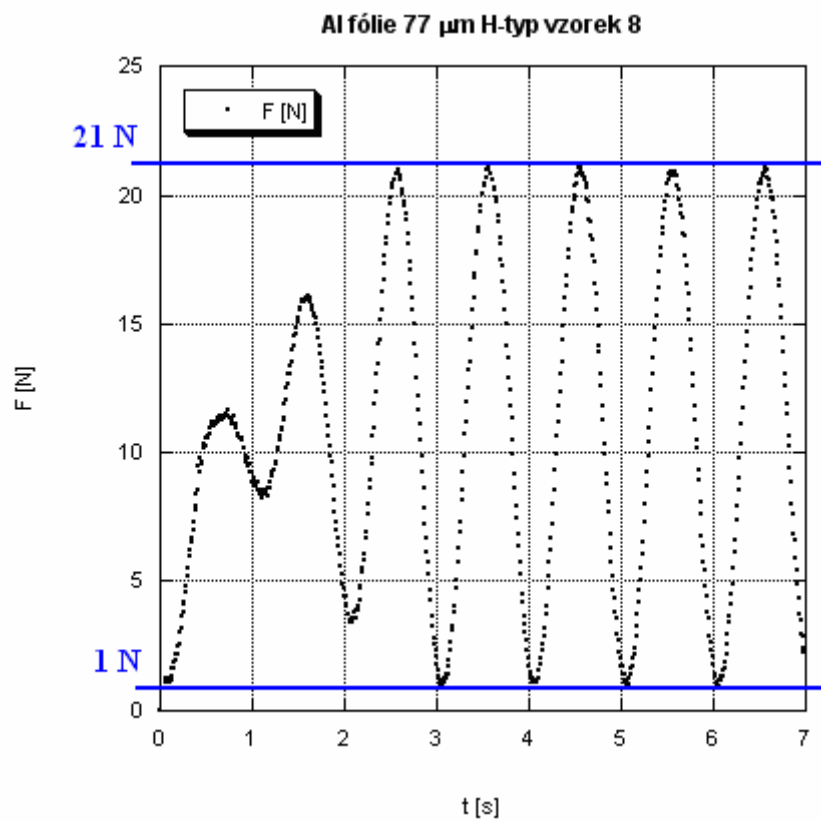
Obr. 83. Nájezd síly na maximální hodnotu a vyznačení konstantních  $F_{max}$  a  $F_{min}$  při vlastním cyklování Al fólie 77 μm H-tyt vzorku 2



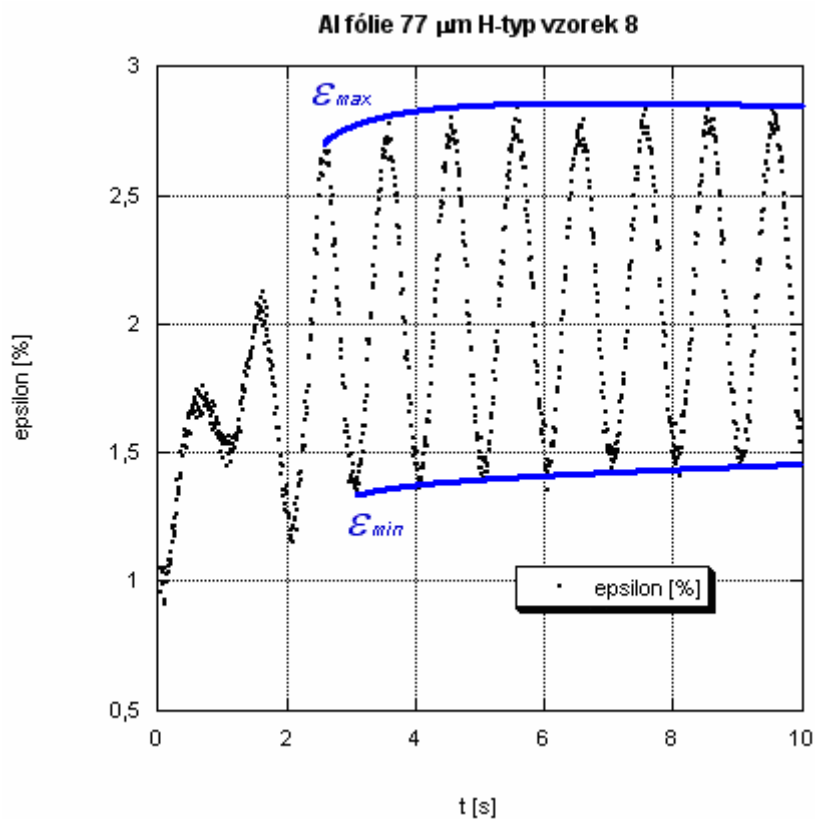
Obr. 84. Průběh deformace Al fólie 77 μm H-tyt vzorku 2 při cyklování a zřetelné zvyšování amplitudy deformace s přibývajícím počtem cyklů



