

# Hodnocení kvality výrobků z POM

Bc. Petr Coufal

---

Diplomová práce  
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

*Vložit oficiální zadání bakalářské práce*

Touto cestou bych chtěl poděkovat za odborné vedení, cenné připomínky a návrhy k vypracování svého vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Halaškovi. Poděkování patří také Ing. Josefu Novotnému, doc. Ing. Karlu Stoklasovi, CSc. a doc. Ing. Františku Lednickému, CSc. Za možnost provedení diplomové práce děkuji firmě Robert Bosch, s.r.o., České Budějovice.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího diplomové práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 28. 05. 2006

.....

podpis

## RESUMÉ

Úkolem této diplomové práce bylo studium mechanických, lomových a konstrukčních vlastností POM. Zpracováním těchto výsledků vznikly doplňující hodnoty pro manuál kvality. Tělíška pro zkoušku vrubové houževnatosti, pro tahovou zkoušku a sledovaný výlisek byly vyrobeny vstřikováním z polyoxymethylenu. Tělíška, na kterých se prováděla zkouška vrubové houževnatosti, byla opatřena V vruby. Pro stanovení hodnot vrubové houževnatosti bylo použito instrumentované rázové Charpyho kladivo. Ze sledovaného výlisku byla dále vyříznuta tahová tělíška a provedena tahová zkouška. Dalším úkolem bylo sledování vlivu horkého paliva na zkušební tělíška a sledovaný výlisek. Zkušební vzorky byly tedy namáčeny po dobu 96 hodin v dieslu o teplotě 120°C. Pro hodnocení lomových vlastností POM byla vybrána metoda zkoumání pomocí SEM a pro hodnocení tokových vlastností metoda světelné mikroskopie. Tyto metody zkoumání byly dále porovnávány s mechanickou a moldflow analýzou.

The aim of this dissertation work was to study the mechanical, fracture and constructive features of POM. A quality manual was created after processing these results. The corpuscles for testing the impact value, tension and required stamping were created by injecting polyoxymethylene. The corpuscles tested for the impact value were equipped with V incisions. An instrumental impulse Charp hammer was used to determine the impact values. Tension corpuscles were extracted from the required stamping and tension test was conducted. The next task was to observe the impact of hot fuel on the experimental corpuscles and required stamping. The experimental corpuscles were soaked for a period of 96 hours in diesel of 120°C. For the evaluation of the fracture features of POM the method of SEM was chosen and for the evaluation of flow features the method of light microscopies. The methods of experimentation were compared to mechanical and moldflow analysis.

# OBSAH

ÚVOD .....	6
<b>I. 7</b>	
<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>7</b>
<b>1 ROBERT BOSCH.....</b>	<b>8</b>
1.1 Palivový modul.....	9
<b>2 POLYOXYMETHYLÉN POM.....</b>	<b>11</b>
<b>3 HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ .....</b>	<b>14</b>
3.1 Statické tahové zkoušky .....	14
3.2 Dynamické zkoušky rázové a vrubové houževnatosti .....	20
3.2.1 Metoda Charpy .....	21
<b>4 MORFOLOGIE LOMOVÝCH PLOCH.....</b>	<b>24</b>
4.1 Celkový vzhled lomové plochy.....	24
4.2 Faktory ovlivňující vzhled lomové plochy .....	25
4.3 Iniciace lomu .....	25
4.4 Lomové děje u polymerů.....	26
4.5 Křehký a tvárný lom .....	27
<b>5 KONSTRUKCE DÍLŮ, VLIV KONSTRUKCE NA VADY VÝROBKŮ .....</b>	<b>30</b>
5.1 Rozdělení vad .....	30
5.2 Zjevné vady .....	31
5.2.1 Vady tvaru .....	31
5.2.2 Vady povrchu .....	32
5.3 Skryté vady.....	33
5.4 Pravidla při navrhování tvaru výrobku .....	35
5.4.1 Úpravy tvaru výrobku.....	36
<b>II. 38</b>	
<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>38</b>
<b>6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>39</b>
<b>7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>40</b>
7.1 Použitý materiál.....	40
7.1.1 Kopolymer Iupital F20-03 .....	40
7.2 Výroba zkušebních těles a dílců Hrnec palivového modulu .....	43
7.2.1 Výroba zkušebních tělísek vstřikováním.....	43
7.2.2 Výroba dílců Hrnec palivového modulu vstřikováním .....	46
7.2.3 Výroba normalizovaných tělísek pro tahovou zkoušku.....	48
7.2.4 Výroba normalizovaných tělísek pro vrubovou houževnatost .....	49
7.2.5 Výroba nenormalizovaných tahových tělísek vyřezávaných z dílu Hrnec.....	49
7.3 Tahová zkouška .....	51
7.3.1 Princip tahové zkoušky.....	53
7.3.2 Zpracování dat.....	53
7.4 Zkouška vrubové houževnatosti .....	54
7.4.1 Princip zkoušky vrubové houževnatosti .....	55
7.4.2 Charpyho kladivo .....	55
7.4.3 Zpracování dat.....	56
7.5 Morfologie lomových ploch pomocí SEM.....	56

7.5.1	Skannovací (rastrovací) elektronový mikroskop SEM.....	57
7.5.2	Postup zkoušky.....	58
7.5.3	Zpracování výsledků .....	62
<b>7.6</b>	<b>Vliv konstrukčního řešení na vady výrobku – mikrotomové řezy .....</b>	<b>62</b>
7.6.1	Metody zkoumání vybraného dílu.....	63
7.6.2	Světelná mikroskopie (mikrotomové řezy) .....	63
7.6.3	Postup zkoušky.....	64
<b>8</b>	<b>DISKUSE K VÝSLEDKŮM.....</b>	<b>66</b>
8.1.1	Tahová zkouška .....	66
8.1.2	Vrubová houževnatost .....	75
8.1.3	Morfologie lomových ploch pomocí SEM, vliv konstrukce a plnění dílu Hrnc.....	77
8.1.4	Vliv konstrukčního řešení na vady výrobku - mikrotomové řezy .....	92
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>99</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>103</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>105</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>107</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>110</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>111</b>

## ÚVOD

Polymerní materiály dnes představují nejvýznamnější skupinu ze všech materiálů podle objemu výroby a spotřeby. Je to způsobené snadnou zpracovatelností, nízkou hustotou, odolností proti korozi a výhodným poměrem mezi vlastnostmi a cenou. Přestože nabízejí uživatelům mnoho výhod, mají ale obecně malou tuhost a pevnost ve srovnání s jinými materiály např. kovy nebo keramikou a to může následně snižovat jejich uplatnění v konstrukčních aplikacích.

Při zpracování polymerních materiálů na konečný výrobek se velmi často používá vstřikování. V dnešní době se tímto způsobem zpracovává kolem 32 hm. % celkové produkce plastů, z čehož 90 % tvoří termoplasty. Důležitost této technologie je dána především možností vyrábět rozměrově přesné výrobky při téměř bezodpadové produkci a s nízkou spotřebou energie. Díky tomu se dnes setkáváme se vstřikovanými výrobky prakticky na každém kroku [1, 17].

Při navrhování výrobku je kromě výběru materiálu a technologie zpracování velmi důležitá také jeho geometrie. Často se nedá zabránit geometrickým nespojitostem, jako jsou např. díry, drážky nebo vybrání, které se označují jako koncentrátoři napětí neboli vruby, protože lokálně zvyšují napětí. Přítomnost vrubu může podstatně ovlivnit výsledné hodnoty houževnatosti výrobku, která patří spolu s pevností k nejdůležitějším materiálovým vlastnostem [7, 9].

Tato diplomová práce se zabývá studiem statických, dynamických, lomových a konstrukčních vlastností polyoxymethylenu. Úkolem je doplnění získaných výsledků do manuálu hodnocení kvality výlisků z POM.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**



## 1 ROBERT BOSCH

Od roku 1964 patří Bosch k velikým průmyslovým nadacím světa. Zhruba 92% kmenového kapitálu společnosti Robert Bosch GmbH jsou vlastnictvím Nadace Robert Bosch GmbH. K oblastem, které nadace podporuje patří zejména péče o zdraví, porozumění mezi národy, dobročinnost, stejně jako vzdělávání a výchova, umění a kultura, sociální a přírodní vědy. S ohledem na své obecně užitečné zaměření se Nadace Robert Bosch GmbH zřekla svých hlasovacích práv ve společnosti Robert Bosch GmbH, vyplývajících z jejich obchodních podílů. Hlasovací práva byla převedena na společnost Industrietreuhand KG. Jejím úkolem je zajistit, aby Robert Bosch GmbH pokračovala v duchu zakladatele podniku. Jméno Robert Bosch je úzce svázáno s automobilem, ale není pojmem pouze pro automobilovou techniku. Pracovní oblasti skupiny Bosch jsou shrnuty do tří oblastí:

### 1) Technika motorových vozidel

Skupina Bosch patří k vůdčím podnikům, nabízejícím výrobky techniky motorových vozidel.

Čtyři největší pole činnosti jsou:

- technika vstřikování pro spalovací motory
- systémy aktivní a pasivní bezpečnosti vozidel (brzdy, ABS, ASR, ESP)
- elektrické stroje (startéry, generátory, malé el. motůrky)
- výrobky mobilní komunikace (autorádia, systémy pro navigaci)

Obchodní oblast Prodej automobilové techniky zodpovídá za zásobování náhradními díly výrobků Bosch ve více než 100 zemích.

Oblast techniky motorových vozidel investuje intenzivně do výzkumu a vývoje. Tím podnik přispívá k dalšímu rozvoji automobilové techniky, především v oblasti bezpečnosti, snášenlivosti se životním prostředím a hospodárnosti.

### 2) Průmyslová technika

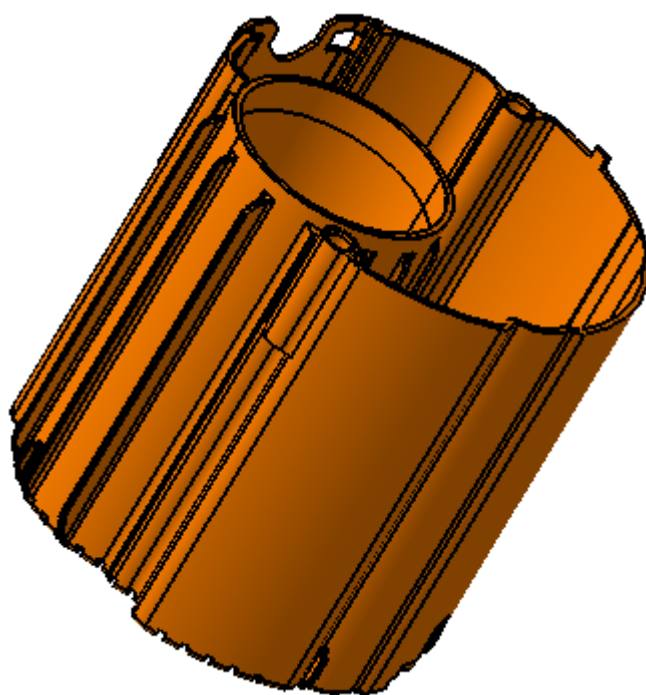
### 3) Spotřební zboží a technika budov

Společnost Robert Bosch v Českých Budějovicích byla založena 1. května 1992 jako společný podnik stuttgartského koncernu Bosch GmbH, Stuttgart a Motoru Jikov a.s. V roce 1995 se koncern Bosch stal jediným vlastníkem společnosti v Českých Budějovicích. Výrobní program zahrnuje komponenty automobilové techniky pro koncernovou divizi GS – Gasoline Systems (palivové systémy). Českobudějovická společnost exportuje přes 90% své produkce zákazníkům, jimiž jsou téměř všechny významné evropské automobilky.

Pro novou společnost v Českých Budějovicích byl kompletně vystavěn nový závod s nejmodernějším vybavením a infrastrukturou na koncernové úrovni. Mimo jednotlivých výrobních úseků vybudovala společnost vlastní oddělení vývoje a výzkumu, včetně zkušebního centra pro dlouhodobé zkoušky. Rozvoj společnosti v Českých Budějovicích lze v její nedlouhé historii označit jako prudký a tento trend bude pokračovat i do budoucna, k čemuž významně přispívají vysoce kvalifikovaní a motivovaní pracovníci společnosti, kteří přicházejí z celé České republiky. K zajištění odpovídající kvalifikace přispívá mimo jiné i středisko praktického vyučování pro zhruba 40 učňů zřízené přímo v areálu společnosti, které představuje z hlediska regionu nový prvek umožňující zvyšování kvalifikace budoucích pracovníků společnosti [13].

#### 1.1 Palivový modul

Palivový modul je jedním z výrobků firmy Robert Bosch s.r.o. v Českých Budějovicích. Materiály, které jsou zkoumány v této práci, budou aplikovány do výroby některých konstrukčních plastových částí tohoto palivového modulu, zvláště pak pro nosný dílec Hrnc. Jedná se zejména o nádobu palivového modulu. Palivový modul je vestavěn do palivové nádrže a po celou dobu své funkce je ve styku s palivem používaným k provozu automobilu [13].



Obr. 1. Část palivového modulu Hrnc

## 2 POLYOXYMETHYLÉN POM

POM je polymer, vyráběný polymerací formaldehydu. Na trh byl uveden v roce 1958 ve Spojených státech amerických. Polyoxymethylenem rozumíme jednak homopolymery, ale také kopolymery aldehydů. Zvláštností této skupiny plastů je stavba jejich makromolekul. Zatímco prakticky všechny ostatní polymery mají v makromolekule delší nebo kratší úseky na sebe vázaných atomů uhlíku, střídají se v makromolekule tohoto polymeru pravidelně atomy uhlíku a kyslíku, přesněji řečeno methylenové skupiny a atomy kyslíku. Tato zvláštní struktura makromolekulárních řetězců způsobuje, že tyto polymery jsou vysoce krystalické a houževnaté a i v nevyztuženém stavu patří mezi plasty s největší tuhostí a pevností. Zlepšením je dále kopolymerace formaldehydu s dalšími vhodnými polymerizovatelnými monomery. Dosáhne se tak tuhých a pevných plastů, které mají vysokou stabilitu a zároveň jsou i vysoce chemicky odolné.

Předností POM je vysoká houževnatost až do nízkých záporných teplot (až  $-40^{\circ}\text{C}$ ), vysoká tvrdost a tuhost (málo ohebné, čili mají vysoký modul pružnosti  $E$ ), vysoká teplotní odolnost, tvarová stálost za tepla a vysoká hodnota teploty měknutí, dobrá odolnost proti korozi za napětí, malé pohlcování vlhkosti, příznivé elektrické a dielektrické vlastnosti, dobré kluzné vlastnosti, snadné zpracovávání.

Při zpracovávání je nutné mít na zřeteli poměrně velké smrštění, které činí 1,5 – 2,5%.

Tento mimořádně příznivý soubor vlastností předurčuje POM k využití jako konstrukční materiál pro výrobu dílů přesné mechaniky [1, 2].

Tab. I. Vlastnosti POM [2]

Vlastnost	Jednotka	Homopolymer	Kopolymer	Kopolymer s 20% skleněných vláken
Hustota	g/cm <sup>3</sup>	1,42	1,41	1,59
Index toku taveniny	ml/10 min			
Modul pružnosti v tahu	MPa	2900-3500	2700-3200	8000-9000
Modul pružnosti v ohybu	MPa	2600-2800		
Mez kluzu	MPa	67-85	62-71	
Deformace na mezi kluzu	%	8-12	8-10	
Pevnost v tahu	MPa	67-69		125
Pevnost v ohybu	MPa			
Tažnost	%			
Rázová houževnatost Charpy 23°C	kJ/m <sup>2</sup>			
Vrubová houževnatost Charpy 23°C	kJ/m <sup>2</sup>	3,5	4-6,5	4
Rázová houževnatost Izod 23°C	kJ/m <sup>2</sup>		80 až bez lomu	25-30
Rázová houževnatost Izod -30°C	kJ/m <sup>2</sup>		70-160	30-35
Vrubová houževnatost Izod 23°C	kJ/m <sup>2</sup>		4-7	5
Vrubová houževnatost Izod -30°C	kJ/m <sup>2</sup>		4-7	5,5
Tvrdość kuličkou	MPa		150-160	200-215
Teplota tání krystalitů	°C	175	164-168	164-168
Tvarová stálost za tepla ISO 75 A (1,8 MPa)	°C	127-136	110-125	162
Tvarová stálost za tepla ISO 75 B (0,45 MPa)	°C			
Teplota měknutí dle Vicata B	°C	173	160-163	171
Tepelná odolnost dle Martense	°C			
Nejvyšší krátkodobá teplota použití	°C			
Nejvyšší dlouhodobá teplota použití	°C	100	100	120
Teplota skelného přechodu	°C			
Koeficient teplotní roztažnosti	10 <sup>-5</sup> .K <sup>-1</sup>	12	12	1-3
Permitivita 50 Hz		3,7	4	4,5
Index lomu		1,48		
Propustnost světla	%			
Smrštění	%	1,9-2,3		
Nasákavost	%	0,9-1,4	0,65	0,9

Tab. II. Doporučené teploty zpracování POM [2]

<b>Technologie zpracování POM [°C]</b>	<b>Doporučená teplota zpracování [°C]</b>	<b>Teplota formy [°C]</b>	<b>Smrštění [°C]</b>
Vstřikování	180-230	nad 90	1,9-2,3
Vytlačování	180-190		
Vyfukování	180	90-100	
Lisování	180		

Tab. III. Změny velikosti smrštění POM v závislosti na teplotě formy [2]

<b>Teplota formy [°C]</b>	<b>Smrštění [%]</b>
60	1,3-2,0
80	1,4-2,3
100	1,8-2,4
120	1,9-2,5

### 3 HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Celá řada mechanických zkoušek spočívá v tom, že se zkušební tělesa pod určitým napětím nějakým způsobem deformují v tahu, tlaku, ohybu, smyku nebo krutu. Všechny potřebné veličiny, tj. síla, průřez, rychlost a velikost deformace, musí být s dostatečnou přesností a citlivostí měřitelné a ve vzájemné závislosti převoditelné na grafický záznam.

Matematický popis mechanického chování plastů je v podstatě kombinace čtyř proměnných – napětí, deformace, času (často vyjadřovaného rychlostí deformace) a teploty.

Podmínky reprodukovatelnosti zkoušek, včetně reprodukovatelné přípravy zkušebních těles, uvádějí příslušné technické normy [7, 8, 19, 21].

#### 3.1 Statické tahové zkoušky

Jednou z nejdůležitějších zkoušek materiálu hodnotících jeho pevnost je tahová zkouška. Při zkoušce tahem je materiál namáhán silou tak, že dojde k jeho porušení. Kdyby byl materiál isotropní, bylo by napětí v celém průřezu zkušebního tělesa rozloženo rovnoměrně. V praxi se tento ideální stav nevyskytuje, vlastnosti plastů se v různých místech liší a tahové napětí je rozloženo nerovnoměrně. Vznikají tím smyková napětí. Je nutné si předem uvědomit pochody při namáhání tahem. Jestliže budeme působit na průřez tělesa  $S$  silou  $F$ , bude osově napětí působící v průřezu zkušebního tělesa při tahové zkoušce  $\sigma = \frac{F}{S}$ . Průřez tělesa se nám při zkoušce však bude měnit až do okamžiku, kdy se dosáhne rovnováhy mezi deformací a napětím. Při dalším zatěžování síly se dostaneme do okamžiku, kdy se těleso přetrhne. Protože průřez tělesa se při zkoušce stále mění, je zjišťování skutečného napětí obtížné. V praxi se obvykle pracuje s tak zvaným **smluvním napětím**, což je síla vztažená na počáteční průřez zkušebního tělesa [15, 18, 19, 21]:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

Tento způsob vyjadřování je vžitý pro kovy a byl také převzat pro plasty. Tam, kde

dochází k malým deformacím jako jsou reaktoplasty, polystyren apod., tento stav ještě vyhovuje. U elastomerů, kde nastává prodloužení o několik desítek procent, je však již potom podstatné zmenšení průřezu tělesa a tím i velký rozdíl mezi napětím na začátku a na konci zkoušky [19, 21].