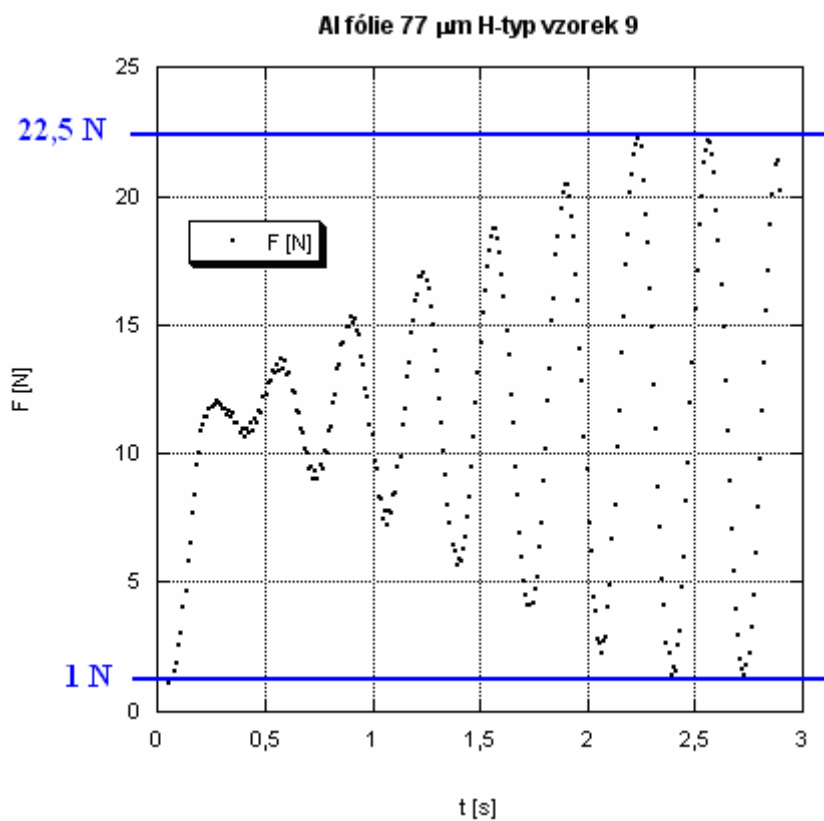
Obr. 85. Průběh deformace Al fólie 77 μm H-tyt vzorku 2 při cyklickém zatěžování pro prvních 120 cyklů



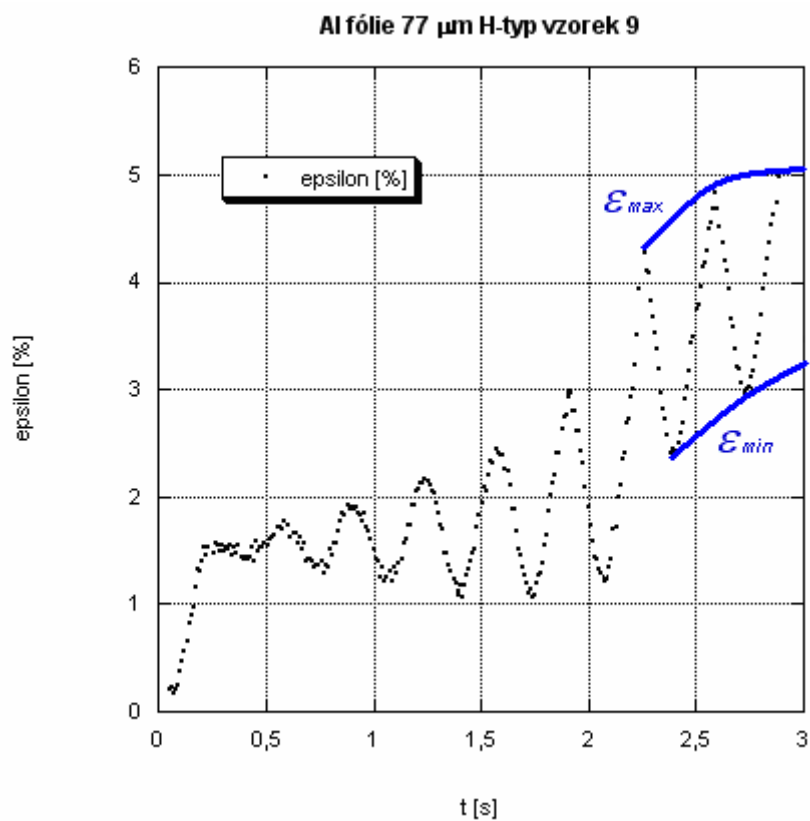
Obr. 86. Postupné zvyšování amplitudy síly na maximální hodnotu a vyznačení konstantních  $F_{max}$  a  $F_{min}$  při vlastním cyklování Al fólie 77  $\mu\text{m}$  H-typ vzorku 8



Obr. 87. Průběh deformace Al fólie 77  $\mu\text{m}$  H-typ vzorku 8 při cyklickém zatěžování pro prvních 8 cyklů

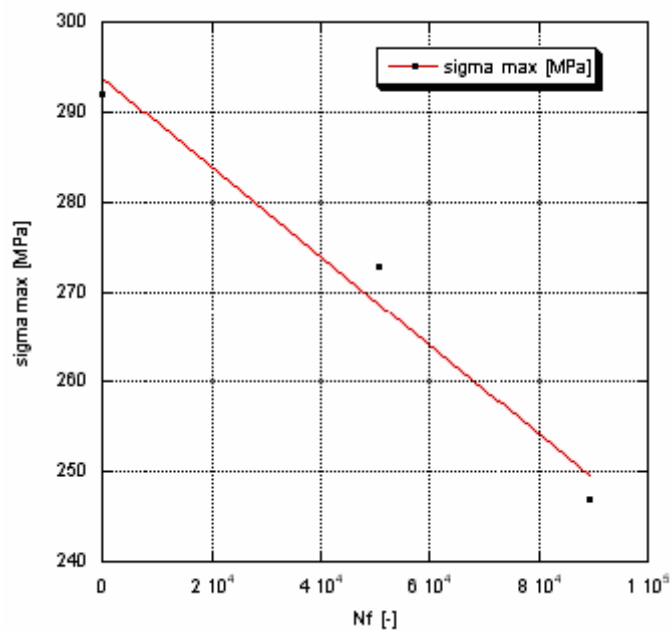


Obr. 88. Postupné zvyšování amplitudy síly na maximální hodnotu a vyznačení konstantních  $F_{max}$  a  $F_{min}$  při vlastním cyklování Al fólie 77  $\mu\text{m}$  H-tyt vzorku 9



Obr. 89. Průběh deformace Al fólie 77  $\mu\text{m}$  H-tyt vzorku 9 při nájedzu a cyklickém zatěžování pro 2 cykly

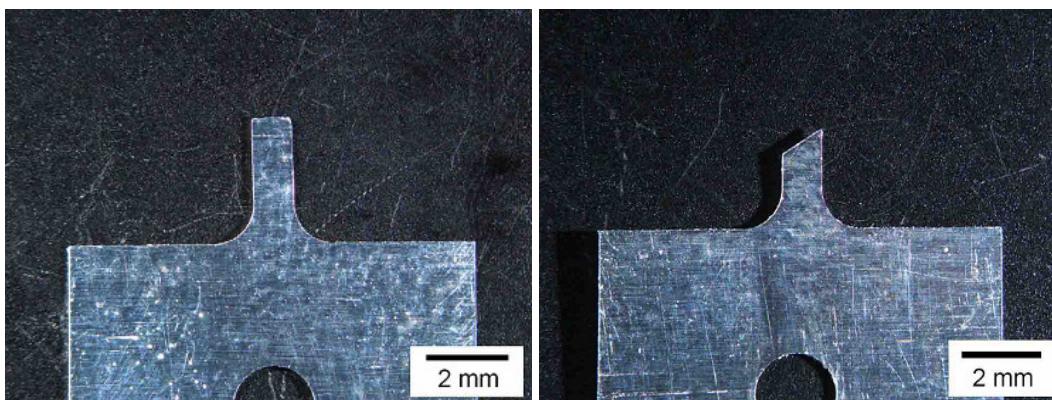




Obr. 90. Graf životnosti únavových H-tyt vzorků 2, 8 a 9 z Al fólie 77  $\mu\text{m}$

**Tabulka 22.:** Přehled výsledků únavových zkoušek Al fólií o tloušťce 77  $\mu\text{m}$  H-tyt

Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-tyt	$F_{\min}$	$F_{\max}$	f	$N_f$	$\sigma_{\max}$
	[N]	[N]	[Hz]	[cyklů]	[MPa]
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-tyt_02	1	19	3	89 244	247,08
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-tyt_08	1	21	1 $\rightarrow$ 3	50 681	273,20
Al fólie 77 $\mu\text{m}$ H-tyt_09	1	22,5	3	2	292,03



Obr. 91. H-tyt vzorek 2 z Al fólie 77  $\mu\text{m}$  s lomem kolmým na osu vzorku (vlevo) a H-tyt vzorek 9 z Al fólie 77  $\mu\text{m}$  s lomem pod úhlem přibližně 45° (vpravo) po únavových zkouškách

## 5. DISKUSE

V této kapitole budeme diskutovat dva nejzávažnější okruhy problémů, které se při experimentech vyskytly: různé způsoby upínání vzorků a nestandardní chování zatěžovacího stroje.

### 5.1. ZPŮSOBY UPÍNÁNÍ VZORKŮ, JEJICH VÝHODY A NEVÝHODY

#### 5.1.1. Vlákná uchycená pomocí epoxidového lepidla

Příklad záznamu tahové zkoušky vzorku na jehož přichycení k nosné papírové podložce bylo použito epoxidové lepidlo, je uveden např. na obr. 62 (Al vlákno o průměru 180  $\mu\text{m}$  vzorek 2). Pro tento způsob přípravy zkušebních vzorků byl použit běžný a volně dostupný typ epoxidového lepidla, jenž nemá garantované žádné mechanické ani fyzikální vlastnosti, proto mohlo během prováděných testů teoreticky docházet k deformacím nejen zkušebních vzorků, ale rovněž i této epoxidové hmoty. Je důležité si uvědomit, že hodnoty měřené síly tímto nejsou ovlivněny, protože síla se přenáší integrálně celým zatěžovacím systémem včetně vzorku. Mez pevnosti tedy není případnou deformací lepidla ovlivněna a může být měřena. Podobně je proveditelné cyklické zatěžování provedené v režimu řízené síly, kde lze vyhodnotit křivku životnosti amplituda napětí (případně maximální napětí) versus doba života. Tyto dvě charakteristiky jsou také uvedeny v článku [14], kde autoři použili k upínání vláken epoxidové lepidlo. Problém ovšem nastává při měření deformace. Jsou možné dvě situace. Pokud se lepidlo deformuje jen elasticky a lineárně, jeho deformace ovlivní pouze sklon lineární části tahového diagramu, jakýkoli odklon křivky od lineární závislosti je pak způsoben pouze plastickou deformací vzorku. V tomto případě lze z tahového diagramu vyhodnotit smluvní mez kluzu i tažnost. Pokud se ovšem lepidlo deformuje plasticky, anebo elasticky avšak nelineárně s napětím, není možné z měřené hodnoty deformace vliv lepidla vyloučit a měření deformace je nevěrohodné. Bohužel, epoxidové lepidlo velmi pravděpodobně nesplňuje požadavek lineární elasticity.

Na druhé straně je epoxidové lepidlo levný a na trhu běžně dostupný materiál, který vyžaduje na samotnou přípravu vzorků minimální čas, je možné považovat epoxidové lepidlo v kombinaci s nosnou papírovou podložkou, která splnila všechny požadované funkce bez výhrad, za vhodný materiál k přípravě malých zkušebních vzorků. Čas nutný na samotnou přípravu zkušebních vzorků je únosný. Adheze použitého lepidla k Al vláknům byla vynikající, nikdy nedošlo k vytahování vláken z lepidla. Tento způsob upínání je tedy vhodný k experimentům, u nichž není nutné přesné měření deformace.

#### 5.1.2. Vlákná uchycená pomocí Belzony

Dobré zkušenosti s běžným epoxidovým lepidlem ukázaly, že tento způsob uchycování vláken je možný. Proto bylo zakoupeno dvousložkové lepidlo Belzona 1311, které má pro naše účely zřejmě nejvhodnější parametry ze všech na trhu dostupných lepících hmot. Příklad záznamu tahové zkoušky zkušebního vzorku, na jehož přichycení k nosné papírové podložce byla použita Belzona, je uveden např. na obr. 64 (Al vlákno o průměru 180  $\mu\text{m}$  vzorek 14). Výrobce jsou garantovány vysoké hodnoty pevnosti a modulu ve smyku. Použitím Belzony se výrazně snižuje deformace lepidla během testů, což zvyšuje reprodukovatelnost a věrohodnost získaných výsledků prováděných mechanických zkoušek.