S prodlužováním tělesa se mění jeho původní délka  $l_0$  na  $l$  a vyjadřujeme ji jako **poměrné nebo relativní prodloužení (deformace v tahu):**

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [-] \quad (2)$$

A také, s prodlužováním zkušebního tělesa nastává i zmenšování průřezu:

$$\varepsilon_s = \frac{S_0 - S}{S_0} = \frac{\Delta S}{S_0} \quad [-] \quad (3)$$

Relativní změna průřezu v závislosti na relativní změně délky se nazývá **Poissonovo číslo:**

$$\mu = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_l} \quad [-] \quad (4)$$

Pro změnu objemu při prodloužení byl odvozen tento vztah:

$$\frac{\Delta V}{V_0} \approx (1 - 2\mu) \frac{\Delta l}{l_0} \quad [-] \quad (5)$$

Podle tohoto vzorce může Poissonovo číslo dosáhnout maximální hodnoty 0,5. Pro zkoušky v tahu v počáteční části křivky platí Hookův zákon, který říká, že deformace je úměrná použité síle:

$$\varepsilon = K \cdot \sigma \quad [-] \quad (6)$$

kde  $\varepsilon$  - poměrné prodloužení

$K$  - součinitel úměrnosti

$\sigma$  - napětí v tahu

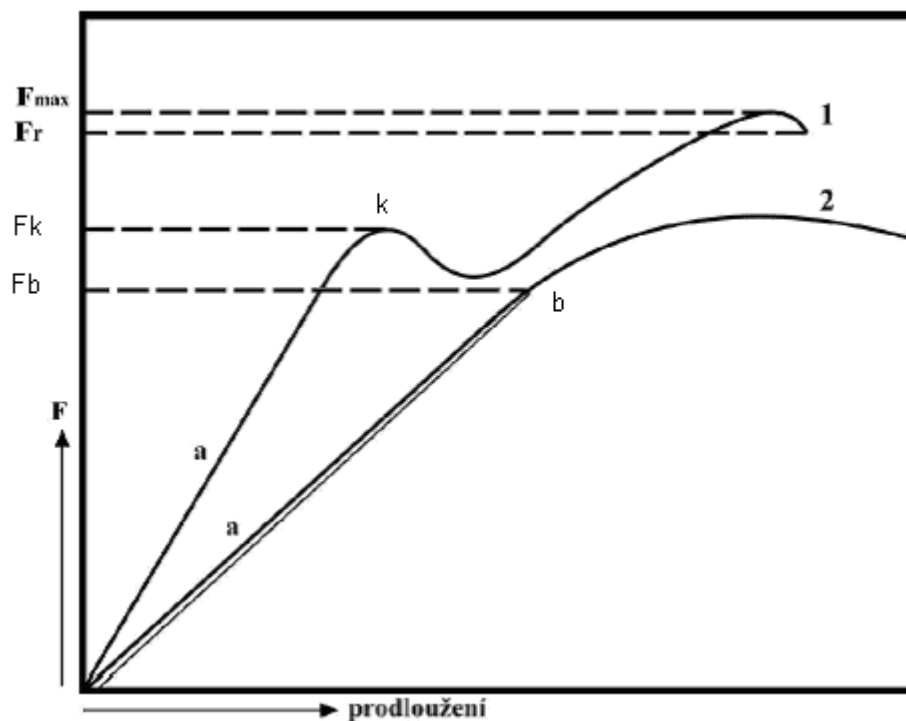


Součinitel úměrnosti  $K$  udává poměrnou změnu délky při jednotkovém napětí. Je to  $\cotg$  úhlu, který svírá tečna křivky v diagramu napětí – poměrné prodloužení s osou  $\varepsilon$ . Protože takto vycházejí velmi malé hodnoty, používá se v praxi jeho převrácená hodnota

$$\frac{1}{K} = E \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

$E$  je modul pružnosti, také nazývaný Youngův modul [19, 21].

Výše uvedené vztahy platí přibližně, protože přísně lineární závislost prodloužení na napětí není dodržena u žádného materiálu. Proto se v praxi objevují menší nebo větší odchylky od Hookova zákona. Průběh křivek až po mez úměrnosti v tahu je však velmi podobný. Rozlišení nastává až po překročení této meze. Obecná tahová křivka polymerů je velmi podobná tahovým křivkám kovů. V průběhu zkoušky se trvale měří síla a prodloužení zkušebního tělesa. Z křivky „síla – prodloužení“ se vyhodnocují charakteristické veličiny ze zkoušky tahem.



Obr. 2. Obecná křivka „síla – prodloužení“ [21].

Křivka 1- materiál vykazuje mez kluzu

Křivka 2 - materiál nevykazuje mez kluzu

a - přímkové části na počátku křivky

k - mez kluzu

b – smluvní mez kluzu

Při vyhodnocování křivky se používají některé pojmy, v jejich názvech a symbolech však není ve všech normách jednotnost.

### ***Mez úměrnosti v tahu***

Je to mezní napětí, do kterého je deformace úměrná napětí. Až do meze úměrnosti je průběh tahové křivky prakticky přímkový a v této oblasti platí Hookův zákon. Ve skutečnosti však již i při poměrně malém napětí zůstává na zkušebním tělísku určitá trvalá deformace. Pro dokonale pružný materiál bychom tuto mez zjistily postupným zvyšováním a postupným rušením napětí až do té hodnoty, kdy zůstane určité prodloužení. V praxi se obvykle jako mez úměrnosti v tahu definuje mezní napětí, při kterém po odtížení zkušební tělísko vykazuje trvalý přírůstek měřené délky max. 0,01% [21].

### ***Horní mez kluzu***

Bod na křivce, do kterého se zvyšovalo prodloužení se stoupajícím napětím. Za touto horní mezí se dále zvyšuje deformace, přičemž napětí poklesne. Pokles napětí pokračuje až k dolní mezi kluzu. Deformace přestává být homogenní. V jednom místě tělesa se vytvořilo tenčí místo nazývané krček. Krček má menší průřez než-li původní vzorek a v souvislosti s tím napětím v této oblasti protažení klesá, protože průřez krčku se zmenšuje. Současně však dochází k orientaci molekul v místě krčku a tím se jeho odpor proti deformaci zvětšuje. Postupně dosáhne deformační zpevnění krčku takového stupně, že jeho tuhost je větší než tuhost neprodloužené části tělesa. Proto se průřez krčku již téměř nemění a dochází k prodloužení částí tělesa, při níž se délka krčku zvětšuje [21].

### ***Dolní mez kluzu***

Tento bod udává na křivce kam až pokračuje pokles napětí při dalším prodlužování vzorku. Od tohoto bodu napětí opět stoupá, protože bylo celé těleso zpevněno orientací. Dochází k homogennímu protahování vydlouženého tělesa [18, 19, 21].

**Smluvní mez kluzu**

Stanovuje se v případech, kdy zkoušený materiál nemá mez kluzu. Stanovuje se graficky jako průsečík křivky „síla – prodloužení“ s přímkou vedenou rovnoběžně s počáteční přímkovou částí této křivky a vytínající na ose úseček prodloužení odpovídající poměrnému prodloužení, např. 1% [18, 21].

**Mez pevnosti v tahu**

Takto je označováno maximální napětí, resp. síla vztažená na plochu počátečního průřezu tělesa  $S_0$ , naměřené v průběhu zkoušky tahem. Do výpočtu se dosazuje vždy maximální hodnota síly, i když k destrukci (vlastnímu přetržení) došlo později v okamžiku  $\sigma_r$  za nižšího napětí. Podobně jako u jiných materiálů je skutečná pevnost plastů mnohem menší než pevnost vypočítaná teoreticky na základě mezimolekulárních vazebných sil. Příčina spočívá v přítomnosti defektů ve struktuře, které představují místa s nižší pevností, než má okolní hmota. Při zatěžování mohou v těchto místech vznikat taková napětí, která překračují hodnotu kohezní pevnosti, čímž dochází ke vzniku mikrotrhliny. Ta se šíří dále až dojde k lomu tělesa v makroměřítku [21].

**Mez pevnosti v tahu při přetržení  $\sigma_r$** 

Napětí, při kterém se těleso přetrhlo.

**Poměrné prodloužení při přetržení  $\varepsilon_r$** 

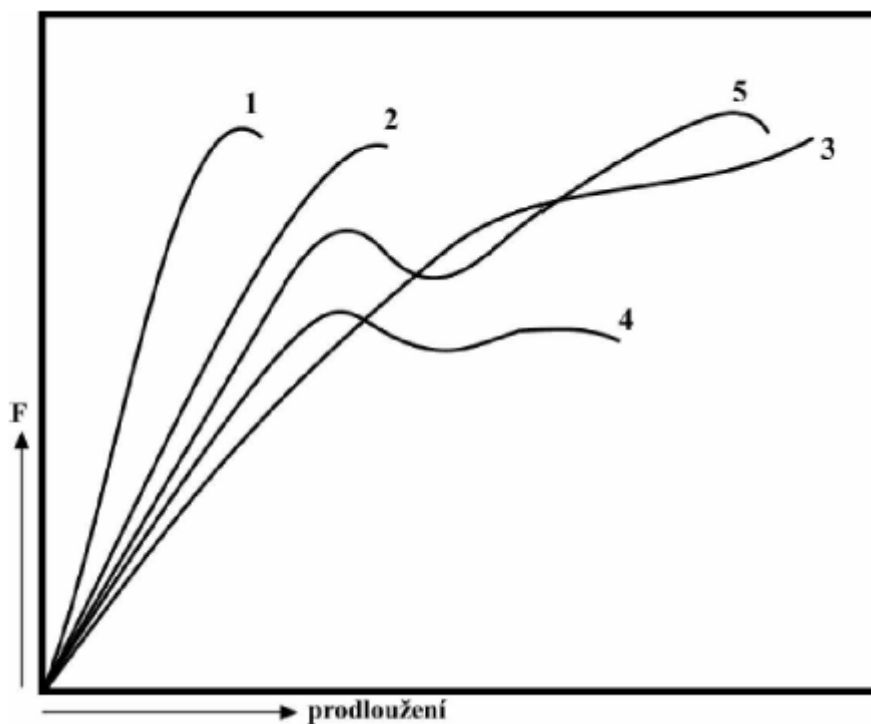
Je to poměrná změna délky při zkoušce tahem v okamžiku přetržení. Vyjadřuje se v procentech měřené délky:

$$\varepsilon_r = \frac{(l - l_0) \cdot 100}{l_0} = \frac{\Delta l \cdot 100}{l_0} \quad [\%] \quad (8)$$

**Poměrné prodloužení při největší síle  $\varepsilon_k$** 

Změna délky  $\Delta l$  v okamžiku dosažení největší síly  $F_{\max}$  vztažená na počáteční měřenou délku  $l_0$  zkušebního tělesa.

Různé materiály mají své charakteristické tahové křivky, které odpovídají mechanickým vlastnostem.



Obr. 3. Charakteristické křivky různých materiálů [21].

- 1 - materiál s malou průtažností (epoxidové pryskyřice, bakelit)
- 2 - houževnatý materiál (PVC)
- 3 - materiál s velkou průtažností
- 4 - materiál s dolní a horní mezí kluzu (PE, PP)
- 5 - materiál zlepšující mechanické vlastnosti prodloužením (polyamid)

### ***Modul pružnosti v tahu $E$***

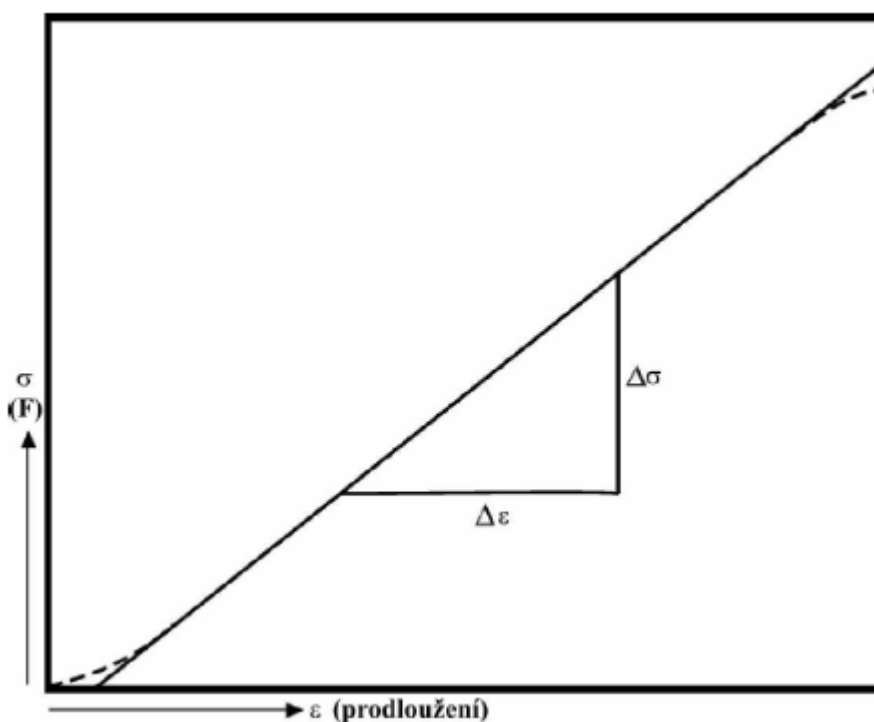
Je podíl napětí v tahu  $\sigma$  a poměrného prodloužení  $\varepsilon$  v oblasti, ve které existuje lineární závislost mezi napětím a prodloužením.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

Jako počátek pro stanovení poměrného prodloužení k vyjádření modulu pružnosti je možno brát průsečík prodloužení počáteční přímkové části závislosti „síla – prodloužení“

s osou prodloužení. Experimentální chyby a nevyhnutelné nedokonalosti zkušebního zařízení jsou příčinou toho, že přímka proložená počáteční oblastí hodnot neprochází počátkem.

Při použití zkušebního zařízení s automatickým zápisem je možno přímo použít záznam zapisovače k proložení přímky grafickou cestou. Jestliže není k dispozici grafický záznam, doporučuje se vypočítat předem parametry přímky alespoň z 10 dvojic naměřených hodnot regresní metodou.



Obr. 4. Závislost „napětí – poměrné prodloužení“ počáteční oblast [21].

### 3.2 Dynamické zkoušky rázové a vrubové houževnatosti

Houževnatost patří spolu s pevností k nejdůležitějším materiálovým charakteristikám. Houževnatost představuje obecně komplexní vlastnost zatěžovaného tělesa, která souvisí zejména se schopností materiálu odolávat iniciaci a šíření trhliny, tedy s jeho lomovou houževnatostí. Z fyzikálního hlediska představuje houževnatost materiálu měrnou energii, kterou je materiál schopen lokálně absorbovat, než se poruší, respektive než dosáhne určitého mezního stavu (při statické tahové zkoušce lze za tento stav považovat mez kluzu). Pojem houževnatost je však více spojen s rázovým způsobem

zatěžování a standardizovanými zkouškami rázové nebo vrubové houževnatosti a zkouškou průrazem. Rázové zkoušky patří mezi dynamické zkoušky, při kterých působí rychle se měnící síly rázem. Podle způsobu namáhání se rázové zkoušky provádí v ohybu (nejčastěji), tahu, tlaku a krutu. Energie pro rázovou deformaci se získává kyvadlovým kladivem (Charpy, Izod, Dynstat) nebo pomocí padajícího závaží [5, 16, 19].

Rázová houževnatost je podíl energie spotřebované na porušení zkušební tělesa a plochy kritického průřezu zkušební tělesa za předepsaných podmínek (v tahu nebo v ohybu); označuje se  $a_n$  [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

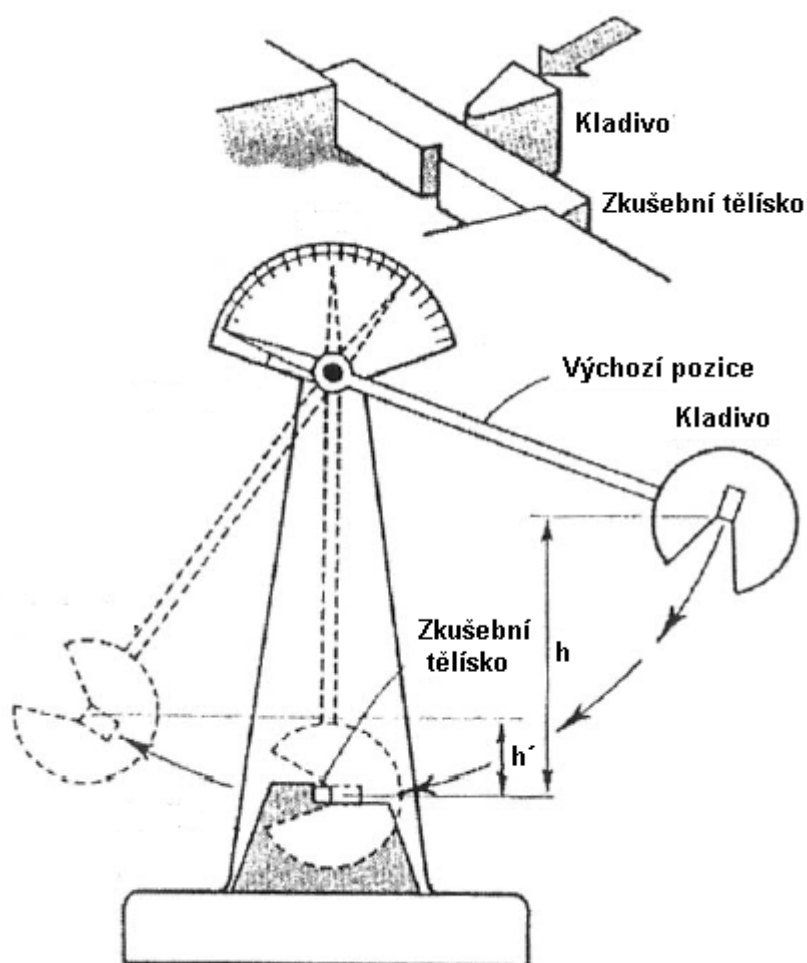
Vrubová houževnatost je podíl energie spotřebované na porušení zkušební tělesa opatřeného vrubem a plochy kritického průřezu v místě vrubu za předepsaných podmínek (v tahu nebo v ohybu); označuje se  $a_k$  [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ].

Vrubové číslo, vrubová citlivost (poměrná rázová houževnatost) je poměr vrubové a rázové houževnatosti; označuje se  $K_z$  (číslo menší jak 1).

Zkoušky poskytují určité informace o chování plastů při nárazu. Získané výsledky umožňují sice vzájemné porovnání materiálu, jdou ale velmi obtížně korelovat a nelze je obecně přenášet do praxe.

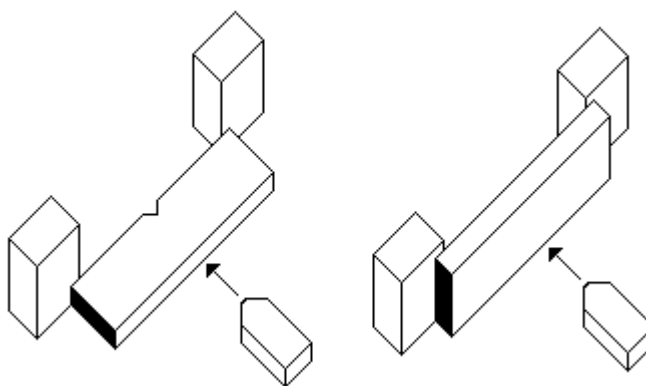
### 3.2.1 Metoda Charpy

Pro stanovení rázové a vrubové houževnatosti se používají zkušební přístroje Charpy (kyvadlová kladiva) s rozsahem podle typu materiálu a rozměru zkušebních těles. Používané rozsahy, rozměry zkušebních těles a rozpětí podpěr jsou specifikovány v normě. Pro zjednodušení bývá Charpyho kladivo opatřeno stupnicí, na které se absorbovaná energie  $W$  (spotřebovaná práce) odčítá přímo. Odečtené hodnoty mají ležet mezi 10 a 80 % celkového rozsahu stupnice [5, 16].



Obr. 5. Princip přeražení tělíska Charpyho kladivem [11].

Zkušební těleso je umístěno vodorovně na dvou podpěrách a je přeráženo rázovým kyvadlem (otáčivým kladivem) uprostřed vzdálenosti mezi podpěrami (tříbodovým systémem).



Obr. 6. Způsob přeražení tělíska dle ISO 179 [16].

Zářezy v plastech mohou velmi ovlivňovat mechanické pevnosti materiálu a proto se u plastů zjišťuje i vrubová houževnatost. Zkušební tělesa mají zářez kolmý na svoji podélnou osu. Typy vrubů (tvar a rozměry) jsou uvedeny v normě. U malých těles jsou vruby menší. Nejvyšší hodnoty vrubové houževnatosti dává obecně půlkruhový (půlkulatý) vrub většího průměru. Při zkoušce se tělesa ukládají tak, aby vrub byl v tahové oblasti, tj. na opačné straně tělesa, než je provedena rázová deformace. Ve skutečnosti je vliv narušení hladkého povrchu vrubem takový, že hodnoty vrubové houževnatosti jsou 5 až 10krát nižší než hodnoty rázové houževnatosti.

Účelem zkoušek je posoudit chování materiálu (případně s vrubem) za kritických podmínek, tj. při vysoké rychlosti zkoušky. Výpočet rázové houževnatosti  $a_n$  se provede dle vzorce:

$$a_n = \frac{W}{b \cdot h \cdot 10^3} \quad [kJ \cdot m^{-2}] \quad (10)$$

kde  $W [J]$  je deformační energie spotřebovaná na přeražení tělesa,  $b [mm]$  je šířka a  $h [mm]$  je tloušťka zkušební tělesa. Pro výpočet vrubové houževnatosti  $a_k$  je výpočet obdobný s tím rozdílem, že se dosazuje tloušťka zkušební tělesa v místě vrubu  $h_k [16]$  .:

$$a_k = \frac{W}{b \cdot h_k \cdot 10^3} \quad [kJ \cdot m^{-2}] \quad (11)$$



## 4 MORFOLOGIE LOMOVÝCH PLOCH

Znalost lomového chování je důležitá proto, že podmínky lomu materiálu udávají meze jeho použitelnosti. Morfologické studium lomových ploch patří mezi metody, jež studují lomové chování retrospektivně: z morfologie lomové plochy se dá usuzovat jednak na vznik, šíření lomu a jeho podmínky, jednak také na původní strukturu materiálu.

Polymerní materiály však vykazují velkou variabilitu vlastností a strukturních charakteristik. Vzhled lomových ploch různých polymerů rozrušených různým způsobem a za různých experimentálních podmínek je proto značně rozdílný. I když některé útvary (strukтуры) na lomových plochách jsou dobře prostudovány, není možno obecně tvrdit, že lomová plocha dává jednoznačný obraz o podmínkách lomu nebo o struktuře polymerního materiálu.

Lomové chování materiálu se prakticky sleduje dvojím způsobem:

- a) fenomenologicky – měřením mechanických parametrů lomu
- b) morfologickým studiem lomových ploch

Oba přístupy se doplňují. Fenomenologickým studiem lomového chování se získají materiálové konstanty, jež představují určité průměrné hodnoty získané měřením makroskopického vzorku. Morfologie lomové plochy však poskytuje některé důležité informace o procesech probíhajících při deformaci a lomu polymerního vzorku v mikroskopických rozměrech [6].

### 4.1 Celkový vzhled lomové plochy

Lomová plocha je stopa, kterou po sobě zanechává trhlinka šířící se materiálem. Z hlediska fenomenologických mechanických teorií je lomové chování popsáno mnoha parametry, vzhled lomové plochy závisí rovněž na řadě faktorů, jež mohou být zahrnuty do tří skupin, které charakterizují vlastnosti vzorku, jejich změnu během procesu deformování a okolnosti, za nichž deformace probíhá [6].

## 4.2 Faktory ovlivňující vzhled lomové plochy

Tab. IV. Faktory ovlivňující vzhled lomové plochy [6]

Vlastnosti vzorku	Chemická struktura	Složení (tvar řetězce, síťování)
		Molekulová váha
		Příměsi (plniva, ztužování, plastifikátory)
	Mikrostruktura	Typy oblastí (krystalické, amorfni)
		Uspořádání oblastí (krystalinita, separace složek, textura)
	Elastické vlastnosti	Makroskopické (popsané materiálovou funkcí)
Mikroskopické (elastické vlastnosti jednotlivých složek, způsob, jak se uplatní přenos mechanické síly do mikrooblastí vzorku)		
Změny vlastností vzorku během deformace	Změny struktury během deformování	Změny vlivem deformace samotné (přetváření materiálu – crazing, dloužení – yielding, orientace, koroze pod napětím – environmental stress cracking)
		Změny vlivem interakce s okolím (koroze pod napětím - environmental stress cracking)
Parametry lomu	Vnější vlivy	Teplota
		Okolní prostředí (vlhkost)
		Rychlost deformace
	Geometrie zatěžování	Způsob namáhání vzorku (tah, tlak, smyk, kroucení, ohyb)
		Rozložení napětí ve vzorku (vliv tvaru vzorku, nehomogenit, vrubu)

## 4.3 Iniciace lomu

Lom začíná vždy na heterogenitách materiálu. Heterogenity struktury představují rovněž heterogenity mechanických charakteristik, které změni distribuci působícího mechanického napětí. Překročení meze pevnosti v místě velké koncentrace napětí způsobí vznik trhliny šířící se materiálem.

Vzniká-li na lomové ploše více lomových front šířících se z různých defektních míst, rozlišují se lomové fronty na primární a sekundární. V obecnějším smyslu se pojem primární lomové fronty spojuje s nejdříve vzniklou lomovou frontou; v užším smyslu se

primární lomovou frontou často nazývá dříve vzniklá ze dvou lomových front, jež po sobě následují.

Heterogenity (dutiny, cizí částice, nehomogenity struktury) mohou být zdroji primárních nebo sekundárních lomů. Dutiny v materiálu mohou však při vhodných parametrech a rozložení v materiálu růst trhliny také zastavovat a působit jako lokální zpevňovač materiálu.

Žádný materiál není dokonale homogenní, heterogenity jsou vždy v materiálu přítomny. Většinou však jsou takového druhu, že primární lom začíná na povrchu vzorku nebo v jeho blízkosti. Uměle zavedenými heterogenitami struktury je možno způsobit vznik primárního centra lomu uvnitř vzorku, vzniká-li při lomu přetvořená vrstva, nehomogenity na jejich hranici s původním nepřetvořeným materiálem iniciují vznik sekundárních lomů.

V centrech sekundárních lomů na lomové ploše je často pozorována dutina, která má miskovitý tvar. Její existence je považována za důkaz přítomnosti dutin v materiálu. Tyto dutiny se stávají centry sekundárních lomů. Nebezpečnost heterogenit čili schopnost stát se centrem sekundárního lomu je směrově závislá; záleží na tvaru, velikosti a uložení dutiny ve vzorku.

Mikroskopické a submikroskopické nečistoty mohou usnadnit vznik přetvořených oblastí, v nichž dochází ke vzniku sekundárních lomů. Dalším zdrojem sekundárních lomů mohou být heterogenity vzniklé při zpracování polymerů. Centrum primárního lomu uvnitř lomové plochy prudce zchlazených vzorků svědčí o tom, že rychlým ochlazením materiálu vznikají trhliny [6].

#### 4.4 Lomové děje u polymerů

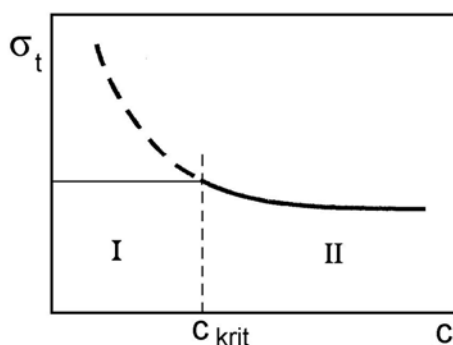
Pevnost každého materiálu je funkcí kohezních sil působících mezi atomy. Při statickém a dynamickém namáhání polymerů se můžeme dostat do oblasti deformací, při kterých zatěžovací síly budou větší než kohezní síly. V takovém případě dochází k destrukci tělesa – k lomu.

Každý lomový děj je složitý pochod, který je možno rozdělit do několika fází, z nichž jsou nejdůležitější:

1. existence poruch (submikroskopických trhliny, nehomogenity) ve hmotě

2. vytvoření napěťových špiček při určitém stupni deformace
3. vytvoření nového povrchu, kterému odpovídá určitá povrchová energie
4. přeměna části pružné energie v místě lomu v pružné vlny šířící se rychlostí zvuku, které částečně podporují rozšíření lomu.
5. vlastní lom.

Lom vzniká v místech maximálních napětí vznikajících na okraji submikroskopických dutin, různých mikrotrhlin i na mikroskopických vrubech, či jiných nehomogenitách materiálu. Závisí přitom na velikosti trhliny. Velké množství polymerních materiálů vykazuje typickou závislost pevnosti na velikosti trhliny (viz Obr.7). Vada, která je větší než kritická hodnota  $c_{krit}$ , vyvolá vždy konečný lom. Analýza takového chování je předmětem lomové mechaniky. Naopak, pevnost materiálu je prakticky necitlivá na uměle zavedené vady menší než  $c_{krit}$ . Materiál se chová jakoby takové vady obsahoval už předem a proto se této hodnotě říká rozměr vrozené vady. Oblastí I na obrázku se zabývá klasická mechanika bezdefektního materiálu [17, 20].



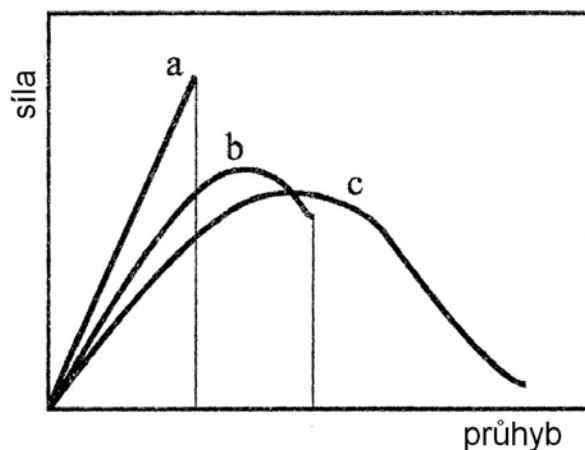
Obr. 7. Vliv délky trhliny  $c$  na pevnost v tahu  $\sigma_t$  [20]

#### 4.5 Křehký a tvárný lom

Vnější napětí působí trvalé změny ve struktuře, které jsou buď lokalizované nebo zasahují větší objem tělesa. Lokální poškození vede většinou k lomu, zatímco trvalé změny zasahující větší objem mají nejčastěji charakter plastické deformace.

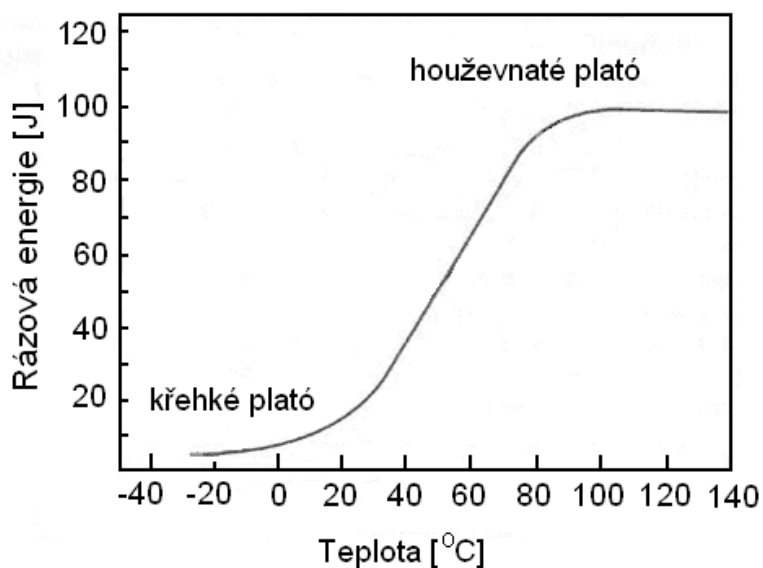
Lokalizovaný lom, který nastane ještě v elastické deformační oblasti, se označuje jako křehký. Takový lom vzniká náhle při napětích ležících pod mezí kluzu a trhlina se při něm šíří nestabilně a s vysokou rychlostí. Potenciální energie pružnosti akumulovaná v konstrukci se přednostně spotřebovává na vytvoření nových lomových povrchů. Je to tedy energie na roztržení hlavních a vedlejších vazeb. Tento lom je z hlediska přítomnosti v konečných aplikacích velice nebezpečný.

Jestliže je porušení soudržnosti tělesa doprovázeno rozsáhlejší plastickou deformací, jde o tažný nebo tvárný lom. U takového lomu se trhlina po své iniciaci šíří stabilně nebo alespoň částečně stabilně, protože plastická nebo viskoelastická deformace před vrcholem postupující trhliny odnímá trhlince část energie a reguluje tím její postup. Zda byl růst trhliny stabilní se dá určit ze závislosti síla – průhyb, (viz Obr. 8).



Obr. 8. Schematické znázornění závislosti síla-průhyb při rázové zkoušce, které odpovídají nestabilnímu (a), částečně stabilnímu (b) a stabilnímu lomu (c). [17, 20]

Mezi křehkým a tvárným porušením není ostrá hranice. I při křehkém nebo kvazikřehkém lomu se dá nalézt na lomových plochách vrstvička plasticky přetvořeného (orientovaného) polymeru a na druhé straně plastická deformace nikdy nezasahuje celý objem tělesa rovnoměrně. Typ porušení se může měnit s poloměrem a hloubkou vrubu, tj. při změně koncentrace napětí, nebo při změně rychlosti zkoušky a teploty. Přechod křehkého chování do tvárného je znázorněn na teplotním průběhu lomové energie (viz Obr. 9). Pro nízké teploty dostáváme křehký typ lomu, ve vzestupné části se vyskytují lomy kvazikřehké a dále pak lomy tvárné. Teplotní oblasti odlišných mechanismů odděluje teplota křehnutí, která leží pod teplotou skelného přechodu [20].



Obr. 9. Závislost rázové energie na teplotě při rázové zkoušce [20]

U řady polymerů však vede ke křehkému lomu také dlouhodobé namáhání, při kterém se vytvoří v materiálu nehomogenity, kterým se říká pukliny. Jsou to úzké zóny kolmé ke směru působícího napětí, které svým tvarem připomínají trhliny, ale jsou vyplněny orientovaným polymerem. Protože plastická deformace a orientace materiálu uvnitř puklin spotřebuje energii, přispívá tvorba puklin v počáteční fázi k houževnatosti polymeru, ale často jen samotným působením dlouhodobého zatížení se pukliny postupně přeměňují v ostré sevřené trhliny, které pak působí jako zárodky křehkého lomu [3, 6, 17, 20].

## 5 KONSTRUKCE DÍLŮ, VLIV KONSTRUKCE NA VADY VÝROBKŮ

Pod pojmem vada vlivem designu se rozumí každá odchylka, kterou se daný výrobek liší od schváleného standardu, specifikovaného výkresem, referenčním vzorkem nebo schválenými přejímacími podmínkami. Odchylka od příslušných norem, případně sjednaných technických podmínek, se může týkat tvaru, rozměrů, hmotnosti, vzhledu, vnitřního stavu výrobku nebo jeho mechanických a fyzikálních vlastností. Jejím důsledkem je změna užitných vlastností výrobku, v extrémním případě až ztráta jeho funkčnosti [7, 9].

### 5.1 Rozdělení vad

Všeobecně přijatelné vady, které nemají vliv na funkci a životnost výrobku. Příkládáme jim nerovnoměrný nebo nedostatečný lesk nebo jinou nevýznamnou vadu povrchu.

Omezeně přijatelné vady, které neovlivňují použitelnost výrobku, pokud jejich povaha, velikost a množství nepřekročí dohodnutou míru. Jejich rozsah je dán dohodou mezi výrobcem a odběratelem. Příkladem je studený spoj nebo stopy po vlhkosti, cizí vměstek do určité velikosti apod.

Opravitelné vady jsou takové odchylky od standardu, jejichž oprava vhodným způsobem je příslušnou normou dovolena nebo není výslovně zakázána. Lze je odstranit, aniž by byla ovlivněna použitelnost výrobku. Způsob opravy musí být předem dohodnut mezi dodavatelem a odběratelem.

Nepřijatelné vady, které nelze opravou odstranit buď vůbec anebo pouze způsobem, který by ovlivnil použitelnost výrobku a který sjednané technické podmínky nepřipouštějí. Jako příklad lze uvést deformaci tvaru výrobku nebo přítomnost trhlin.

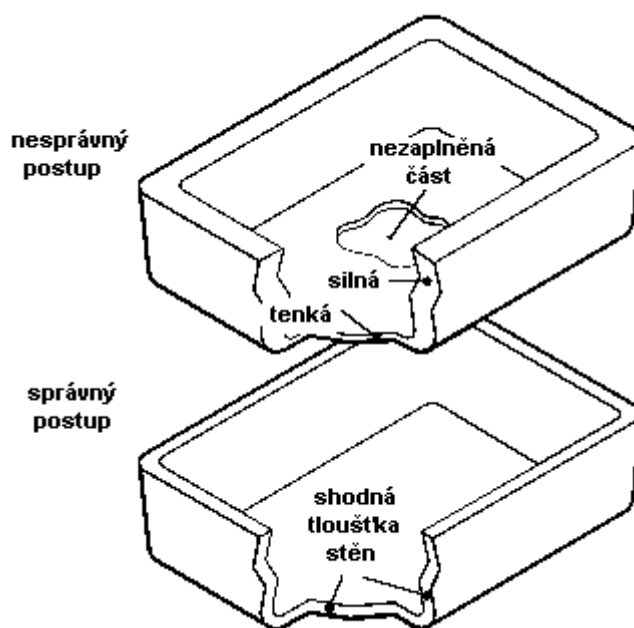
Z praktického hlediska je užitečné dělení vad na vady zjevné, které narušují design dílu pouze vizuálně, ale mohou mít přímý vztah k tvaru výrobku, dále pak na vady skryté, kde design dílu hraje velkou roli [2, 9, 12].

## 5.2 Zjevné vady

Zjevné vady jsou takové, které lze zjistit prostým vizuálním porovnáním výrobku se schváleným referenčním výrobkem čili standardem. Dělí se do dvou skupin, a to na vady tvaru a vady povrchu [2, 9].

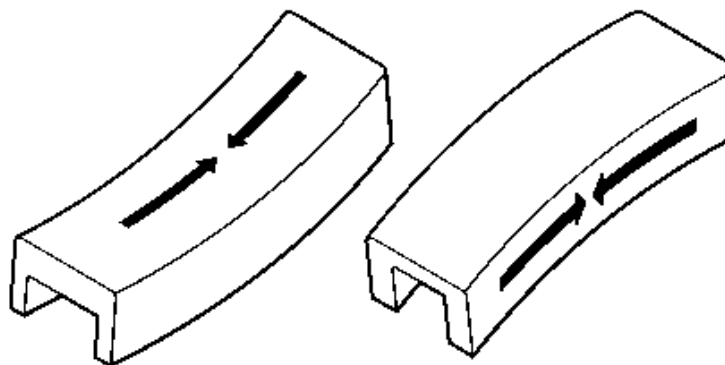
### 5.2.1 Vady tvaru

Nedostříknuté výrobky (viz Obr. 10), přetoky a ořepky, vznikající hlavně v dělicí rovině formy; propadliny a vyraženiny (viz Obr. 12), vyskytující se u tlustostěnných výstřiků, případně zvrásnění nebo zvlnění povrchu; zborcení tvaru a deformace výstřiku jako důsledek nerovnoměrného smršťování hmoty (viz Obr. 11).

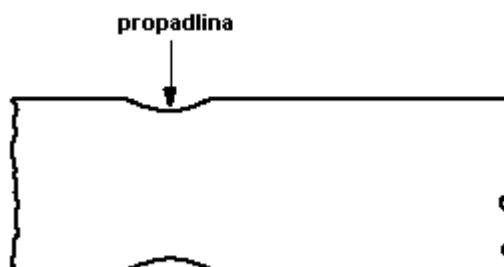


Obr. 10. Nedokonalé zaplnění výrobku vlivem rozdílu tloušťky stěn [9]





Obr. 11. Zborcení tvaru a deformace důsledkem nerovnoměrného smršťování [9]



Obr. 12. Vznik propadliny [12]

### 5.2.2 Vady povrchu

Změna barvy materiálu a vznik barevných pruhů; nedostatečný lesk nebo rozdíly lesku či dezénu, matné skvrny; opalescence nebo povrchové zakalení, optická anizotropie; stříbření, kterým se projevuje vlhkost nebo jiné těkavé látky ve hmotě; jemně rýhovaný nebo pórovitý povrch, drsný povrch; mikrothlinky na povrchu jako důsledek vnitřních pnutí, vyskytující se u amorfních plastů; tokové čáry nacházející se zejména v blízkosti vtoku; rozvrstvování čili delaminace; žloutnutí až hnědnutí materiálu světlých odstínů jako známka degradace hmoty; místní spálení materiálu v důsledku komprese vzduchu v dutině formy; tmavé až černé místně omezené body nebo skvrny; kresba po volném proudu taveniny, meandrový tok [2].

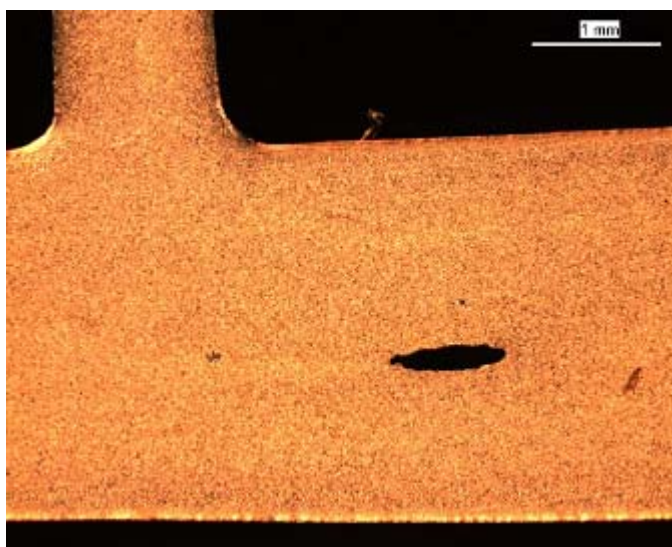


Obr. 13. Vada povrchu [1]

### 5.3 Skryté vady

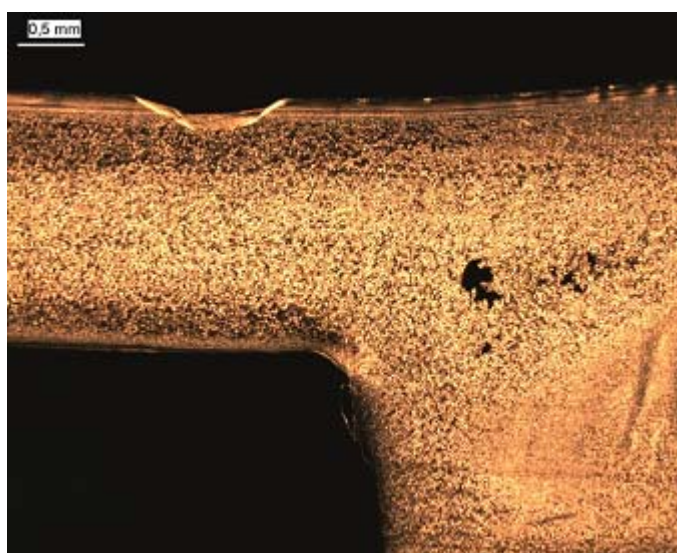
Skryté vady jsou vady, které sice není možné postihnout běžnou vizuální kontrolou, ale které ovlivňují vlastnosti výstřiků a zhoršují jejich kvalitu. Lze je zpravidla zjistit teprve pomocí vhodného zkušebního zařízení nebo laboratorními zkouškami, které mohou mít i destrukční charakter.