Samotná příprava vzorků musí probíhat relativně rychle, neboť základní složka s již přimíchaným tvrdidlem poměrně rychle tuhne. Výrobce v návodu uvádí dobu aplikace Belzony při teplotě 25  $^{\circ}\text{C}$ , jenž činí 15 minut. Pokud během přípravy Belzonová hmota začne

pozvolna tuhnout (tvoří se drobné hrudky), hrozí, že nedojde k dokonalému přilnutí (obalení) povrchu připravovaných vzorků doprovázené nižší adhezí a mechanickými charakteristikami fixační hmoty. V souvislosti s tím se nám osvědčilo nemíchávat větší množství Belzony na přípravu více vzorků, ale připravit množství příslušející vždy pouze pro jediný zkušební vzorek.

Náročnost přípravy zkušebních vzorků lepených Belzonou je přibližně srovnatelná s epoxidovým lepidlem i celková doba nutná na přípravu vzorků je rovněž jako v případě epoxidu relativně únosná, avšak Belzona je výrazně cenově dražší.

Nylonová vlákna uchycená pomocí Belzony nebylo možné testovat, neboť již při minimálních hodnotách napětí na začátku testu docházelo k vytahování těchto vláken z Belzonové hmoty. U všech tímto způsobem připravených vzorků, byly mezi povrchem nylonových vláken a Belzonovou hmotou (i po zatuhnutí Belzony) vyvinuty jen malé adhezní síly. Příprava zkušebních vzorků pomocí Belzony tedy není vhodná pro nylonová vlákna.

V případě upínání tenkých hliníkových vláken pomocí Belzony, docházelo ve většině případů k lomu těchto vzorků buď na rozhraní Belzonové hmoty a testovaného vzorku (viz. obr. 92) nebo přímo v belzonové hmotě. Je zde proto reálná možnost, že Belzona mohla chemicky narušit povrch hliníkových vláken (chemickou korozi), což vedlo k redukci jejich nosného příčného průřezu a k lomům zkušebních vzorků v těchto poškozených místech. Možné chemické ovlivnění Al vláken (belzonovou hmotou) však již nebylo v tomto experimentu detailněji zkoumáno. Pokud by nebyly tyto domněnky potvrzeny, je možné Belzonu (opět v kombinaci s nosným papírovým rámečkem) považovat za vyhovující lepicí materiál při upínání tenkých hliníkových vláken. Pokud by však skutečně docházelo k chemickému poškození hliníkových vláken, není možné tento způsob upínání pro testy Al vláken použít.



Obr. 92. Al vlákno o průměru 500  $\mu\text{m}$  vzorek 2 po lomu na rozhraní vlákna a Belzony

### 5.1.3. Vlákna uchycená pomocí brusného papíru

Při upínání testovaných Al vláken o průměru 180  $\mu\text{m}$  v tomto experimentu pomocí epoxidového lepidla, je počáteční oblast tahových diagramů těchto vzorků tvořena dvěma přímkami s odlišným sklonem, jak je patrné z obrázků 62 a 63, na nichž jsou uvedeny tahové diagramy Al vláken o průměru 180  $\mu\text{m}$ . Směrnice strmější přímkou, jež končí přibližně při 10 MPa, odpovídá sklonu přímek při odtížení prováděných rovněž později v testu. To znamená, že tato první přímkou znázorňuje elastickou deformaci zatěžovaného vlákna. V oblasti napětí přibližně nad 10 MPa má druhá přímkou menší sklon než přímkou v počáteční části těchto tahových diagramů. Domníváme se proto, že v této fázi testu dochází k elastické deformaci epoxidového lepidla. Plastická deformace zkušebních vzorků začíná teprve od hodnoty přibližně 30 MPa.

Abychom tento negativní efekt upínací hmoty vyloučili nebo alespoň potlačili, byla pro upínání použita Belzona. Jak je ale patrné z tahového diagramu zkušebního vzorku Al vlákna o průměru 180  $\mu\text{m}$  uvedeného na obr. 64, i při použití Belzony docházelo opět k odklonu od linearity (vytvoření dvou přímek s odlišným sklonem) v elastické oblasti diagramu.

Proto byly zkušební vzorky 15 a 16 Al vláken o průměru 180  $\mu\text{m}$  upínány do čelistí zkušebního stroje pouze pomocí brusného papíru, jenž měl jednak zabránit poškození povrchu těchto vzorků ostrými hranami upínacích čelistí a jednak svým členitým povrchem zabraňovat vytahování vláken z těchto čelistí v průběhu testu. Z tahového diagramu vzorku 15 Al vlákna o průměru 180  $\mu\text{m}$  jenž je uveden na obr. 66, je však zřejmé, že opět došlo k odklonu od linearity v elastické oblasti, navíc při nižších hodnotách napětí. Současně, jak již bylo dříve uvedeno (kapitola 4.3.), došlo při dotažení upínacích čelistí k plastické deformaci vláken, jež mělo za následek snížení napětí na mezi kluzu. Z tohoto důvodu nemůžeme upínání Al vláken přímo do čelistí pouze pomocí brusného papíru doporučit, i přesto, že jde o levný a nenáročný způsob uchycování tenkých vláken.

Protože nebylo možné testovat nylonová vlákna ani při uchycení pomocí epoxidového lepidla a ani použitím Belzony, byly při testech uchyceny rovněž přímo do čelistí pouze pomocí brusného papíru, který měl plnit stejné funkce, jako v případě Al vláken o průměru 180  $\mu\text{m}$ . K testování těchto nylonových vláken obou průměrů bylo zamýšleno vyrobit speciální přípravek, v němž by byla jejich měrná délka zakončena dvojicí kladek a volné konce těchto vláken byly navinuty na hřídelky. Pokluzům vláken v průběhu testu je zabráněno pouze vlivem smykového tření vyvolaného mezi jejich povrchem a povrchem hřídelek, na něž jsou navinuty několika závitů. Výhodou tohoto upínacího přípravku je, že při tomto způsobu upnutí nedochází k poškození příčného průřezu testovaných vláken např. ozubením běžných upínacích čelistí. Protože však v období vyhrazeném na provádění mechanických zkoušek došlo k poškození zkušebního stroje MTS Tytron 250, jenž byl poté poměrně dlouhou dobu mimo provoz, nebyl již tento záměr upínat nylonová vlákna při testech pomocí přípravku realizován.

### 5.1.4. Uchycení Al fólií

Prvním typem testovaných zkušebních vzorků z Al fólií o tloušťce 0,077 mm v tomto experimentu byly stříhané pásy, připravované stříháním na pákových nůžkách, které měly sloužit pouze pro zjištění orientačních hodnot pevnostních charakteristik těchto zde testovaných Al fólií a k získání prvních zkušeností se strojem. Výsledky těchto „pokusných“ mechanických testů proto nebyly uvedeny ve výsledcích experimentu.

Druhým typem zkušebních vzorků z Al fólií byl zkušební vzorek typu H. Jednalo se o vzorky určené pro tahové zkoušky, neboť měly na rozdíl od předchozího typu zkušebních vzorků upínací hlavu a tvarově definovanou měrnou délku  $L_0$ , jejíž rozměr činil 2 mm. Při výrobě těchto zkušebních vzorků bylo na sebe navrstveno několik těchto hliníkových fólií mezi nimiž byl vložen jemný papír zabraňující jejich vzájemnému spojení. Tento sendvič byl sevřen mezi dva tlustší ocelové plechy. Výsledný tvar těchto zkušebních vzorků z takto připraveného sendviče vyfrézován. Z výsledků tahových zkoušek provedených na tomto typu zkušebních vzorků je zřejmé, že vzorky typu H jsou skutečně k těmto testům vhodné. Výroba těchto vzorků proběhla na Univerzitě v Poitiers, kde tímto způsobem vyrábějí vzorky již řadu let s dobrými výsledky.

Na základě získaných materiálových charakteristik těchto fólií z testů předchozích typů zkušebních vzorků byl navržen tvar a rozměry třetího typu vzorků R20 určeného především pro zjišťování únavových vlastností těchto fólií. Tyto vzorky se ovšem nepodařilo na stroji Tytron zdeformovat, jak je diskutováno v následující kapitole.

Všechny tyto tři typy zkušebních vzorků z Al fólie o tloušťce 77  $\mu\text{m}$  byly do čelistí zkušebního stroje MTS Tytron 250 upínány volně, bez použití jakýchkoliv pomocných upínacích materiálů a brusného papíru a k dotahování upínacích čelistí byl použit momentový šroubovák. Při prvních testech, kdy byl použit orientačně zvolený utahovací moment o velikosti 20 cN/m, docházelo v průběhu testů k vytahování těchto vzorků z upínacích čelistí. Byla proto změněna velikost utahovacího momentu šroubováku z hodnoty 20 cN/m na hodnotu 80 cN/m, která již byla pro tyto testy Al fólií vyhovující a nedocházelo již k jejich vytahování při zkoušce.

## 5.2. ZKUŠENOSTI S CHOVÁNÍM STROJE MTS TYTRON 250

### 5.2.1. Volba vhodného PID

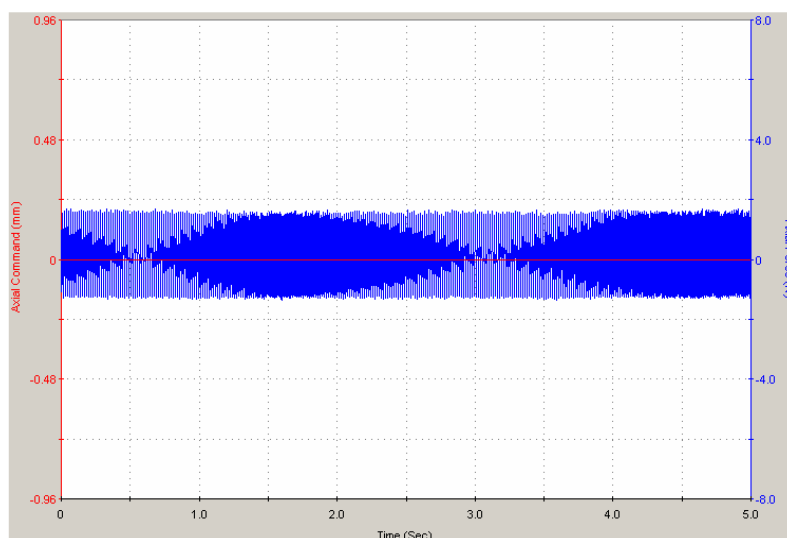
Zatěžování je u stroje Tytron uskutečňováno aktuátorem plovoucím na vzduchovém polštáři, jehož poloha je řízena elektromagnety. Při vypnutém motoru je možné s aktuátorem lehce pohybovat, neexistuje tedy žádná pevná nulová poloha aktuátoru. Při zapnutém motoru se stroj snaží pohybovat s aktuátorem tak, aby řídicí signál byl v co nejlepším souladu s kontrolním signálem ze snímače. Stroj může být řízen ve třech režimech: řízení v režimu síly, řízení v režimu kontroly přemístění (kontrolní signál je čten z LVDT snímače polohy umístěného v zatěžovací jednotce) a řízení v režimu kontroly ze snímače polohy s vysokým rozlišením.

Rychlost, s jakou stroj vyrovnává rozdíl mezi požadovanou a skutečnou hodnotou řídicí veličiny, je určena pomocí PID parametrů (proportional–integral–derivative controller). Nesprávně nastavené PID parametry vedou k nestabilnímu chování stroje, jeho vibracím (viz. obr. 93) nebo nekontrolovatelnému rozjetí aktuátoru. Ovládání pohyblivého elementu je tedy založeno na obdenném principu jako u hydraulických strojů. Naše zkušenosti bohužel ukazují, že stroj Tytron je velmi citlivý na správné nastavení PID parametrů a jejich volba je tedy klíčovým problémem při provádění experimentů.