Patří sem nerovnoměrná orientace makromolekul, ke kterým dochází zejména v okolí ústí vtoku nebo ve zúžených profilech výstřiku. Dále pak studené spoje, které u některých plastů způsobují znatelné zhoršení mechanických vlastností, vakuové bubliny nazývané také „lunkry“ a vnitřní dutiny vyplněné vzduchem nebo jiným plynem atd. [2].

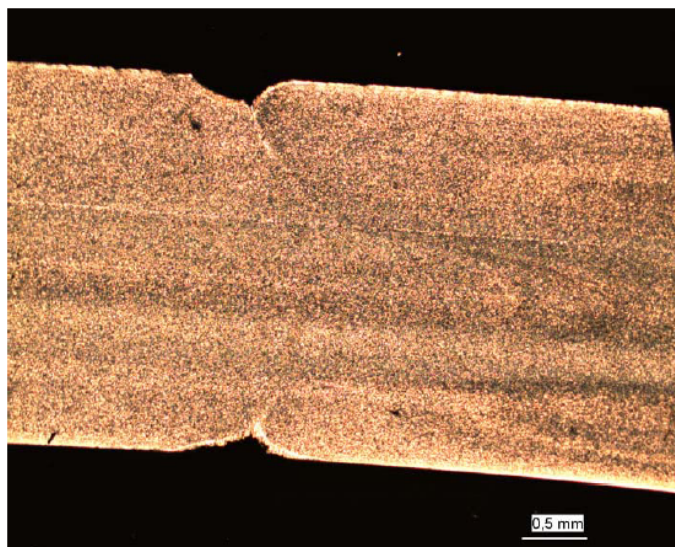
Obr. 14. Skrytá vada materiálu „lunkr“ – tenký řez 7  $\mu\text{m}$ , polarizované světlo [1]



Obr. 15. Skrytá vada materiálu „prasklina“ vlivem mechanického namáhání – tenký řez 7  $\mu\text{m}$ , polarizované světlo [1]



Obr. 16. Skryté vady „lunkry“ a nehomogenní struktura materiálu – tenký řez 7  $\mu\text{m}$ , polarizované světlo [1]



Obr. 17. Skryté vady - studený spoj a linie po tečení – tenký řez 7  $\mu\text{m}$ , polarizované světlo [1]

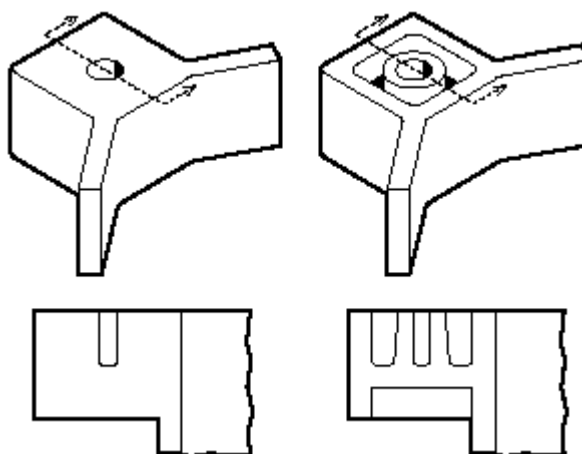
#### 5.4 Pravidla při navrhování tvaru výrobku

Při návrhu tvaru výrobku se vyžaduje jednoduchý tvar s minimální spotřebou materiálu. V řadě případů je důležité i výtvarně estetické řešení tvaru. Tvar výrobku však musí být zároveň vždy podřízen dané technologii výroby. To platí zvláště u vstřikovaných výrobků. Jejich tvarové řešení musí umožňovat plynulé naplnění dutiny formy taveninou a snadné vyjmutí výrobku z formy. Překážky toku taveniny působí nerovnoměrnosti ve smrštění, vznik dutin a vtaženin, studených spojů (viz kapitoly 5.2 a 5.3). Hlavní zásadou při návrhu tvaru vstřikovaného dílu je proto dodržet pokud možno rovnoměrnou tloušťku stěn. Náhlé změny tloušťky představují vždy určité nahromadění hmoty. V těchto místech je odvod tepla zpomalen a dodatečné ochlazování pak způsobuje vznik povrchových vtaženin, vnitřních dutin, případně trhlin [4, 7, 8, 10].

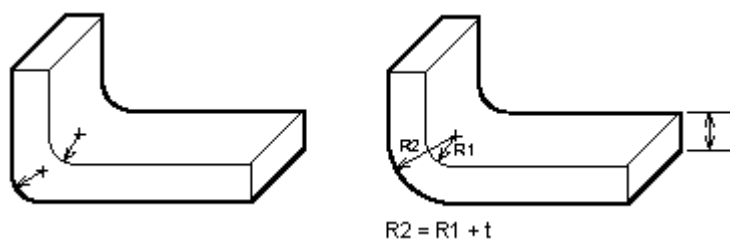
### 5.4.1 Úpravy tvaru výrobku

Konstrukční úpravy výrobku přináší snížení problémů. Rohy výrobků jsou obvykle na svých vnitřních stranách chlazeny pomaleji, takže dodatečné tuhnutí a s ním spojené smršťování pak způsobuje deformaci. Příznivě působí úprava vnějšího vnitřního zaoblení v rohové oblasti tak, aby se snížila její tloušťka.

Důležitým aspektem tvarového řešení je problematika koncentrátorů napjatosti – vrubů a studených spojů. U návrhů tvarově složitých těles se těmito „slabým místům“ nelze vyhnout. Vruby, tedy obecně místa náhlých změn tvaru, resp. tuhosti, je nutno mírnit konstrukčními úpravami, zejména zaobleními ostrých koutů a přechodů [7, 8, 9].



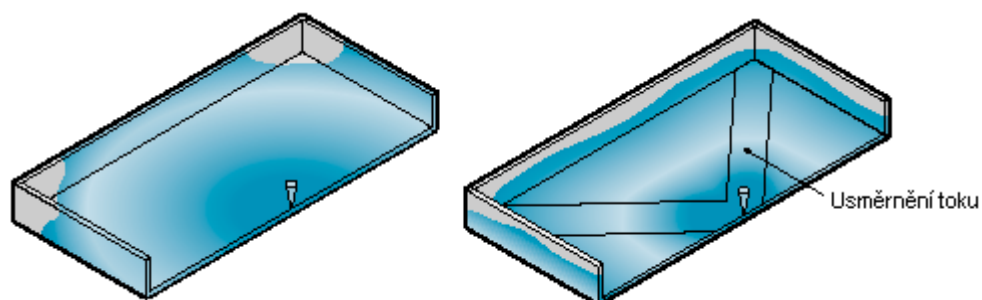
Obr. 18. Úprava tvaru zmenšením tloušťky stěny v kritické části výrobku – snížení vnitřního pnutí vlivem stejných rozměrů tloušťky stěn [9]



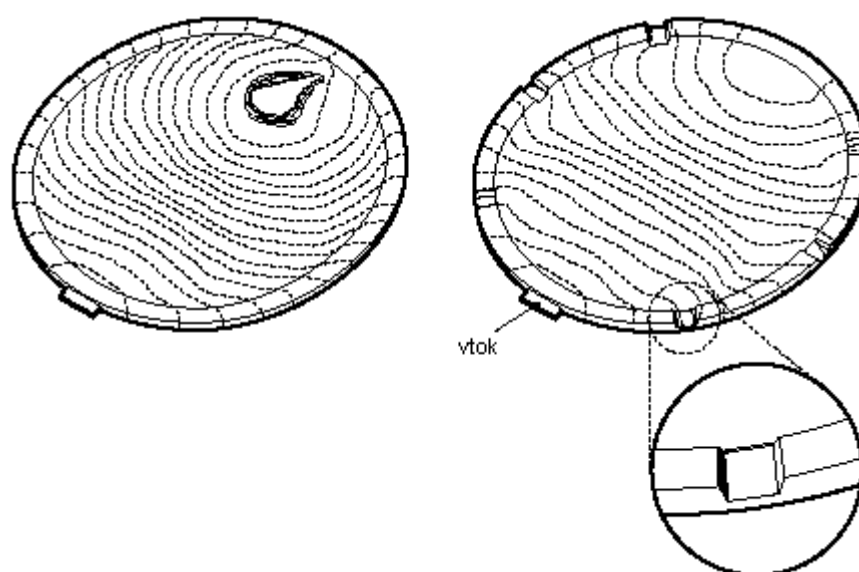
Obr. 19. Volba správného radiusu – snížení tloušťky stěny v místě zaoblení [9]



Obr. 20. Úprava pomocí různého způsobu zaoblení ostrého přechodu [9]



Obr. 21. Vytvoření drážky pro usměrnění toku taveniny a správnému plnění v dutině formy [9]



Obr. 22. Úprava výrobku pomocí drážek pro usměrnění toku taveniny [9]



Obr. 23. Snížení tloušťky stěn v místech vzniku případných problémů [9]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Již název této diplomové práce vypovídá o tom, že hlavním úkolem bude studium hodnocení kvality výlisku z polymeru POM. Zabývat se budeme především mechanickým chováním kopolymeru Polyoxymethylénu Iupital F20-03 při statických (tahových) a dynamických (vrubová houževnatost dle Charpyho) zkouškách.

V souvislosti s řešením tohoto problému budou vyrobená zkušební tělesa a také hotové dílce Hrnců části palivového modulu technologií vstřikování z polyoxymethylénu za různých vstřikovacích podmínek, v našem případě to bude 6 různých vstřikovacích podmínek pro zkušební tělesa a 2 vstřikovací podmínky, tedy podmínky A a F, pro dílce Hrnců, kdy podmínka pod označením A je nejideálnější způsob vstřikování POM, podmínky B – E jsou podmínky standardní (tedy budeme kombinovat teploty formy, taveniny, hodnoty dotlaku a doby chlazení) a poslední podmínka F bude výstřik za velmi špatných podmínek (tedy studená forma a studená tavenina).

Zkušební tělesa pro vrubovou houževnatost budou opatřena V vruby. Stanovení vrubové houževnatosti dle Charpyho bude prováděno dle normy ČSN EN ISO 179.

Zkušební tělesa pro stanovení vlastností pomocí tahové zkoušky budou dle normy ČSN EN ISO 527-2.

Dále pak budou vyřezána tahová tělesa z kritických míst části palivového modulu z části Hrnců. Na těchto tělískách bude provedena opět tahová zkouška.

Dalším požadavkem bude sledování závislosti ropných produktů na POM. Budeme tedy polovinu tělísek z každé vstřikovací podmínky namáčet v dieselu o teplotě 120 °C po dobu 96 hodin. Následně pak budou provedeny požadované zkoušky.

Při dalším sledování kvality výrobků z POM se budeme zabývat morfologií lomových ploch. Požadavkem je sledování lomových ploch na prasklém dílci Hrnců pomocí elektronového mikroskopu. Dílec bude vystaven tlakovému působení proudící kapaliny a po prasknutí bude vyřezáno 10 dílů s lomovou plochou. Dané díly budou vakuově pozlaceny. Lomové plochy pak budeme sledovat a vyhodnocovat pomocí elektronového mikroskopu.

Dalším hodnocením kvality výstřiku bude hodnocení designu dílu Hrnců. Pro daný dílec bude provedena toková a mechanická analýza. Pro další hodnocení kvality budou tyto analýzy porovnávány se snímky ze SEM a mikrotomových řezů.



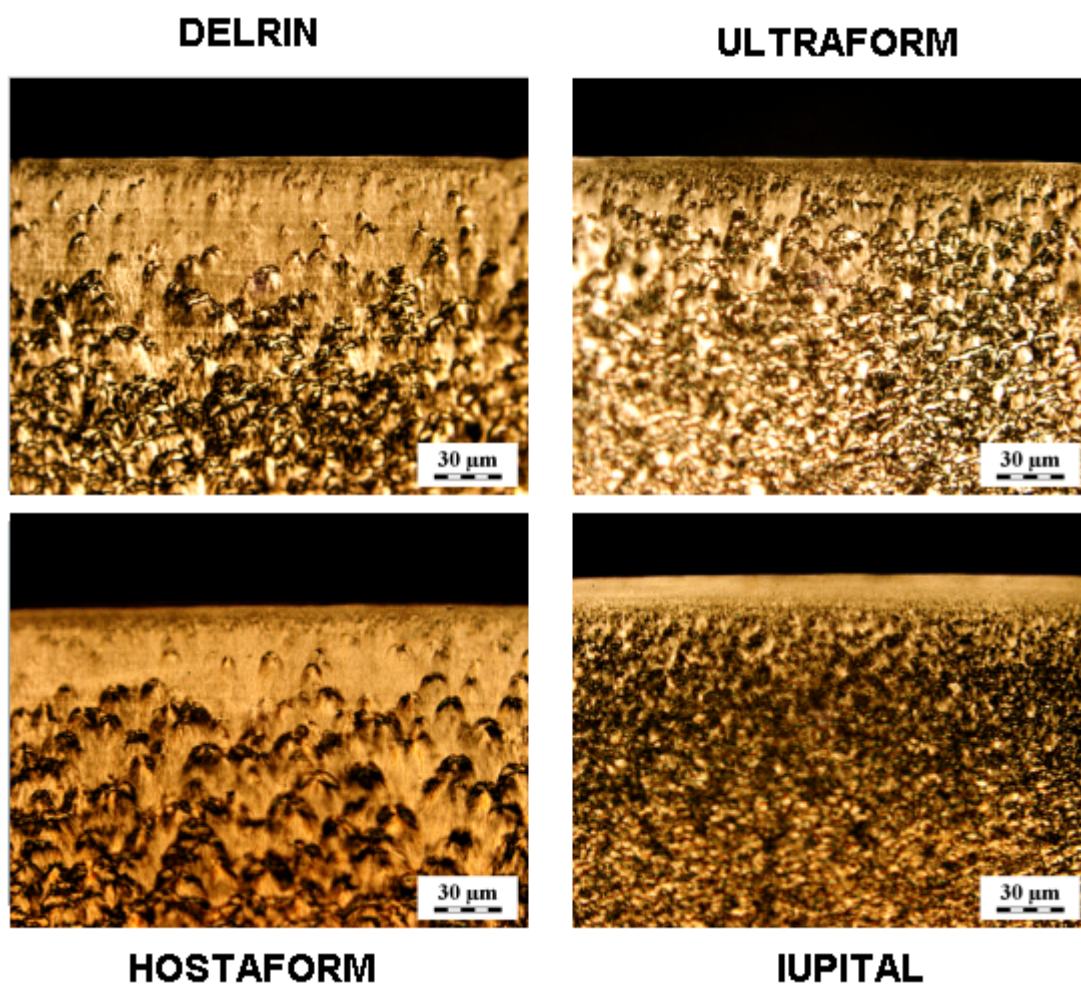
## 7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 7.1 Použitý materiál

Pro stanovení výsledků statické a dynamické zkoušky, zabývání se morfologií lomových ploch a designem daného dílce palivového modulu byl vybrán kopolymer Iupital F20-03 [24].

#### 7.1.1 Kopolymer Iupital F20-03

Iupital je krystalický polymer s molekulární strukturou  $-\text{[CH}_2\text{-O]}_n\text{-[CH}_2\text{-CH}_2\text{-O]}_m\text{-}$  a C-C vazbou, představující kopolymer POM. Má vyvážené mechanické vlastnosti, a vysokou pevnost, výborné plastické schopnosti, odolnost proti oděru a dobré vlastnosti proti opotřebením. Iupital má také široký teplotní rozsah, vysokou stálost proti ropným a chemickým látkám a výbornou tepelnou stálost při zpracování. Iupital je možné použít ve všech možných variantách výroby a mnoha aplikacích. Jeho využitelnost je podmíněna jeho dobrými mechanickými, chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Tento kopolymer můžeme také barvit, jeho dobrou vlastností je přijmout širokou paletu barev. Kopolymer POM – Iupital dodává na trh společnost Mitsubishi Engineering – Plastics Corporation [24].



Obr. 24. Sledování povrchové vrstvy různých druhů POM – různé struktury povrchové vrstvy a také různé ostrosti u jednotlivých materiálů. Kromě materiálu IUPITAL je obtížné tuto hranici jednoznačně vyznačit [1].

Tab. V. Vlastnosti kopolymeru POM – Iupital F20-03 [24]

<b>Iupital F20-03</b>		
<b>Vlastnosti</b>	<b>Jednotky</b>	<b>Hodnoty</b>
Hustota	g/cm <sup>3</sup>	1,41
Absorpce vlhkosti při 23 °C a 60 % vlhkosti	%	0,22
Hmotnost taveniny – rychlost tečení	g/10 min	9,0
Objem taveniny – rychlost tečení	cm <sup>3</sup> /10 min	7,7
Smrštění	%	2,0
Modul pružnosti v tahu	MPa	2900
Napětí na mezi kluzu	MPa	64
Deformace na mezi kluzu	%	8,5
Mez pevnosti v ohybu	MPa	90
Modul pružnosti v ohybu	MPa	2600
Rázová houževnatost dle Charpy při 23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	250
Vrubová houževnatost dle Charpy při 23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	7
Teplota tání	°C	166
Koeficient teplotní roztažnosti	1/°C	1,1 · 10 <sup>-04</sup>

## 7.2 Výroba zkušebních těles a dílců Hrnců palivového modulu

Všechna zkušební tělesa a dílce Hrnců nutná k provedení experimentu byla zhotovena technologií vstřikování.

### 7.2.1 Výroba zkušebních tělísek vstřikováním

Pro výrobu zkušebních těles byl použit vstřikovací stroj ARBURG – ARB370C. Jeho základní parametry jsou uvedeny v tabulce VI.

Vstřikování bylo provedeno za podmínek uvedených v tabulce VII a VIII při použití teplotních režimů popsanych v tabulce IX.