Pokud provádíme experimenty z dosud netestovaným materiálem, anebo se vzorkem o nových rozměrech, je nalezení správných PID parametrů obtížný úkol, protože parametry se mění v rozsahu mnoha řádů způsobem, jehož logiku jsme ne zcela odhalili (příklady PID parametrů uváděných výrobcem jsou v tabulce 23). PID parametry se navíc pochopitelně liší pro řízení síly a pro řízení přemístění.

**Tabulka 23.:** Příklady PID parametrů udávaných výrobcem

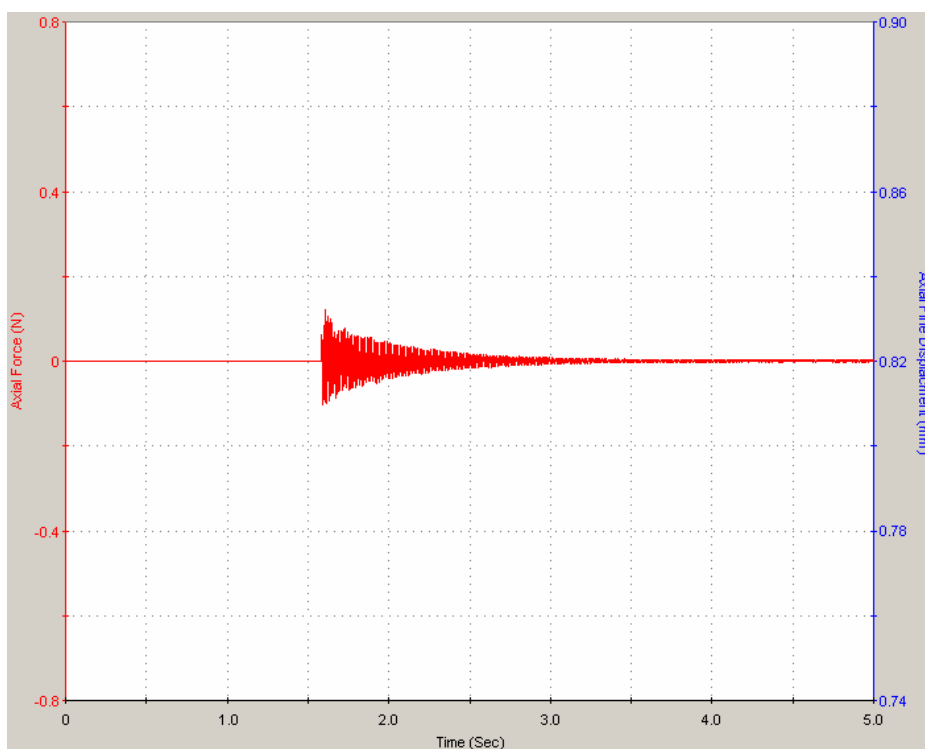
vzorek	řízení přemístění			řízení ze snímače s vysokým rozlišením			řízení síly		
	P	I	D	P	I	D	P	I	D
bez vzorku	2,0	0,5	0,04	2,2	2,5	0,044	-	-	-
uhlíkové vlákno				0,253	17311	0,0012	0,01	7585	0,0015
polymer				2,20	60	0,044	225	3613	4,0
elastomer				-	-	-	4748	8000	104



Obr. 93. Záznam vibrací stroje v čase při špatné volbě PID parametrů

### 5.2.2. Záškub při zapnutí motoru testovacího stroje

Při uvedení motoru v chod, stroj vždy provede záškub. Na obr. 94 je ukázán příklad tohoto záškubu. Při sledování maximální a minimální hodnoty záškubu se stejným vzorkem bylo zjištěno, že se tyto parametry mění s polohou aktuátoru. V rozsahu možných poloh aktuátoru jsou dvě místa, kde tyto záškuby jsou minimální. Znamená to, že stroj se nechová stejně ve všech polohách aktuátoru. Dále bylo zjištěno, že ve zmíněných dvou místech je stroj obtížně naladitelný tj. obtížněji než jinde se hledají vhodné parametry PID. Z opačného pohledu to znamená, že nalezneme-li fungující PID v jedné určité poloze aktuátoru, nemusí tyto hodnoty vyhovovat v jiných polohách. Může se tedy stát, že během deformační zkoušky se aktuátor dostane do polohy, kde původní PID parametry nepracují dobře a bylo by nutné během zkoušky PID parametry měnit, což pochopitelně není praktické a ani dost dobře možné. Je jasné, že tato vlastnost stroje je velmi nešťastná. U určitých vzorků tedy můžeme pracovat jen v omezeném pásmu polohy aktuátoru.



Obr. 94. Záškub stroje při uvedení motoru do chodu

### 5.2.3. Problémy během experimentu

Dokumentace MTS budí dojem, že PID parametry v případě řízení přemístění jsou vždy stejné, ať už se aktuátor pohybuje bez vzorku nebo s upnutým vzorkem. To ovšem je pravda jen u vzorků s malými zátěžnými silami. V našem případě se toto naštěstí týkalo všech studovaných vláken i vzorku typu H z Al fólie. Bylo tedy možné najít vhodné PID pro řízení přemístění v určité poloze aktuátoru bez vzorku a tyto hodnoty použít i pro vlastní testování. Jako ideální se ukázala pozice aktuátoru v okolí středu možného rozsahu polohy a parametry  $P = 5$ ,  $I = 4$ ,  $D = 0.05$ , vzorkovací frekvence 1000 Hz. V případě vzorků o vyšší tuhosti a vyšší mezi pevnosti už ovšem tyto PID nevyhovují a takové vzorky prakticky není možné na stroji Tytron testovat, jak je vysvětleno na příkladu vzorků R20 v příští kapitole.

Komplikovanější situace je v případě režimu řízení síly. Opět je velmi obtížné naladit stroj na nový typ vzorku. PID parametry se v tomto případě liší i pro různé úrovně sil a pro různou rychlost deformace. Postup při hledání parametrů PID a provádění zkoušky byl proto následující:

krok 1: Nejprve je třeba vyladit stroj v režimu řízení deformace bez vzorku.

krok 2: Vzorek musí být opatrně upnut do čelistí stroje za chodu motoru a v režimu řízení deformace. Při tomto procesu se mění tuhost celého systému a stroj je velmi náchylný k vibracím, což je následováno vypnutím motoru kvůli překročení ochranných limitů síly.

krok 3: Vzorek je mírně natažen, aby bylo dosaženo malé kladné síly v podmínkách elastické deformace.

krok 4: Jsou zvoleny počáteční hodnoty PID parametrů pro řízení v režimu síly.

krok 5: Řízení stroje je přepnuto do módu řízení síly.

krok 6: Pokud se stroj nerozvibruje, je řídicí signál zvolen jako pomalé cyklování s malou amplitudou síly. Je snaha naladit PID parametry tak, aby stroj plynule sledoval řídicí signál bez vibrací. Pokud se toto podaří, je amplituda cyklického zatěžování zvyšována a měněna frekvence cyklování stále blíže k požadovaným hodnotám u reálného testu. Každá změna amplitudy síly a frekvence může stroj rozvibrovat.

Je nutné počítat s tím, že během této procedury je vždy zničeno několik zkušebních vzorků, a že existence PID parametrů, které by byly vhodné pro příslušný vzorek v celém rozsahu zátěžné síly, není garantována.

#### 5.2.4. Vzorky R20 a havárie stroje

Při upínání těchto vzorků do čelistí testovacího stroje MTS Tytron 250 docházelo k axiálnímu rozvibrování aktuátoru, což způsobilo ve většině případů překročení limit síly nadefinovaných pro upínání zkušebních vzorků, jež aktivovalo spínač pro vypnutí motoru stroje. Je třeba říci, že při vypnutí stroje kvůli překročení limitů se aktuátor nezastaví na jednom místě, nýbrž se jen vypne pohonná jednotka stroje. Aktuátor poté volně plave na vzduchovém polštáři. Pokud se tedy v okamžiku vypnutí motoru pohybuje vpřed nebo vzad, tento pohyb není aktivací ochrany nijak zbržděn. Proto bylo možné, že i při nastavení nízkých ochranných limitů síly došlo k přetržení anebo předdeformování vzorku při vypnutí motoru.

V případě vzorků R20 se nám nikdy nepodařilo provést 2. krok experimentu, tzn. upnout vzorek do čelistí bez jeho zničení. Důvod je ten, že PID v řízení přemístění bez vzorku ( $P = 5$ ,  $I = 4$ ,  $D = 0.05$ ) a se vzorkem ( $P = 4.5$ ,  $I = 400$ ,  $D = 0.1$ ) se značně liší. Snažili jsme se o postup, kdy s postupným upínáním vzorku a tím narůstající tuhostí systému jsme pomalu zvyšovali hodnotu integrálního členu, ovšem většinou stejně došlo k vibraci následované vytažením vzorku z čelistí, prudkým poklesem tuhosti systému, nekontrolovanou vibrací aktuátoru a zničením vzorku. Při jednom takovém pokusu aktuátor dosáhl tak vysoké rychlosti před sepnutím ochrany, že došlo k srážce čelistí a poškození snímače síly. Stroj byl poté odvezen k výrobci do Minneapolis na opravu a kontrolu. Při vrácení stroje byl technik MTS požádán, aby provedl tahovou zkoušku vzorku R20, což se mu přes dvoudenní úsilí nepodařilo.



### 5.2.5. Shrnutí našich zkušeností se strojem MTS Tytron 250

Z výše uvedených zkušeností vyplývá, že stroj MTS Tytron má jen omezené možnosti využití. Je vhodný zejména pro dva typy vzorků:

- subtilní vzorky s velmi malými zátěžnými silami, jako jsou např. vlákna Al 180  $\mu\text{m}$ , kde se síla na mezi kluzu pohybovala kolem 1 N.
- vzorky s malou tuhostí, jako jsou polymery anebo velmi dlouhá kovová či keramická vlákna.

Naopak, stroj Tytron není schopen deformovat vzorky s vysokou tuhostí a vyššími zátěžnými silami a je tedy nepoužitelný např. pro válcové kovové vzorky s geometrií, kterou doporučuje norma pro zkoušku tahem [1] ( $L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$ ), keramiky s výjimkou dlouhých vláken apod. Tato skutečnost nebyla firmou MTS při výběrovém řízení zástupcům ÚFM sdělena. Protože kovové a keramické materiály jsou hlavním předmětem zkoumání na ÚFM, vedení ÚFM se rozhodlo na základě námi zjištěných vlastností stroje požadovat po firmě MTS vrácení peněz a odvezení stroje Tytron. Tato jednání v současné době stále probíhají.

## 6. ZÁVĚR

Bylo provedeno větší množství **tahových a únavových zkoušek** na několika typech zkušebních materiálů.