Obr. 25. Vstřikovací stroj ARB370C [1]

Tab. VI. Základní parametry stroje ARBURG – ARB370C [1]

Jednotka	Parametr	Jednotky	Hodnoty
Uzavírací jednotka	Uzavírací síla	kN	600
	Otevírací síla/zvýšená	kN	35/250
	Zdvih při otevření	mm	500
	Výška formy min.	mm	250
	Pracovní výška/otevření max.	mm	750
	Vzdálenost mezi táhly	mm	600
	Vyhazovací síla max.	kN	40
	Zdvih při vyhazování max.	mm	175
Vstříkovací jednotka	Průměr šneku	mm	35
	Efektivní délka šneku	L/D	20
	Zdvih šneku max.	mm	150
	Teoretický vstříkovací objem max.	cm <sup>3</sup>	144
	Maximální dávkování	g	132
	Vstříkovací tlak max.	bar	1820
	Max. vstříkovací průtok	cm <sup>2</sup> /s	154
	Protitlak pozitivní/negativní max.	bar	350/140
	Obvodová rychlost šneku	m/min	57
	Max. točivý moment šneku	Nm	450
	Max. dotyková síla trysky	kN	45
	Max. zdvih trysky	mm	240
	Kapacita zásobníku	dm <sup>3</sup>	50

Tab. VII. Cyklus vstříkování tahových tělísek

Cyklus	Parametry	Jednotky	Hodnoty	
Dávkování	Dávka	cm <sup>3</sup>	33	
	Otáčky šneku	m/min	15	
	Protitlak	bar	80	
Vstříkování	Vstřík. rychlost	mm/s	10	
	Vstřík. Tlak	bar	nastavený 1000	měřený 820
	Čas vstříkování	s	3,5	

Dotlak	Velikost	bar	800
	Rychlost	mm/s	155
	Čas	s	viz Tab. IX

Tab. VIII. Cyklus vstřikování tělísek pro rázovou a vrubovou houževnatost

Cyklus	Parametry	Jednotky	Hodnoty	
Dávkování	Dávka	ccm	18	
	Otáčky šneku	m/min	15	
	Protitlak	bar	80	
Vstřikování	Vstřik. rychlost	mm/s	8	
	Vstřik. Tlak	bar	nastavený 1000	měřený 920
	Čas vstřikování	s	3,5	
Dotlak	Velikost	bar	800	
	Rychlost	mm/s	155	
	Čas	s	viz Tab. IX	

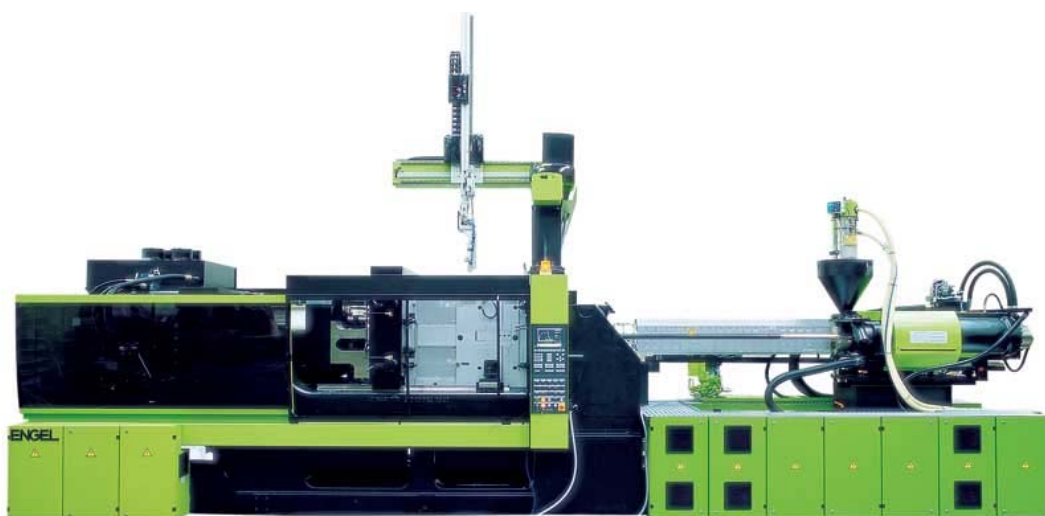
Tab. IX. Teplotní režimy podmínek vstřikování A – F

Serie	Teplota válce [°C]					Teplota formy [°C]	Dotlak [s]	Chlazení [s]
	Pod násypkou	Vstupní pásmo	Přechodové pásmo	Výstupní pásmo	Tryska			
A	170	180	180	190	190	85/85	15	20
B	170	180	180	190	190	85/85	5	30
C	170	180	180	190	190	85/85	25	10
D	170	180	180	190	190	50/36	15	20
E	170	180	180	190	190	90/80	15	20
F	160	165	170	170	170	30/30	15	20

### 7.2.2 Výroba dílců Hrnec palivového modulu vstříkovaním

Pro výrobu zkušebních těles byl použit vstříkovací stroj ENGEL – ES 750/175 HL. Jeho základní parametry jsou uvedeny v tabulce X.

Vstříkování bylo provedeno za podmínek uvedených v tabulce XI při použití teplotních režimů popsanych v tabulce XII.



Obr. 26. Vstříkovací stroj ENGEL – ES 750/175 HL [1]



Obr. 27. Princip vyhazování vylisku Hrnec [1]

Tab. X. Základní parametry stroje ENGEL – ES 750/175 HL [1]

Jednotka	Parametry	Jednotky	Hodnoty
Vstřikovací jednotka	Průměr šneku	mm	55
	Zdvih šneku	mm	200
	Max. vstřikovací kapacita	cm <sup>3</sup>	475
	Otáčky šneku	min <sup>-1</sup>	230
	L/D poměr	-	20
	Vstřikovací rychlost	cm <sup>3</sup> /sec	343
	Vstřikovací tlak	bar	1180
	Max. vstřikovací tlak	bar	1580
Uzavírací jednotka	Uzavírací síla	kN	1300
	Zdvih při otevírání	mm	600
	Velikost upínací desky	mm	750 x 520
	Max. zdvih trysky	mm	130
	Max. dotyková síla trysky	kN	61

Tab. XI. Cyklus vstřikování dílců Hrnc

Cyklus	Parametry	Jednotky	Hodnoty	
			A	F
Dávkování	Dávka	cm <sup>3</sup>	154,4	154,4
	Otáčky šneku	m/min	15,84	15,84
Vstřikování	Vstřik. rychlost	mm/s	39	38
	Vstřik. Tlak	bar	1139	1139
	Čas vstřikování	s	2,77	2,68
Dotlak	Velikost	bar	82,8	152,7
	Čas	s	15	15

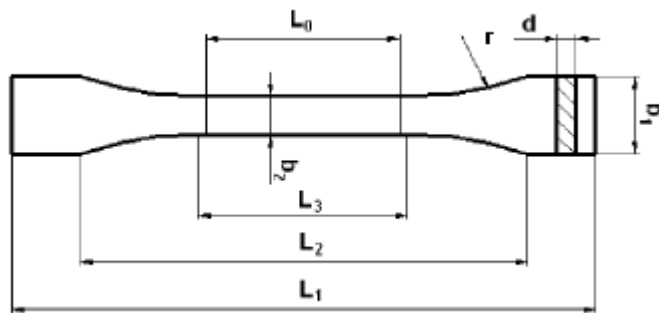


Tab. XII. Teplotní režimy podmínek vstřikování dílce Hrncel A a F

Serie	Teplota válce [°C]					Teplota formy [°C]	Dotlak [s]	Chlazení [s]
	Pod násypkou	Vstupní pásmo	Přechodové pásmo	Výstupní pásmo	Tryska			
A	205,1	210,3	214,7	215,0	210,1	120	15	20,04
F	169,9	175,2	179,9	185,0	190,1	120	15	20,04

### 7.2.3 Výroba normalizovaných tělísek pro tahovou zkoušku

Tahová tělíska byla vstřikována dle normy ČSN EN ISO 527-2 o velikosti viz. Tab. XIII. [15].



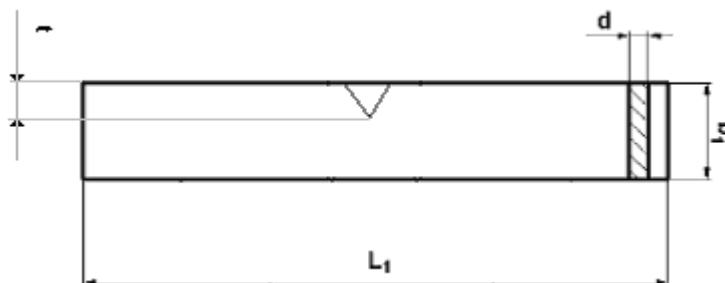
Obr. 28. Normalizované zkušební těleso pro tahovou zkoušku

Tab. XIII. Rozměry normalizovaných tahových těles

Rozměr	Hodnota [mm]
$L_0$	$50 \pm 0,5$
$L_3$	$60 \pm 0,5$
$b_2$	$10 \pm 0,5$
$d$	$4 \pm 0,4$
$L_1$	150
$b_1$	$20 \pm 0,5$
$L_2$	$115 \pm 3$
$r$	60

### 7.2.4 Výroba normalizovaných tělísek pro vrubovou houževnatost

Tělíska pro vrubovou houževnatost byla vstříkována dle normy ČSN EN ISO 179 o velikosti viz Tab. XIV. [16].



Obr. 29. Zkušební tělíska vrubové houževnatosti

Tab. XIV. Rozměry těles pro vrubovou houževnatost

Rozměr	Hodnota [mm]
$L_1$	$60 \pm 1$
$b_1$	$10 \pm 0,2$
$d$	$3,8 - 4,2$
$t$	$2,65 \pm 0,04$

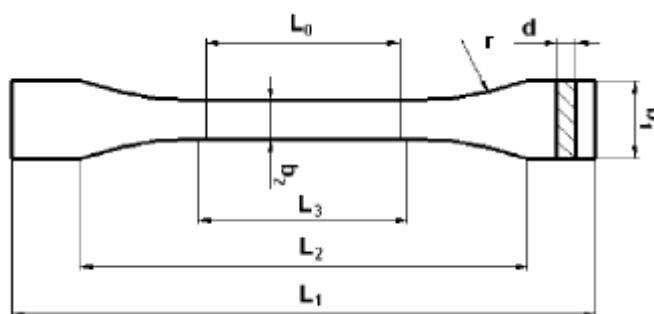
### 7.2.5 Výroba nenormalizovaných tahových tělísek vyřezávaných z dílu Hrnc

Na základě analýzy problému bylo navrženo provést mechanické zkoušky materiálu (tahová zkouška), které by neměly být tolik ovlivněny dalšími vlivy, jako vliv deformace při tuhnutí a následné přivařování víka filtru. Byla zvolena vnější stana válcové dutiny filtru. Jedná se místo, kde je předpoklad, že je zde relativně nejrovnoměrnější a nejstabilnější proces plnění a tuhnutí materiálu ve formě, a tedy že i struktura a mechanické vlastnosti zde budou v celém průřezu jednotné a stabilní.



Obr. 30. Výrobek Hrncel před a po přivaření víka filtru a s naznačením polohy zkušebních těles

Volba rozměrů zkušebních tělísek byla stanovena dle rozměrových možností výlisku a s ohledem na doporučení normy pro tahovou zkoušku ČSN EN ISO 527.

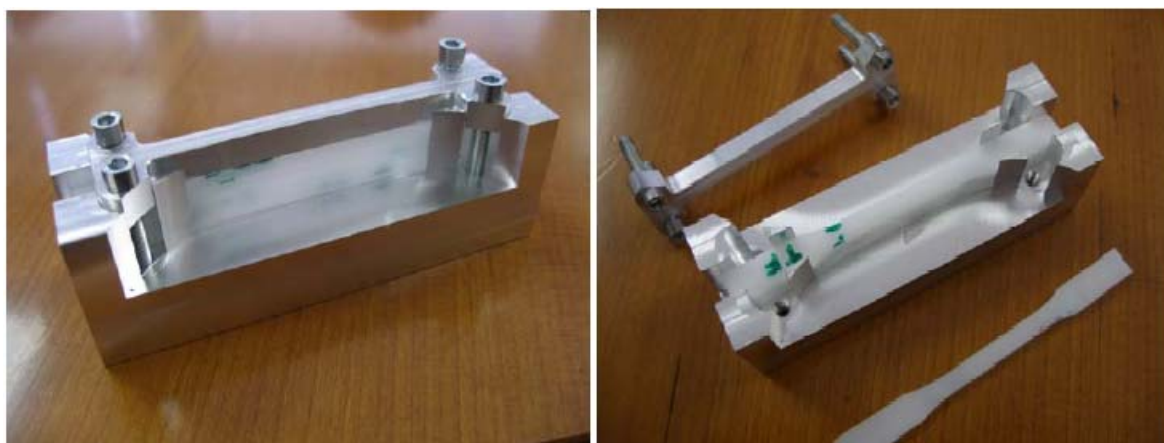


Obr. 31. Zkušební tahové tělísko

Tab. XV. Rozměr zkušebních těles pro tahovou zkoušku (viz Obr.31)

Rozměr	Hodnota [mm]	Poznámky
L <sub>1</sub>	90	
L <sub>3</sub>	30	
r	30	
L <sub>2</sub>	48	
b <sub>1</sub>	8	
b <sub>2</sub>	5	
d	2,1 – 4,4	Vzhledem k rozdílnému úkosu na vnější a vnitřní straně výlisku je tloušťka stěny rozdílná na počátku a konci měřené délky L <sub>0</sub> . Průřez není obdélníkový, jedná se o výseč kruhového mezikruží R26 a o tloušťce uvedeném rozměru „d“.
L <sub>0</sub>	25	

Postup výroby byl takový, že v prvním kroku byly ze stěny výrobku vyříznuty polotovary tělísek o hrubých rozměrech 10 x 95 mm, které byly posléze obrobeny ve svěráku na rozměr 8 x 90 mm. Tělíska pro tahovou zkoušku byly upnuty po 6ks do speciálně vyrobeného přípravku (viz Obr.32) a obrobeny do finálního tvaru. Obrábění bylo prováděno podle normy ČSN EN ISO 2818.



Obr. 32. Přípravek pro obrábění zkušebních těles(včetně těles)

### 7.3 Tahová zkouška

Experimentální provedení tahových zkoušek bylo provedeno při teplotě 23 °C na univerzálním trhacím stroji Zwick 145665 [15].

Tab. XVI. Technická data zkušebního zařízení ZWICK 1456

Rozsah měřené délky	0,02 N - 10kN
Rychlost posuvu příčnicku s odchylkou	0,001 - 1500 mm/min 1% z 0,001 mm/min
Test. prostor, výška x šířka	1160 mm x 420 mm
Elektrické zapojení	115/230 V, 50/60 Hz, 400 VA
Rozměry	1284 x 630 x 500 mm
Celková hmotnost	185 kg



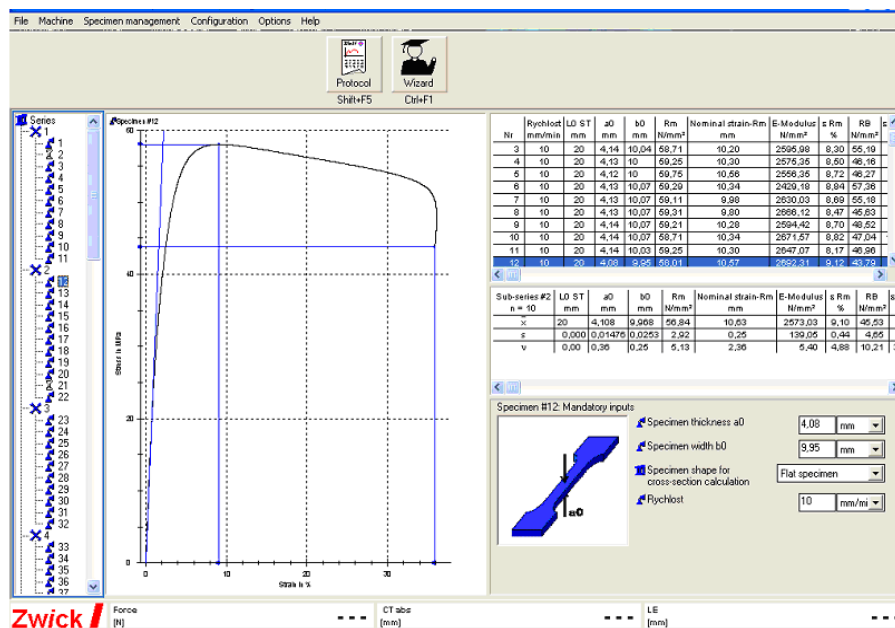
Obr. 33. Univerzální trhací stroj Zwick 145665

### 7.3.1 Princip tahové zkoušky

Před započítím zkoušky byly vzorky upnuty mezi dvě čelisti. Jedna, dolní čelist, je spojená se siloměrným čidlem. Druhá čelist je pohyblivá a spojená s mechanickým pohonem. V průběhu zkoušky se pohyblivá čelist od pevné oddalovala, a tím se zkušební těleso postupně deformovalo. Současně byla registrována síla, kterou bylo těleso deformováno. Deformační rychlost byla stanovena na 10 mm/min. Výsledkem tahové zkoušky byla závislost mezi silou a protažením, která byla znázorněna pracovním diagramem napětí – deformace. Rostoucí deformace byla vynášena na vodorovnou osu jako nezávisle proměnná, napětí, které je reakcí materiálu na deformaci, bylo vynášeno svisle. Tvar křivky napětí – deformace nám dává důležitou výpověď o materiálu. Počáteční část, v níž je závislost mezi napětím a deformací vyjádřena přímkou, udává rozsah hookovské oblasti. Směrnice této přímky vzhledem k ose napětí je pak Youngův modul. Místo, kde se křivka od ideální oblasti odchyluje, je mezí úměrnosti. S dalším deformováním materiálu pak napětí dosahuje maxima. Napětí, které odpovídá tomuto maximu, je mezí kluzu. Deformace do meze úměrnosti, tj. elastické deformace, se opět zruší po uvolnění napětí, za mezí kluzu nám nastupuje plastická deformace, která je trvalá. Typické pro POM je shodné vyjádření meze kluzu a meze pevnosti, tedy mez kluzu je mezí pevnosti. Konečně, plocha uzavřená mezi křivkou napětí – deformace a vodorovnou osou vyjadřuje deformační práci, kterou bylo nutno vynaložit na deformaci objemové jednotky materiálu až do přetržení. Z těchto závislostí se dají pomocí vhodného programu získat požadované veličiny.

### 7.3.2 Zpracování dat

Požadované veličiny byly zpracovány pomocí programu testXpert V 7.11, který je přímo určen pro aplikace měření a sběru dat. Program má velmi široké aplikační možnosti a může být použit jak pro sériové užití, tak i pro vývoj a testování nových metod měření a zpracování. Prostředí programu upraveného pro potřeby rázové zkoušky je zobrazeno na Obr. 34.



Obr. 34. Program testXpert 7.11 při zpracování dat

Pomocí programu byla na každém tělese zjištěna hodnota modulu pružnosti, meze kluzu, meze úměrnosti a hodnota deformace na mezi kluzu a při přetržení. Dále pak byla stanovena tahová křivka ke každému tělísku.

## 7.4 Zkouška vrubové houževnatosti

Experimentální provedení vrubových zkoušek bylo provedeno při teplotě 23 °C pomocí Charpyho kladiva Zwick 5113 a zpracování dat bylo provedeno programem testXpert 9.1. [16].

Tab. XVII. Technická data Zkušebního zařízení ZWICK 5113

Úhel dopadu kladiva	160°
Elektrické zapojení	115/230 V, 50/60 Hz
Rozsah jmenovité energie	0,5 – 50 J
Celková hmotnost	170 kg



Obr. 35. Charpyho kladivo Zwick 5113

#### 7.4.1 Princip zkoušky vrubové houževnatosti

Zkušební tělesa umístěná vodorovně na podpěrách byla namáhána ve směru kolmém k přímce rázu, procházející středem mezi podpěrami, a ohýbáno vysokou, nominálně konstantní rychlostí. U těles opatřených vrubem dopadalo kladivo na stranu protilehlou k vrubu.

Během zkoušky se registruje závislost rázové síly na průhybu. Signál síly se v závislosti na čase zaznamenává pomocí tenzometrického snímače umístěného na břitu kladiva. Průhyb v závislosti na čase se měří optickým zařízením. Analogový signál síly a průhybu se přes zesilovač zpracovává v analogovém číslicovém převodníku. Data se registrují a zpracovávají graficky a číselně ve vyhodnocovací jednotce. Získané křivky síla-průhyb popisují chování zkušebních těles při rázovém ohybovém namáhání. Z těchto závislostí se dají pomocí vhodného programu získat veličiny potřebné ke stanovení vrubové houževnatosti.

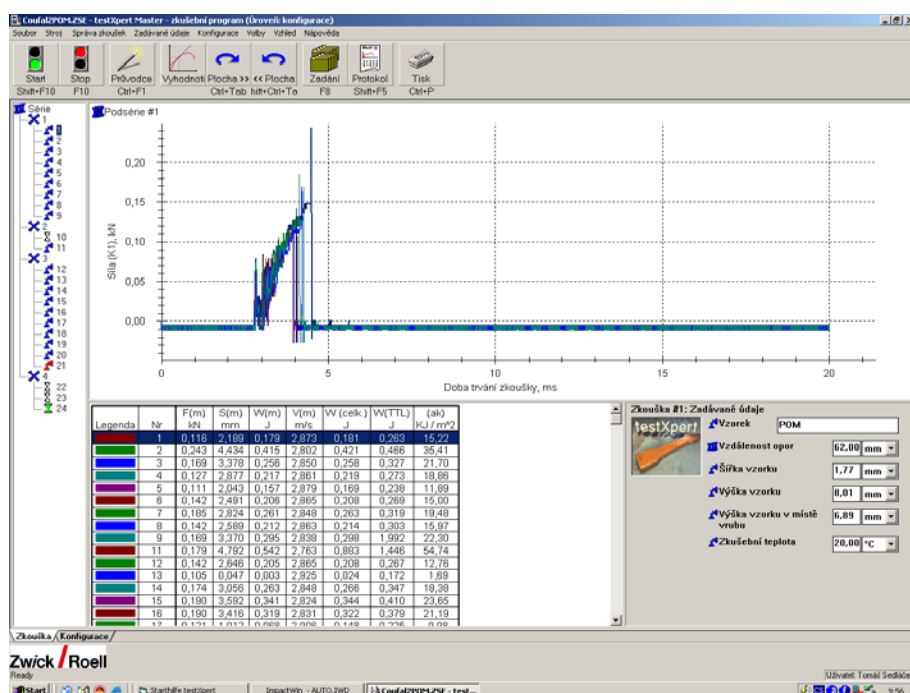
#### 7.4.2 Charpyho kladivo

Ke stanovení hodnot lomové houževnatosti bylo použito instrumentované rázové Charpyho kladivo o jmenovité energii 5 J, kladivo dopadalo na zkušební tělísko pod úhlem  $159,88^\circ$ , délka kyvadla byla 225 mm a hmotnost kyvadla 1,17 kg. Teoretická nárazová rychlost byla 2,93 m/s.



### 7.4.3 Zpracování dat

Závislost síly na průhybu při vrubové zkoušce byla zpracována pomocí programu testXpert 9.1, který je přímo určený pro aplikace měření a sběru dat. Program má velmi široké aplikační možnosti a může být použit jak pro sériové užití, tak i pro vývoj a testování nových metod měření a zpracování signálu. Je vybaven grafickým vyhodnocením, řízením experimentů pomocí programu a grafickým výstupem dat. Prostředí programu upraveného pro potřeby vrubové zkoušky je zobrazeno na Obr. 36.



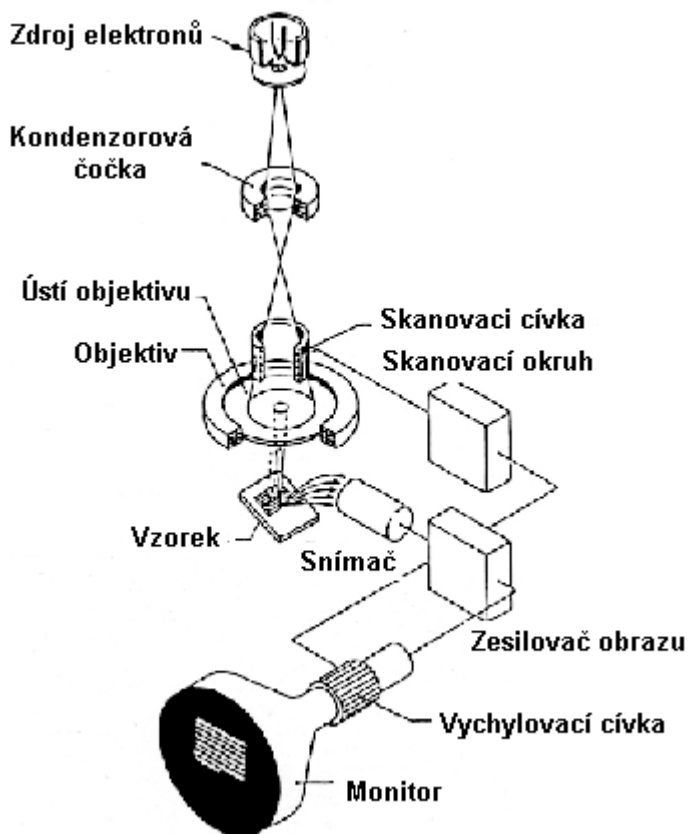
Obr. 36. Program testXpert 9.1 při zpracovávání dat pro rázovou a vrubovou houževnatost

## 7.5 Morfologie lomových ploch pomocí SEM

Sledování lomových ploch na daném dílci bylo provedeno pomocí skanovacího elektronového mikroskopu JEOL 6300 na Jihočeské univerzitě v Českých Budějovicích v laboratoři elektronové mikroskopie.

### 7.5.1 Skanovací (rastrovací) elektronový mikroskop SEM

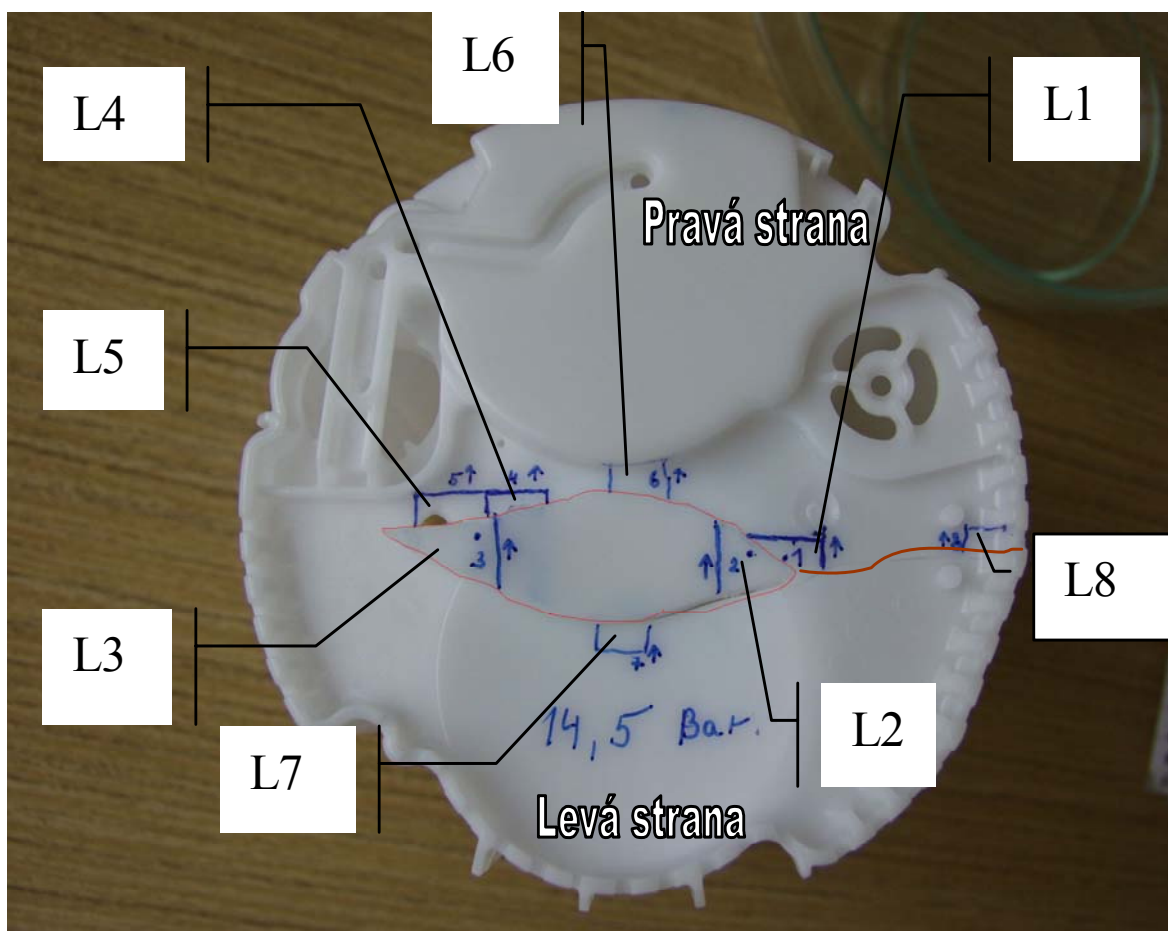
Skannovací elektronový mikroskop (dále SEM) je přístroj určený k pozorování povrchů nejrůznějších objektů. Je ho možné do jisté míry považovat za analogii světelného mikroskopu v dopadajícím světle, na rozdíl od něho je výsledný obraz tvořen pomocí sekundárního signálu - odražených nebo sekundárních elektronů. Díky tomu je zobrazení v SEM považováno za nepřímou metodu. Velkou předností SEM v porovnání se světelným mikroskopem je jeho velká hloubka ostroty, v důsledku které lze z dvojrozměrných fotografií ze SEM nalézt jistý trojrozměrný aspekt. Další předností těchto mikroskopů je, že v komoře preparátů vzniká při interakci urychlených elektronů s hmotou vzorku kromě výše zmíněných signálů ještě řada dalších, které nesou mnoho dalších informací o vzorku. Při jejich detekci je možné určit např. prvkové složení preparátu v dané oblasti a při porovnání s vhodným standardem určit i kvantitativní zastoupení jednotlivých prvků. V literatuře se kromě názvu skannovací používá i označení rastrovací nebo český název řádkovací elektronový mikroskop, který naznačuje, že při práci mikroskopu se primární svazek pohybuje po určité ploše preparátu [22, 23].



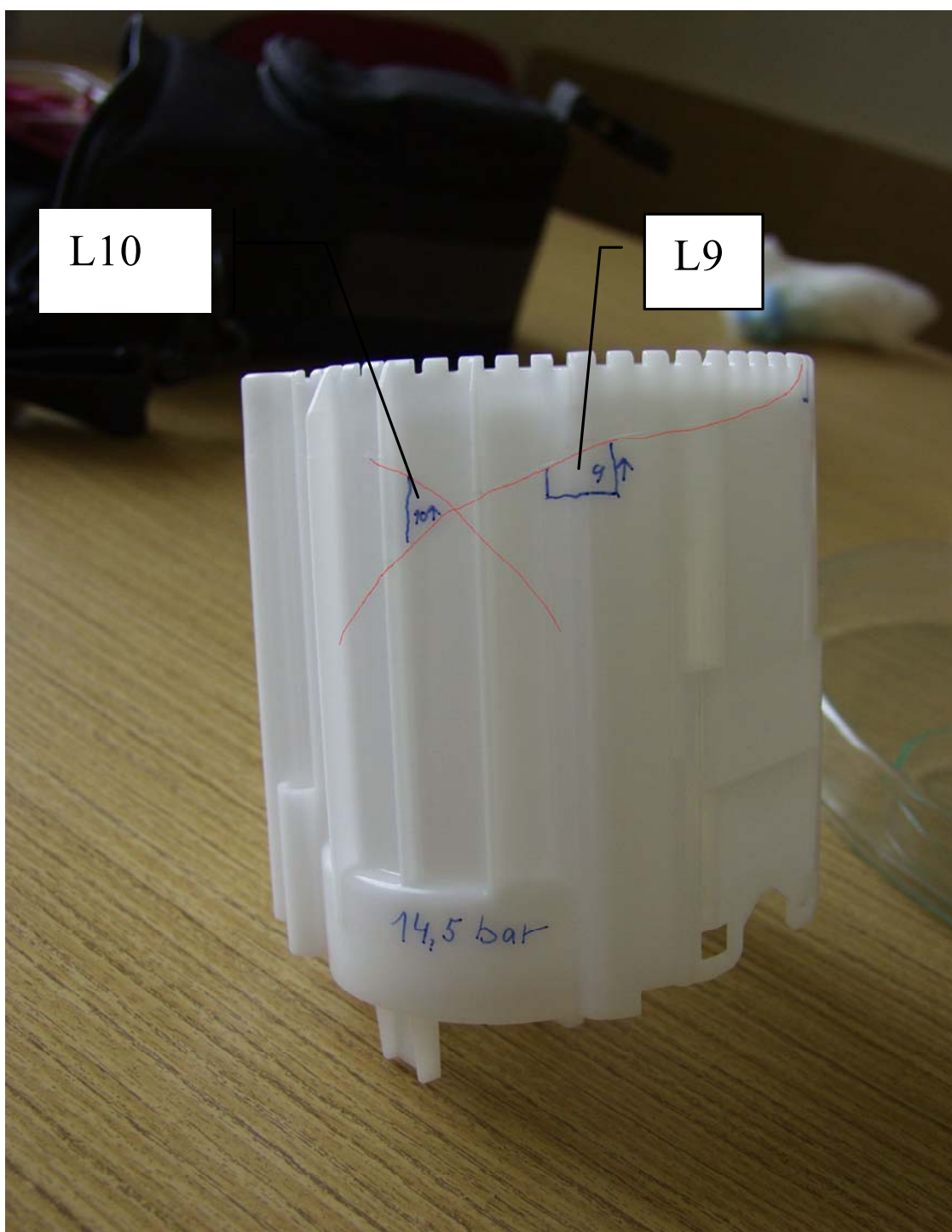
Obr. 37. Konstrukce skanovacího elektronového mikroskopu [23]

### 7.5.2 Postup zkoušky

Pomocí vstříkovací stroje ENGEL ES 750/175 HL (viz kapitola 3.2.2) byl vyroben dílec Hrnc z POM Jupital 20-03, který byl vystaven tlakové zkoušce (do uzavřeného dílce byla vpouštěna kapalina) do té doby, dokud nedošlo k destrukci.



Obr. 38. Místa praskliny a odběru vzorků dílce Hrnc, spodní část



Obr. 39. Místa praskliny a odběru vzorků dílce Hrnc, boční část

Z dílce bylo vybráno a vyřezáno 10 vzorků pro sledování lomových ploch na SEM. Vzorky byly vysušeny a umístěny na terčíky a pozlaceny.



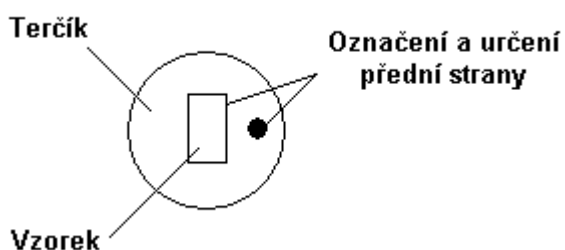
Obr. 40. Podavač vzorku umístěného na terčiku do vakuové komory SEM [23]

Snímky lomových ploch daných vzorků byly zhotoveny na skanovacím (rastrovacím) elektronovém mikroskopu JEOL 6300.



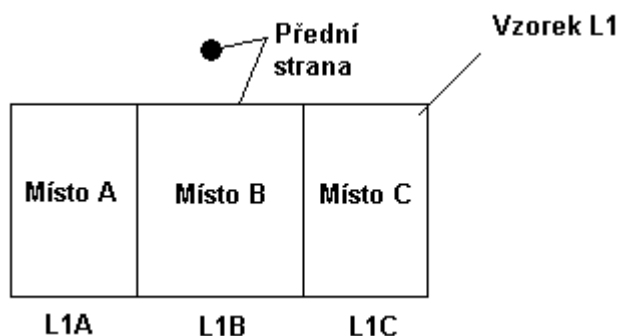
Obr. 41. Skanovací elektronový mikroskop JEOL 6300 [23]

Prvním úkolem bylo zvolit srozumitelný popis a určit správnou orientaci vzorků ve vakuové komoře SEM. Jelikož jsme ve vakuové komoře mohli terčíkem se vzorkem pohybovat ve všech směrech, musela být zvolena přední a zadní strana. Přední strana byla označena černou tečkou na terčíku (viz Obr. 42.).



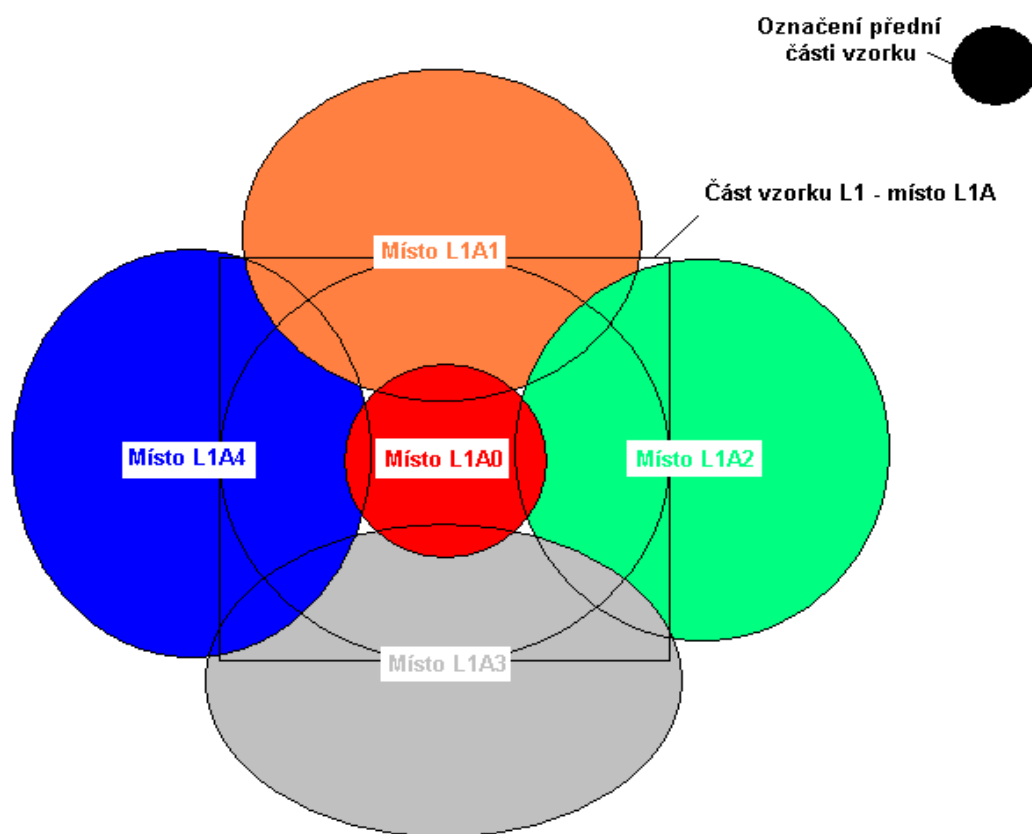
Obr. 42. Označení polohy vzorku na terčíku

Dalším úkolem bylo určit, jakým způsobem budeme popisovat sledovaná místa na vzorku. Prvním požadavkem bylo označit vzorky písmenem L, bylo-li tedy 10 vzorků, tak L1 – L10. Dále pak byl vzorek rozdělen na tři sledovaná místa, pod označením A, B, C; tedy např. L1A (viz Obr. 43.).



Obr. 43. Příklad základního rozdělení sledovaného vzorku (L1)

Jelikož díky SEM lze sledovat detailní části sledovaného vzorku, byl zvolen podrobnější popis zkoumaných míst A – C. Např. místo A je dále rozděleno do čtyř částí. Do tohoto sledovaného místa je vložen kruh, kde jeho střed je označen číslem 0, jeho horní část číslem 1, pravá část číslem 2, dolní část kruhu číslem 3 a levá číslem 4 (viz Obr. 44.).



Obr. 44. Detailní označení daného místa vzorku (místo L1A)

### 7.5.3 Zpracování výsledků

Snímky lomových částí vybraných vzorků byly pořízeny skanovacím (rastrovacím) elektronovým mikroskopem JEOL 6300 na Jihočeské univerzitě v Českých Budějovicích v laboratoři elektronové mikroskopie.

## 7.6 Vliv konstrukčního řešení na vady výrobku – mikrotomové řezy

Sledování designu je jednou z nejdůležitějších operací ve výrobě plastových součástí. Tato metoda nám dává obraz o celkovém chování a vzniku případných problémů na vyráběném dílu. Zkoumání designu je vlastně kombinace několika metod, které se provádějí od návrhu dílu až po hotový výrobek.

### 7.6.1 Metody zkoumání vybraného dílu

Pro sledování konstrukčních vad byl vybrán dílec Hrncel vstřikovaný za podmínek A a F (viz tab. XII). Na daném dílci byly provedeny čtyři metody zkoumání, byla to kombinace mechanické a tokové analýzy, elektronové a světelné mikroskopie (mikrotomové řezy). Pomocí snímků získaných ze SEM (viz kapitola 8.1.3) jsme také, kromě lomových vlastností, sledovali případné vady vnitřní struktury a konfrontovali je s tokovou a mechanickou analýzou. S moldflow analýzou jsme také porovnávali snímky získané pomocí světelné mikroskopie (viz kapitola 8.1.4).

### 7.6.2 Světelná mikroskopie (mikrotomové řezy)

Mikrotomie a mikroskopie v procházejícím světle s nebo bez polarizovaného světla představují důležitou pomůcku k hodnocení struktury polymerů (včetně plněných a vyztužených) a také pomůcku při analýze vad.

Dobré mikroskopické zobrazovací schopnosti jsou dosaženy vhodnými tloušťkami mikrotomových řezů. Tloušťku preparátu je třeba volit s ohledem na pozorované elementy struktury. U transmisní světelné mikroskopie by tloušťka mikrotomových řezů neměla přesáhnout několik málo desítek mikrometrů, ovšem pro menší struktury a lepší rozlišení je třeba dosáhnout tloušťky v jednotkách mikrometrů.

Světelná mikroskopie poskytuje obrazy s limitním rozlišením 0,2  $\mu\text{m}$ . Pozorování v polarizovaném světle zobrazují útvary s optickou anizotropií: u polymerů jsou to krystalické struktury (sférolity, sférolitické uspořádání) nebo orientační struktury (11).

Na základě struktury plastů jsou vícefázové systémy, jako jsou např. semikrystalické polymery či plněné a vyztužené polymery, při mikroskopickém posuzování přístupnější než amorfni, neplněné polymery.