- Al vlákna o průměru 125  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$  vyrobená protahováním: vlákna při testech vykazovala nevýraznou mez kluzu a na počátku grafu nebyla závislost  $e - R$  lineární. Při testech bylo dosaženo vysokých hodnot meze kluzu i meze pevnosti, ale nízké tažnosti, neboť vlákna obou průměrů byla vyrobena protahováním za studena, což vedlo k jejich výraznému zpevnění. Rozptyl naměřených dat byl však u Al 125  $\mu\text{m}$  velmi nízký, což svědčí o vysoké reprodukovatelnosti prováděných testů těchto vláken na stroji MTS Tytron 250.
- Al vlákna o průměru 180  $\mu\text{m}$  připravená infiltrací Al do NaCl skeletu: realizace testů na těchto materiálech byla velmi komplikovaná z důvodů jejich malých rozměrů. Na těchto vzorcích byly mimo standardních tahových zkoušek provedeny rovněž složitější procedury, jako např. odtížení napětí a nebo zvýšení rychlosti deformace v průběhu testu.
- nylonová vlákna o průměrech 250 a 500  $\mu\text{m}$ : na těchto vláknech byly provedeny, jak běžné tahové zkoušky, na jejichž diagramech byl patrný tvar S-křivky typický pro plastové materiály, tak i testy studující jejich viskoelastické chování. Hodnoty Youngova modulu, vyhodnocované na základě normy pro tahové zkoušky plastů, byly přibližně 4 GPa blížily se hodnotám, jež udával výrobce.
- Al fólie o tloušťce 77  $\mu\text{m}$ : na vzorcích vyrobených z těchto fólií byly prováděny běžné tahové zkoušky a cyklické zatěžování v míjivém (tah-tah) cyklu. Dosažené hodnoty meze pevnosti při tahových zkouškách byly velmi vysoké, vezmeme-li v úvahu, že jde o hliníkové slitiny a jejich rozptyl byl poměrně nízký, při hodnotách tažnosti v rozmezí 4 ÷ 6 %.

V experimentu bylo také studováno několik způsobů **uchycení vzorků do čelistí** stroje. U Al vláken se osvědčilo použití epoxidového lepidla nebo Belzony v kombinaci s papírovou podložkou. U nylonových vláken se však ani jeden z těchto způsobů uchycování neosvědčil, neboť se mezi tímto materiálem a fixačními hmotami nevytvořily dostatečné adhezní síly. Proto zde byly při testech uchyceny do čelistí stroje jen pomocí brusného papíru. Tento způsob však rovněž nebyl vhodný z důvodů jejich poškození při dotažení upínacích čelistí. Jejich testy je nutné provádět pomocí speciálních přípravků. Z Al fólií byly vyrobeny vzorky typu H, které se velmi osvědčily pro tahové zkoušky a vzorky typu R20, jenž byly určeny výhradně pro únavové testy. Oba typy vzorků měly vyrobenou uchycovací hlavu pro upínání do čelistí.

Zkušenosti s **chováním stroje** MTS Tytron ukázaly, že stroj má jen omezené možnosti využití. Je vhodný zejména pro dva typy vzorků:

- subtilní vzorky s velmi malými zátěžnými silami, jako jsou např. vlákna Al 180  $\mu\text{m}$ , kde se síla na mez kluzu pohybovala kolem 1 N;
- vzorky s malou tuhostí, jako jsou polymery anebo velmi dlouhá kovová či keramická vlákna.

Naopak, stroj Tytron není schopen deformovat vzorky s vysokou tuhostí a vyššími zátěžnými silami a je tedy nepoužitelný např. pro válcové kovové vzorky s geometrií, kterou doporučuje norma pro zkoušku tahem ( $L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$ ), keramiky s výjimkou dlouhých vláken apod.

## 7. LITERATURA

- [1] Česká technická norma ČSN EN 10002-1 : 2002. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2002. 47 s.
- [2] Ptáček L. a kol. : *Nauka o materiálu I.*, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2003.
- [3] Mezinárodní norma ISO 22034-1 : 2007. *Steel wire and wire products – Part 1. : General test methods*. Geneva : ISO copyright office, 2007. 8 s.
- [4] Kruml T., Michel J.P. : *Mechanical Testing of Materials*, Ecole des Mines, Nancy, 2005.
- [5] Holzmann M. : *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*, skriptum VUT Brno, Brno 1982.
- [6] Česká technická norma ČSN EN ISO 527-1 : 1997. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Základní principy*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 16 s.
- [7] Ptáček L. a kol. : *Nauka o materiálu II.*, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2002.
- [8] Petrevec M. : *Diplomová práce*. VUT FSI, Brno 1999.
- [9] Suresh, S.: *Fatigue of Materials*, Cambridge university press, Cambridge 1998.
- [10] Klesnil M. a kol. : *Cyklická deformácia a únava kovov*, VEDA, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava 1987.
- [11] Klesnil M. and Lukáš P. : *Fatigue of Metallic Materials*, Elsevier Science Publishing, New York 1992.
- [12] Polák J. : *Cyclic Plasticity and Low Cycle Fatigue Life of Metals*, Academia, nakladatelství Československé akademie věd, Praha 1991.
- [13] Neuhauser J. : *Diplomová práce*. ČVUT Fakulta elektrotechnická, Praha 2004.
- [14] Chawla N., Kerr M. : Monotonic and Cyclic Fatigue Behavior of High-Performance Ceramic Fibers. *Journal Am. Ceram. Soc.*, 2005, Vol. 88, No. 1, s. 101-108.
- [15] Goodall R., Marmottant A., Salvo L., Mortensen A. : Spherical pore replicated microcellular aluminium: Processing and influence on properties. *Mat. Sci. Eng. A*, 2007, Vol. 465, s. 124-135.
- [16] Jiang B., Zhao N.Q., Shi C.S., Du X.W., Li J.J., Man H.C. : *Mater. Lett.*, 2005, Vol. 59, s. 3333-3336.
- [17] Jiang B., Zhao N.Q., Shi C.S., Li J.J. : *Scripta Mater.*, 2005, Vol. 53, s. 781-785.
- [18] Propagační materiál Tytron™ 250 Microforce Testing System, MTS Systems Corporation, autor neuveden, 2001, s. 12. Dostupné na Internetu: ([http://www.mts.com/stellent/groups/public/documents/library/dev\\_003371.pdf](http://www.mts.com/stellent/groups/public/documents/library/dev_003371.pdf)).
- [19] ASTM standard D 3379–75. *Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials*. ASTM, Philadelphia, PA. 1989.
- [20] Caillard D., Martin J.L. : *Thermally activated mechanisms in crystal plasticity*, Elsevier, Amsterdam, 2003.