Mikrotomie umožňuje pozorovat a hodnotit:

1. Strukturu a odchylky od ideálního stavu v důsledku zpracování polymerů.
2. Vměstky a znečištění (nehomogenita), neroztavené části materiálu.
3. Rozdělení plniv a pigmentů v materiálu.
4. Lunkry, trhliny, poruchy, svary, studené spoje.
5. Orientace vyztužených materiálů. [22]



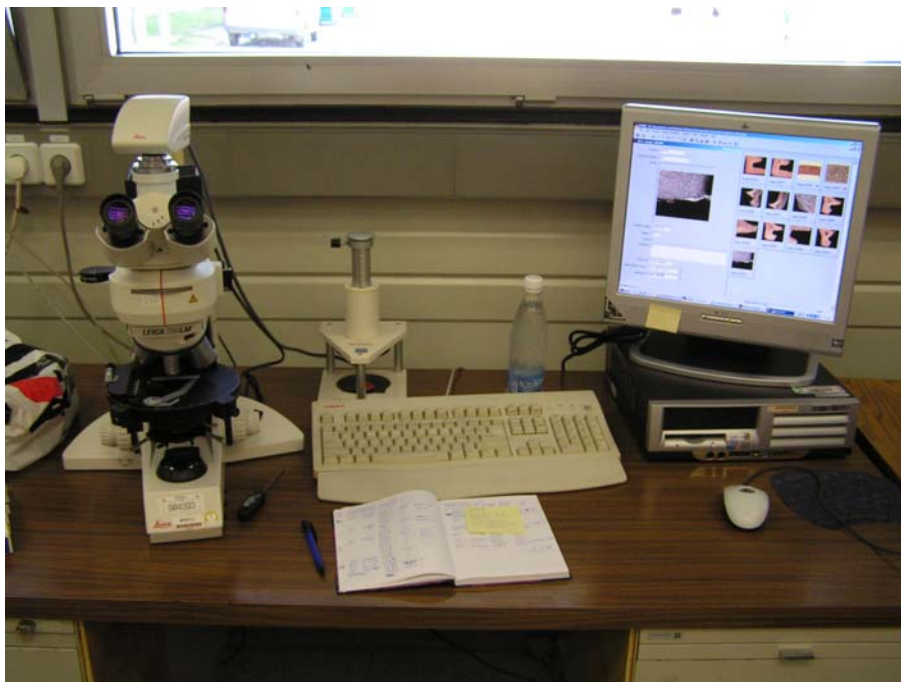
### 7.6.3 Postup zkoušky

Odběr vzorků pro mikrotomové řezy byl proveden v podstatě ze tří míst (místo odběru 1, 2 a 3). Místo odběru vzorku 1 je na vnější straně dna nádoby, 20 mm od vtoku, na hraně vypuklé části pro umístění filtru. Místo odběru vzorku 2 je přibližně uprostřed "patky", na kterou se svařuje držák čerpadla, při vnější straně dna nádoby. Místo odběru vzorku 3 je na vnějším plášti nádoby 50 mm od spodního lemu víčka filtru, uprostřed žeber filtru. Popsaná místa 1, 2 a 3 jsou zobrazena na obrázcích 85, 88 a 90.

Místa 1,2 a 3 byla odvrtnána speciálním vrtáčkem na dvou dílech Hrnc. Vzorky 1 a 3 z jednoho dílu byly namočený v horkém dieslu (120 °C po dobu 96 hodin). Byly provedeny mikrotomové řezy na přístroji LEICA SM 2500 E a sledování řezů bylo provedeno na světelném mikroskopu LEICA DFC 280.



Obr. 45. Nůž pro mikrotomové řezy LEICA SM 2500 E



Obr. 46. Světelný mikroskop LEICA DFC 280

Naším úkolem bylo pozorovat dané snímky z konstrukčního hlediska a porovnávat je s tokovou analýzou. Byly vybrány ty snímky, kde lze shledávat vady, jako jsou lunkry, tokové linie či studené spoje. Celkovým vyhodnocením bylo stanovení, zda za případnými vzniklými vadami může být také design dílu.

V případě porovnávání lomových částí získaných ze SEM s tokovou a mechanickou analýzou bylo pozorováno, zda vznik trhlin je také následkem způsobu toku taveniny či deformováním dílu při určitém namáhání. Porovnání tokové a mechanické analýzy se snímky lomových částí SEM a závěry plynoucí z této závislosti jsou provedeny v kapitole 8.1.3.

## 8 DISKUSE K VÝSLEDKŮM

### 8.1.1 Tahová zkouška

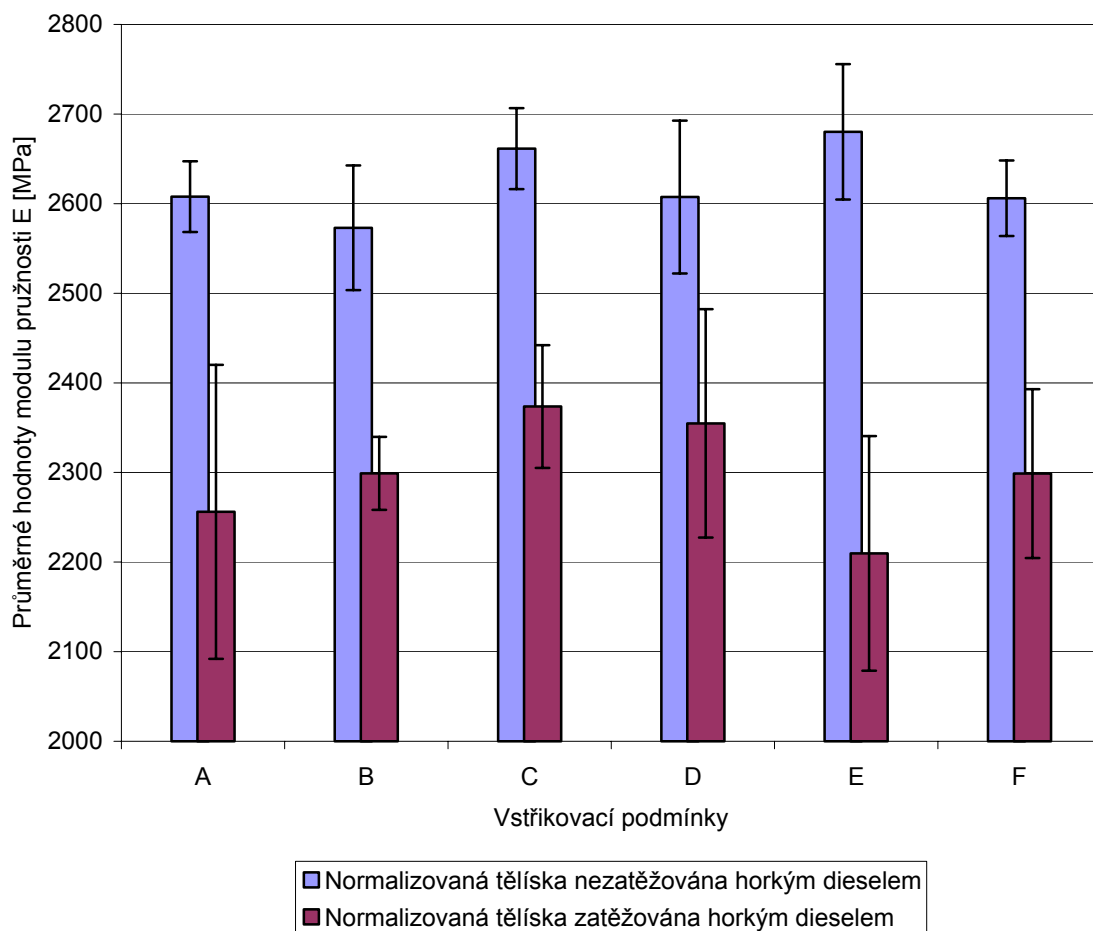
Pomocí trhacího stroje Zwick a programu testXpert 7.11 byly pro **normalizovaná tělíska** vyhodnoceny parametry modulu pružnosti  $E$ , napětí na mezi úměrnosti  $\sigma_u$ , napětí na mezi kluzu (pevnosti)  $\sigma_k$  a poměrné deformace  $\varepsilon$ . Byly měřeny vždy pro 10 zkušebních tělesech. Jejich hodnoty jsou uvedeny v přílohách P1 – P5, tahové křivky jsou uvedeny v přílohách P16 – P27 a grafické zobrazení průměrných hodnot je na obrázcích 47, 49, 51, 52 a 54.

Zkoušku tahových vlastností (dle ČSN EN ISO 527) **nenormalizovaných těles** vyřezaných z dílu hrnc zajišťovala KMM/ZČU Plzeň na stroji ZWICK ROELL Z 550, a s řídicím programem TestXpert verze 10.11.

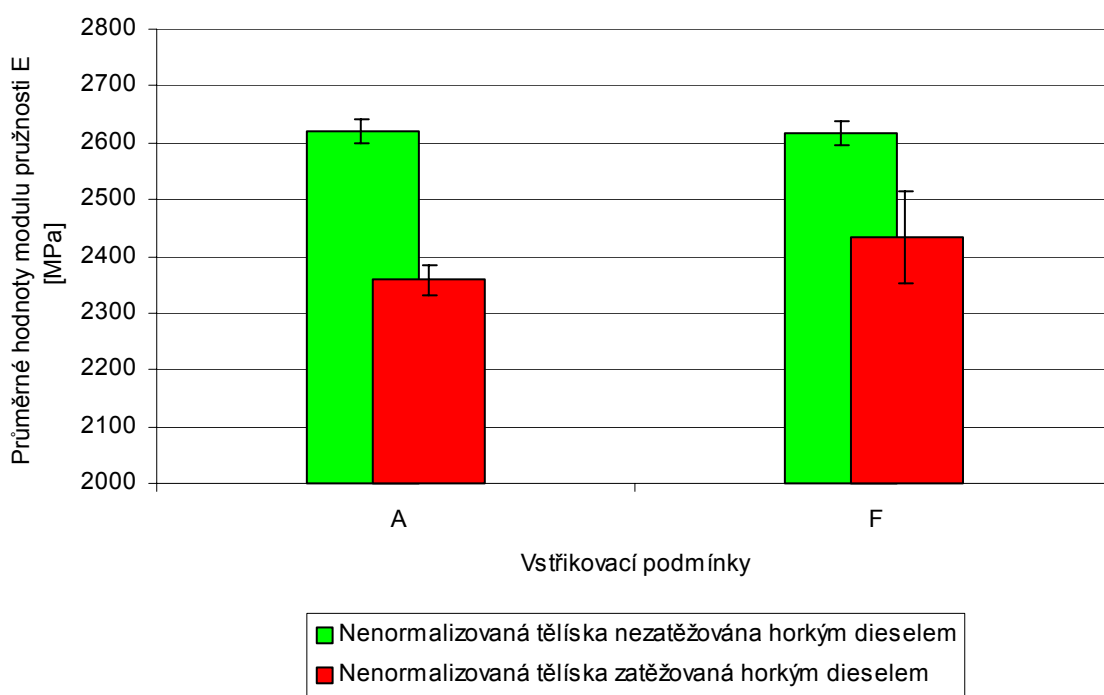
U pěti těles od každého vstřikovacího režimu byl vyhodnoceny moduly pružnosti  $E$ , napětí na mezi kluzu  $\sigma_k$ , deformace na mezi kluzu  $\varepsilon_k$  a tažnosti (poměrné deformace při přetržení)  $\varepsilon_r$ .

U vyhodnocování výsledků jsme museli brát v úvahu, že průřez zkušebních těles nebyl obdélníkový, nýbrž se jednalo o výseč kruhového mezikruží. Výsledné hodnoty napětí ale byly pro zjednodušení vztaženy k teoretickému obdélníkovému průřezu o stranách  $h$  a  $b$ . Další nepřesnost výsledných hodnot plyne z toho, že byla použita střední hodnota průřezu, tedy průřez na středu měřeného úseku  $L_0$ , ale k porušení vzorků samozřejmě docházelo na straně s menším průřezem. Naměřené hodnoty mechanických vlastností vztahujících se k průřezu tedy nelze považovat za skutečné hodnoty daných charakteristik, a nelze je tedy porovnávat s tabulkovými hodnotami daných materiálů. Takové porovnávání ale nebylo záměrem těchto experimentů, smyslem těchto zkoušek bylo vzájemné porovnání vlastností materiálu, který byl různým způsobem zpracován. Pro tyto potřeby porovnání režimů vstřikování je tento zjednodušený způsob zohlednění průřezu možný, jelikož je u všech vzorků shodný.

Hodnoty nenormalizovaných tělísek jsou uvedeny v přílohách P12 – P15, tahové křivky jsou uvedeny v přílohách P40 – P60 a grafické zobrazení průměrných hodnot je na obrázcích 48, 50, 53 a 55.



Obr. 47. Porovnání průměrných hodnot modulu pružnosti E – normalizovaná tělíska



Obr. 48. Porovnání průměrných hodnot modulu pružnosti E – nenormalizovaná tělíska

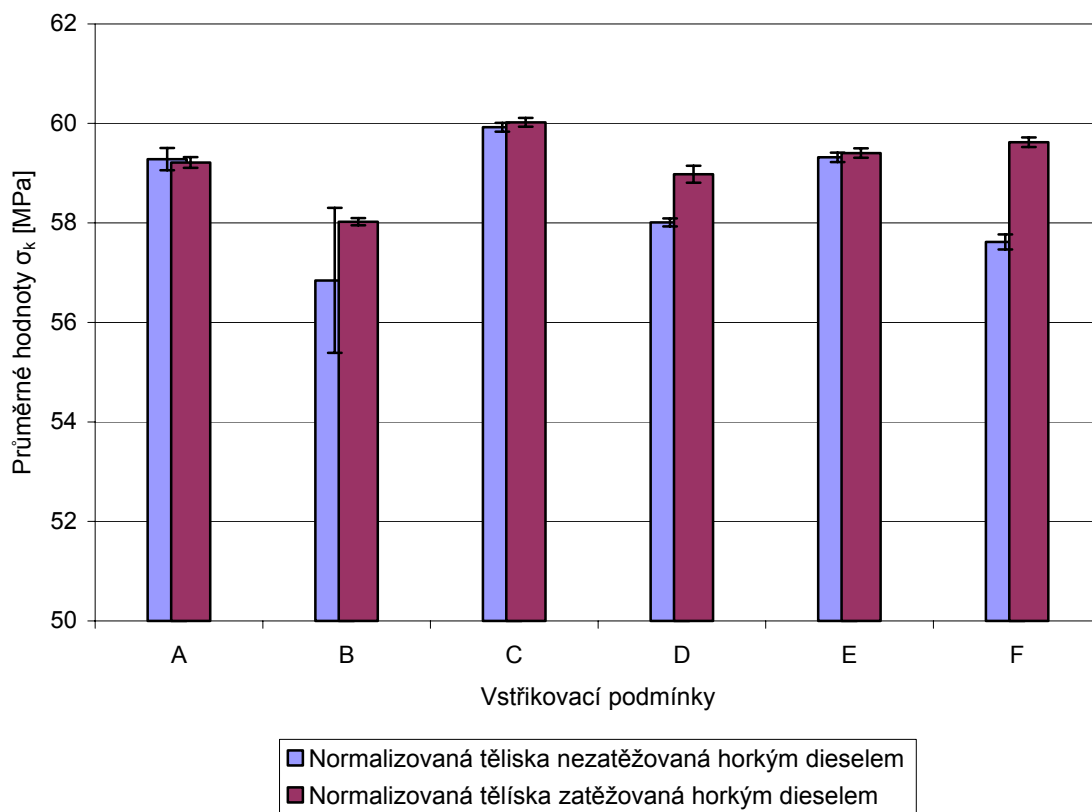
Výrobce kopolymeru Iupital udává průměrnou hodnotu modulu pružnosti  $E = 2900 \text{ MPa}$ , v našem případě jsme získávali tahové křivky z tahových tělísek, která byla vstřikována za 6 různých vstřikovacích podmínek, dále pak část těchto tělísek byla vystavena vlivu ropného produktu. V našem případě horkému dieselu, který měl teplotu  $120 \text{ °C}$ . Tělíška byla v horké lázni ponořena po dobu 96 hodin.

**Hodnoty modulu pružnosti E** normalizovaných tělísek jsou znázorněny v příloze P1. Z daných hodnot pozorujeme, že nejvyšší průměrná hodnota modulu pružnosti E získaná z tahových tělísek, která nebyla vystavena dieselu, je u vstřikovací podmínky „E“ – kde modul má hodnotu  $E = 2680 \text{ MPa}$  a nejnižší průměrná hodnota byla získána ze vstřikovací podmínky „B“ – kde se modul  $E = 2573 \text{ MPa}$ .

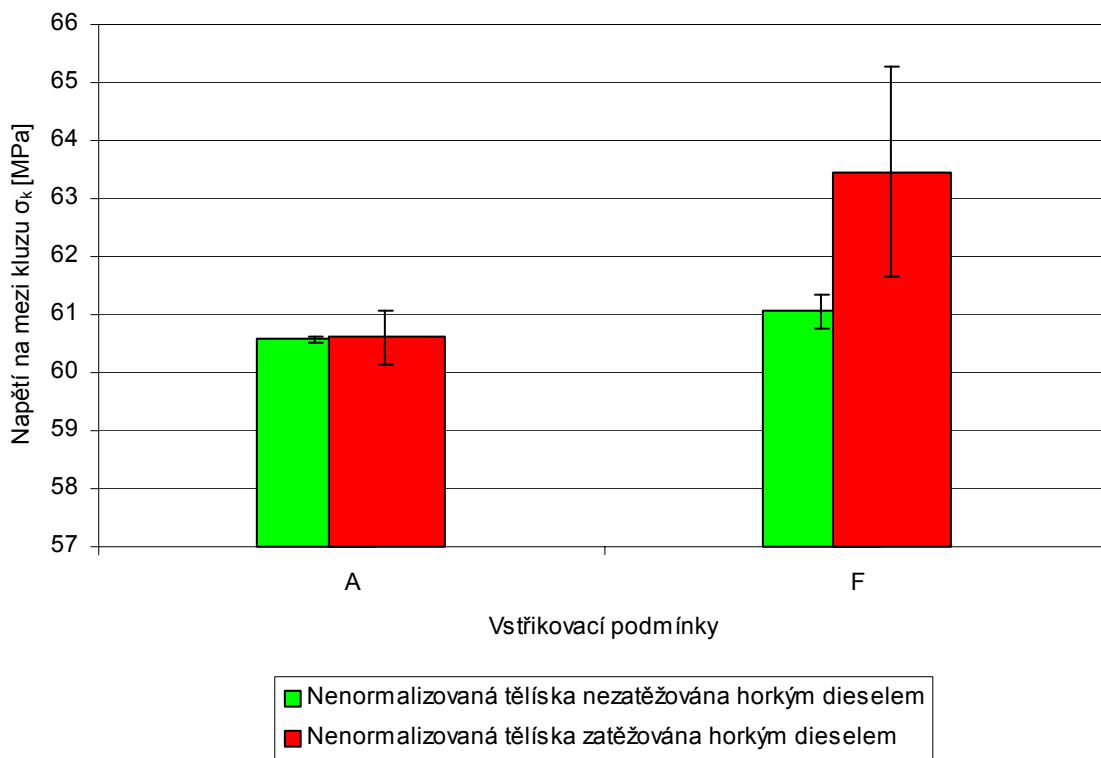
Nejvyšší průměrná hodnota modulu pružnosti E získaná z tahových tělísek, která byla vystavena dieslu, je u vstřikovací podmínky „C“ – kde modul má hodnotu  $E = 2374 \text{ MPa}$  a nejnižší průměrná hodnota byla získána ze vstřikovací podmínky „E“ – kde se modul  $E = 2210 \text{ MPa}$ .

Lze říci, že modul pružnosti E je v našem případě nižší ku hodnotám výrobce řádově o  $300 \text{ MPa}$  a v případě, že materiál byl namáhán horkým ropným produktem (diesel  $120 \text{ °C}$ ), je modul E nižší řádově o  $600 \text{ MPa}$ .

Tělíška, která byla vystavena horkému dieselu, vykazují tedy nižší tuhost – modul pružnosti. Tuto změnu můžeme také pozorovat na nenormalizovaných tělíškách.



Obr. 49. Porovnání průměrných hodnot meze kluzu  $\sigma_k$  – normalizovaná tělíska

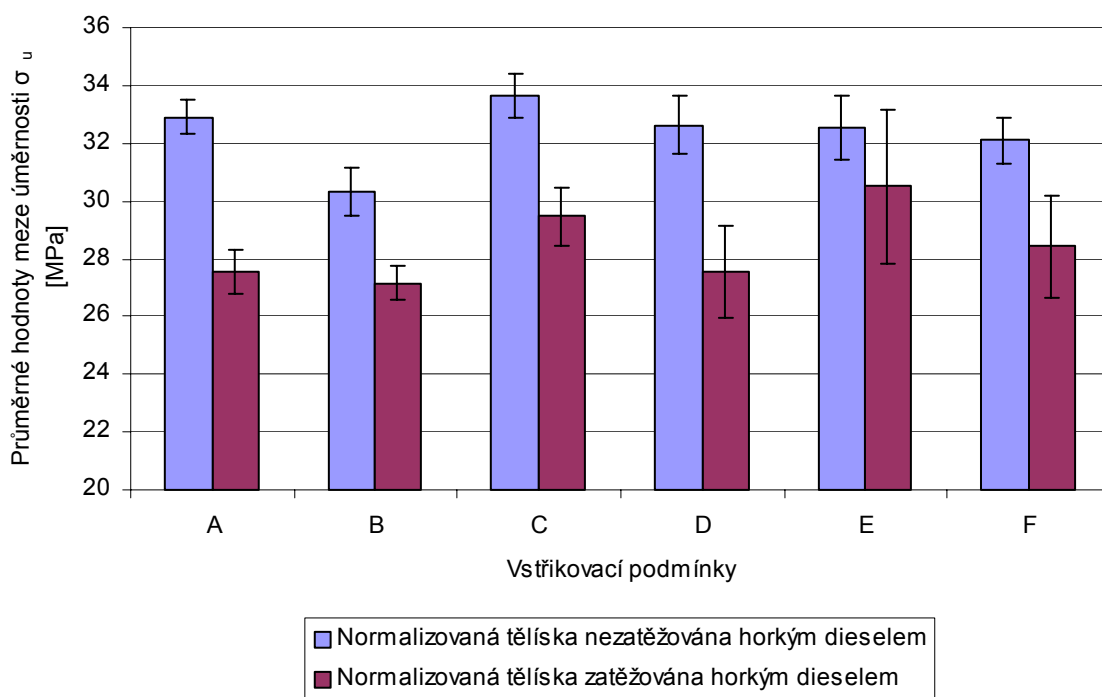


Obr. 50. Porovnání průměrných hodnot meze kluzu  $\sigma_k$  – nenormalizovaná tělíska

**Hodnotu napětí na mezi kluzu  $\sigma_k$** , kterou udává výrobce je  $\sigma_k = 64$  MPa. Naměřené hodnoty napětí na mezi kluzu normalizovaných tělísek jsou uvedeny v příloze P2. Z daných hodnot pozorujeme, že nejvyšší průměrná hodnota  $\sigma_k$  získaná z tahových tělísek, která nebyla vystavena horkému dieselu, je u vstřikovací podmínky „C“ – kde  $\sigma_k = 60$  MPa a nejnižší průměrná hodnota byla získána ze vstřikovací podmínky „B“ – kde  $\sigma_k = 57$  MPa.

Nejvyšší průměrná hodnota  $\sigma_k$  získaná z tahových tělísek, která byla vystavena horkému dieselu, je u vstřikovací podmínky „C“ – kde  $\sigma_k = 60$  MPa a nejnižší průměrná hodnota byla získána ze vstřikovací podmínky „B“ – kde  $\sigma_k = 58$  MPa.

Ze získaných hodnot lze pozorovat, že nejvyšší hodnotu pevnosti vykazují tělíska vstřikovaná za podmínky „F“, pokud byla vystavena působení horkého dieselu. Nejnižší hodnoty pevnosti, v porovnání zatěžovaných a nezatěžovaných tělísek, vykazuje vstřikovací podmínka „A“. Tuto skutečnost můžeme také pozorovat na výsledných hodnotách nenormalizovaných tělísek.

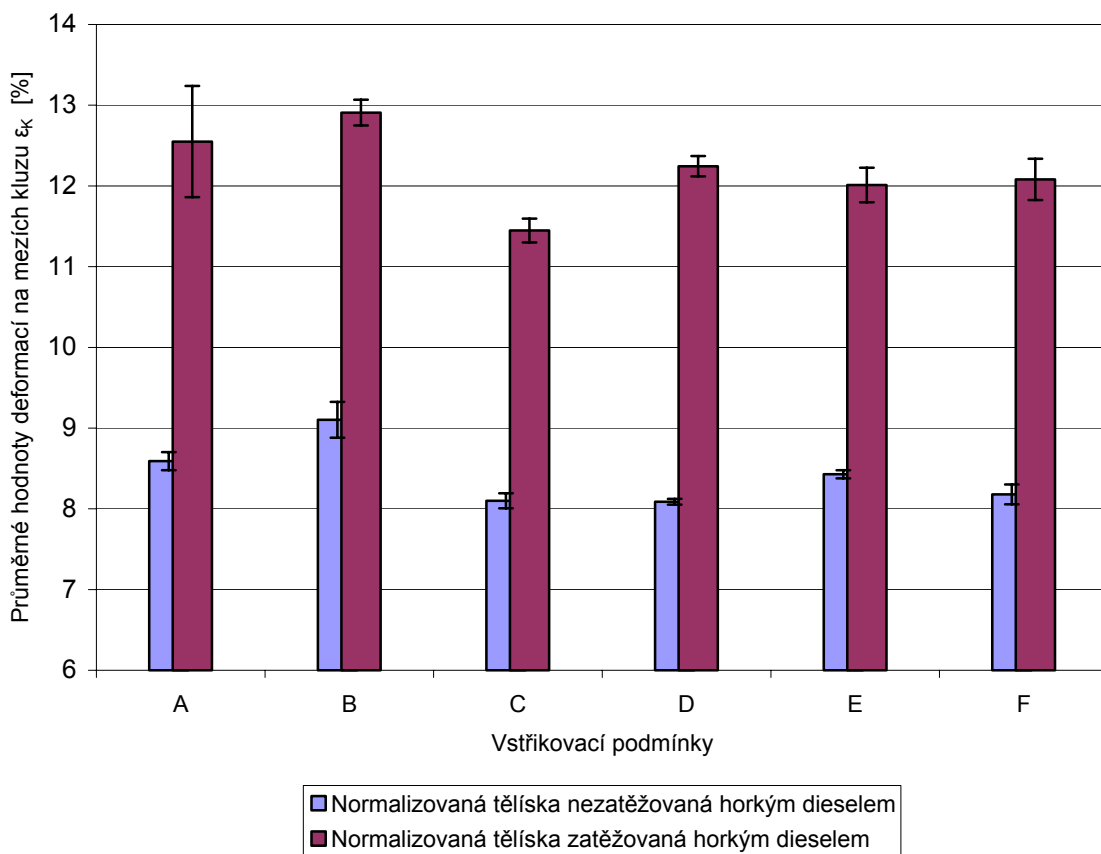


Obr. 51. Porovnání průměrných hodnot meze úměrnosti  $\sigma_u$

Naměřené **hodnoty napětí na mezi úměrnosti  $\sigma_u$**  jsou uvedeny v příloze P3. Z daných hodnot pozorujeme, že nejvyšší průměrná hodnota  $\sigma_u$  získaná z tahových normalizovaných tělísek, která nebyla vystavena horkému dieselu, je u vstřikovací

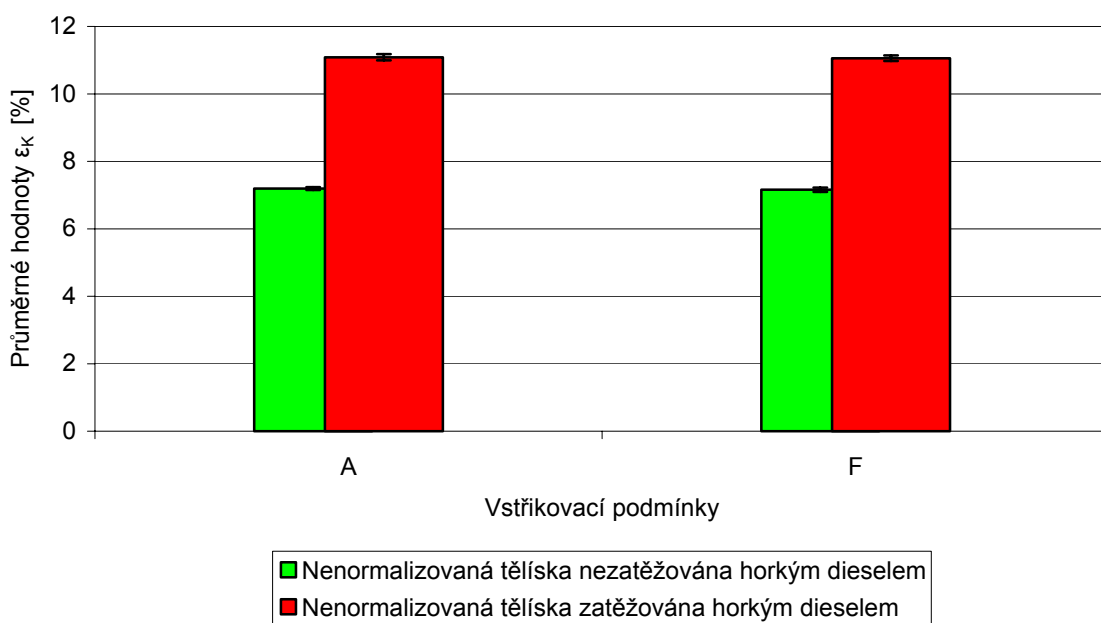
podmínky „C“ – kde  $\sigma_u = 34$  MPa a nejnižší průměrná hodnota byla získána ze vstřikovací podmínky „B“ – kde  $\sigma_u = 30$  MPa.

Nejvyšší průměrná hodnota  $\sigma_u$  získaná z tahových tělísek, která byla vystavena horkému dieselu, je u vstřikovací podmínky „E“ – kde  $\sigma_u = 31$  MPa a nejnižší průměrná hodnota byla získána ze vstřikovací podmínky „B“ – kde  $\sigma_u = 27$  MPa.



Obr. 52. Porovnání průměrných hodnot deformací na mezích kluzu  $\epsilon_K$  – normalizovaná tělíska



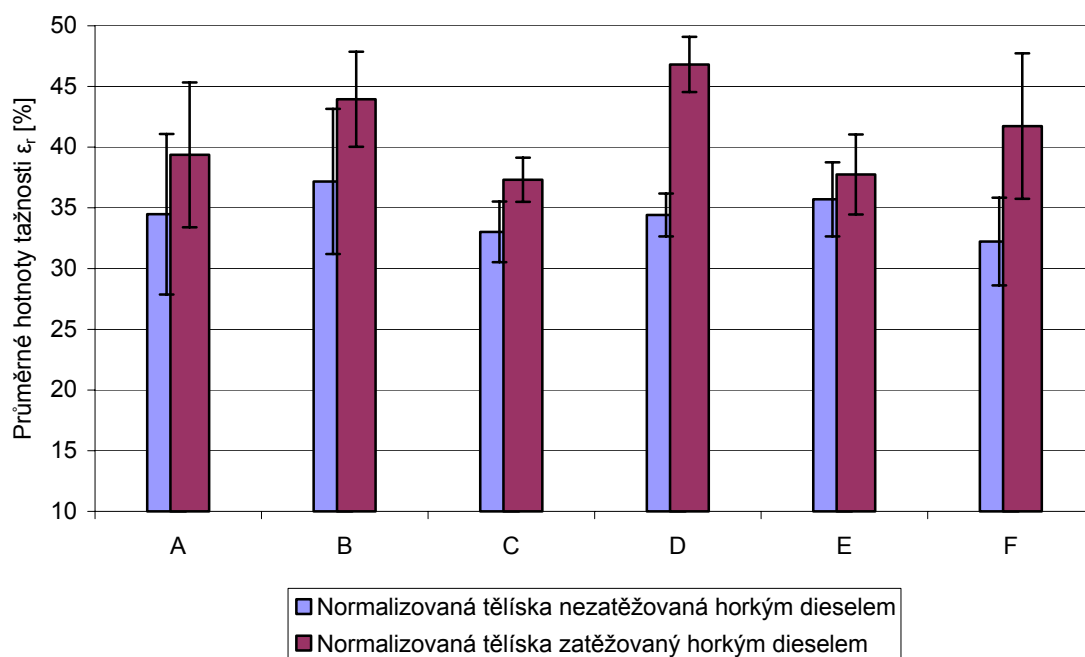


Obr. 53. Porovnání průměrných hodnot deformací na mezích kluzu  $\varepsilon_K$  – nenormalizovaná tělíska

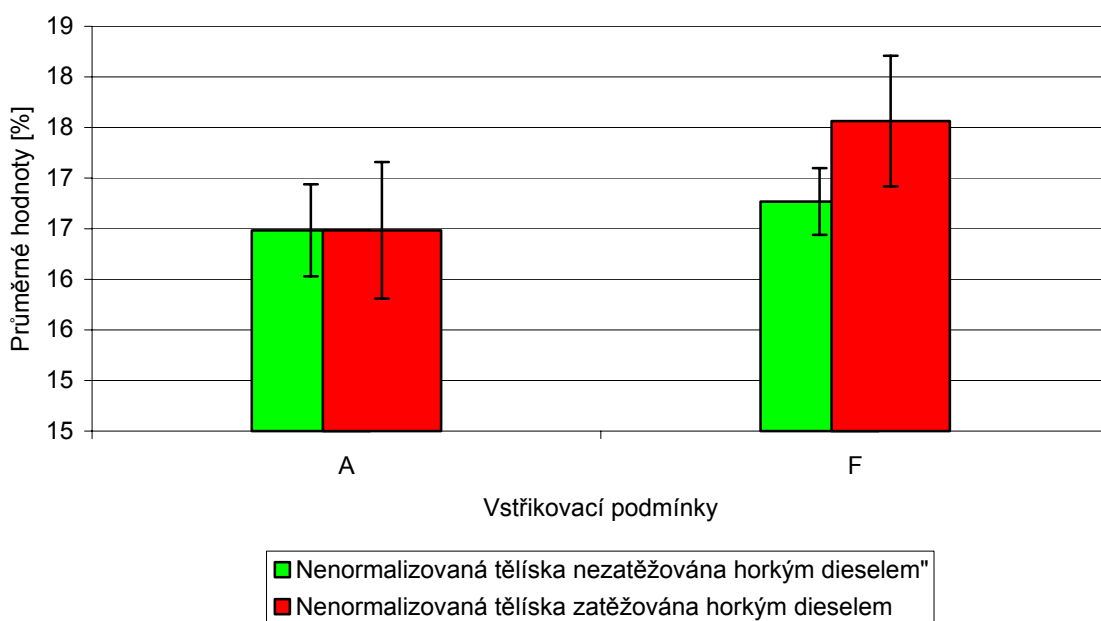
**Hodnotu deformace na mezi kluzu  $\varepsilon_K$** , kterou udává výrobce je  $\varepsilon_K = 8,5$  %. Naměřené hodnoty poměrné deformace normalizovaných tělísek jsou uvedeny v příloze P4. Z daných hodnot pozorujeme, že nejvyšší průměrná hodnota  $\varepsilon_K$  získaná z tahových tělísek, která nebyla vystavena horkému dieselu, je u vstřikovací podmínky „B“ – kde  $\varepsilon_K = 9$  % a nejnižší průměrná hodnota byla získána ze vstřikovací podmínky „D“ – kde  $\varepsilon_K = 8$  %.

Nejvyšší průměrná hodnota  $\varepsilon_K$  získaná z tahových tělísek, která byla vystavena horkému dieselu, je u vstřikovací podmínky „B“ – kde  $\varepsilon_K = 13$  % a nejnižší průměrná hodnota byla získána ze vstřikovací podmínky „C“ – kde  $\varepsilon_K = 11,5$  %.

Zvýšení deformací na mezi kluzu sledujeme jak na normalizovaných tělískách tak také na tělískách nenormalizovaných.



Obr. 54. Porovnání průměrných hodnot tažností (poměrné deformace při přetržení)  $\epsilon_r$  – normalizovaná tělíska



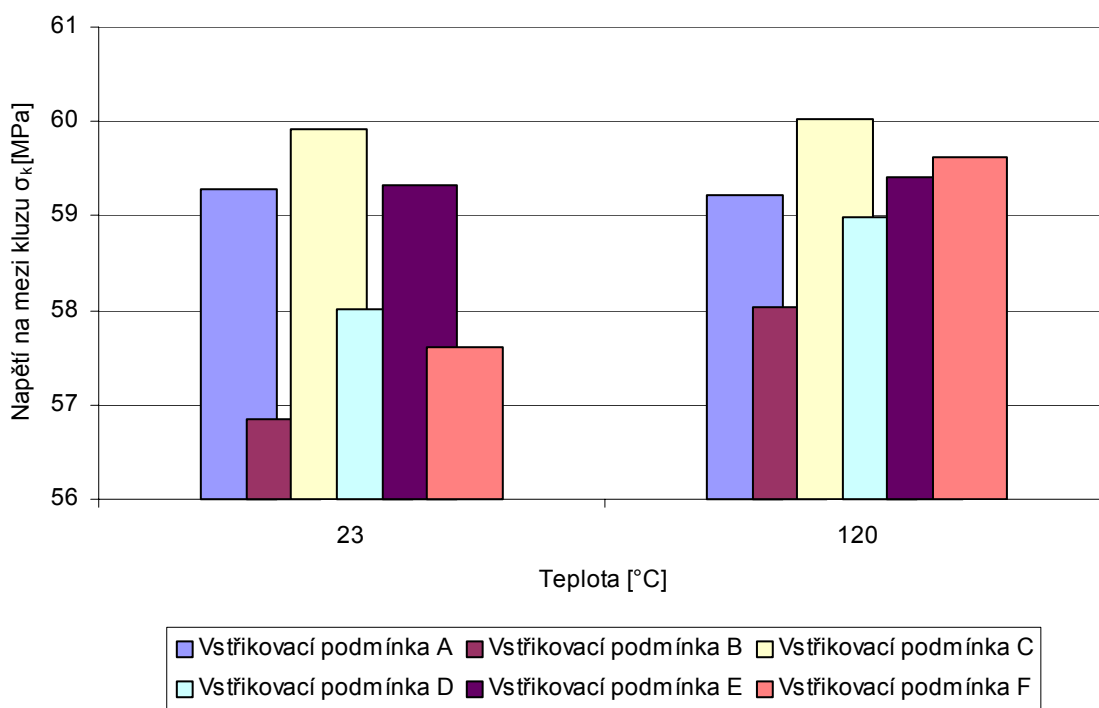
Obr. 55. Porovnání průměrných hodnot tažností (poměrné deformace při přetržení)  $\epsilon_r$  – nenormalizovaná tělíska

Naměřené **hodnoty tažností (poměrných deformací při přetržení)  $\epsilon_r$**  normalizovaných tělísek jsou uvedeny v příloze P5. Z daných hodnot pozorujeme, že nejvyšší průměrná hodnota  $\epsilon_r$  získaná z tahových tělísek, která nebyla vystavena horkému

dieselu, je u vstřikovací podmínky „B“ – kde  $\varepsilon_r = 37\%$  a nejnižší průměrná hodnota byla získána ze vstřikovací podmínky „F“ – kde  $\varepsilon_r = 32\%$ .

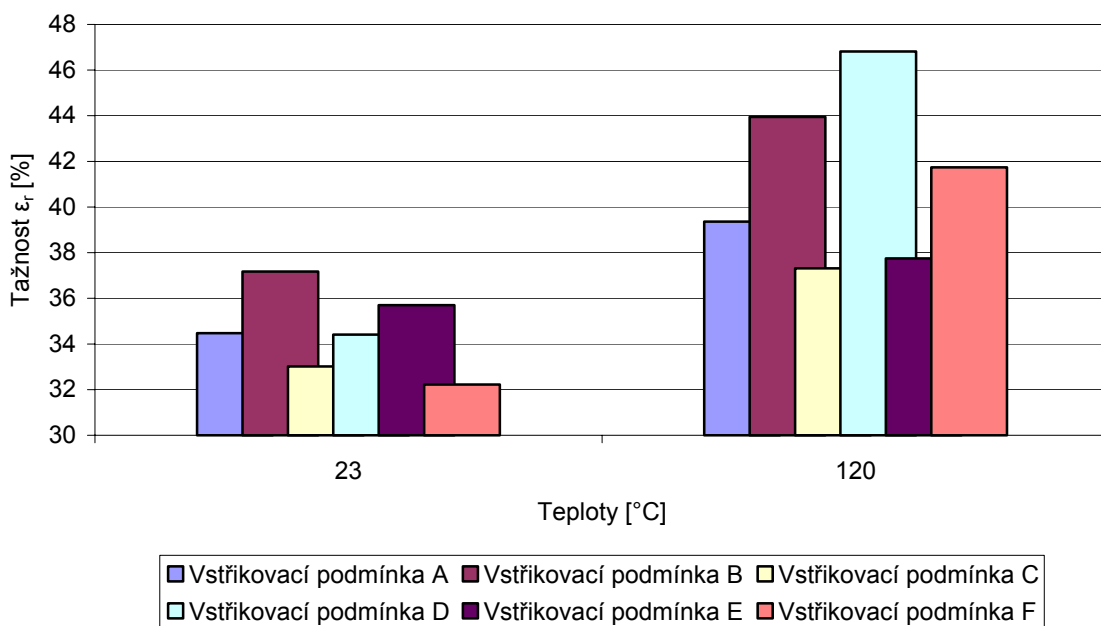
Nejvyšší průměrná hodnota  $\varepsilon_r$  získaná z tahových tělísek, která byla vystavena horkému dieselu, je u vstřikovací podmínky „D“ – kde  $\varepsilon_r = 47\%$  a nejnižší průměrná hodnota byla získána ze vstřikovací podmínky „C“ – kde  $\varepsilon_r = 37\%$ .

Hodnoty tažností jsou vždy vyšší pokud byla tělíska vystavována horkému dieselu. Pouze u nenormalizovaných tělísek vstřikovaných za podmínky „A“ pozorujeme, že hodnoty tažností jsou téměř stejné s hodnotami tažností tělísek vstřikovaných za podmínky „F“.



Obr. 56. Pevnost POM při různých vstřikovacích podmínkách v závislosti na teplotě paliva – normalizovaná tělíska

Pozorujeme-li závislost napětí na mezi kluzu na teplotě paliva lze říci, že největší změnu vykazují tělíska vstřikovaná za podmínky „B“, „D“ a „F“. Naopak velmi malá změna byla pozorována na těliscích vstřikovaných za podmínek „A“, „C“ a „E“.

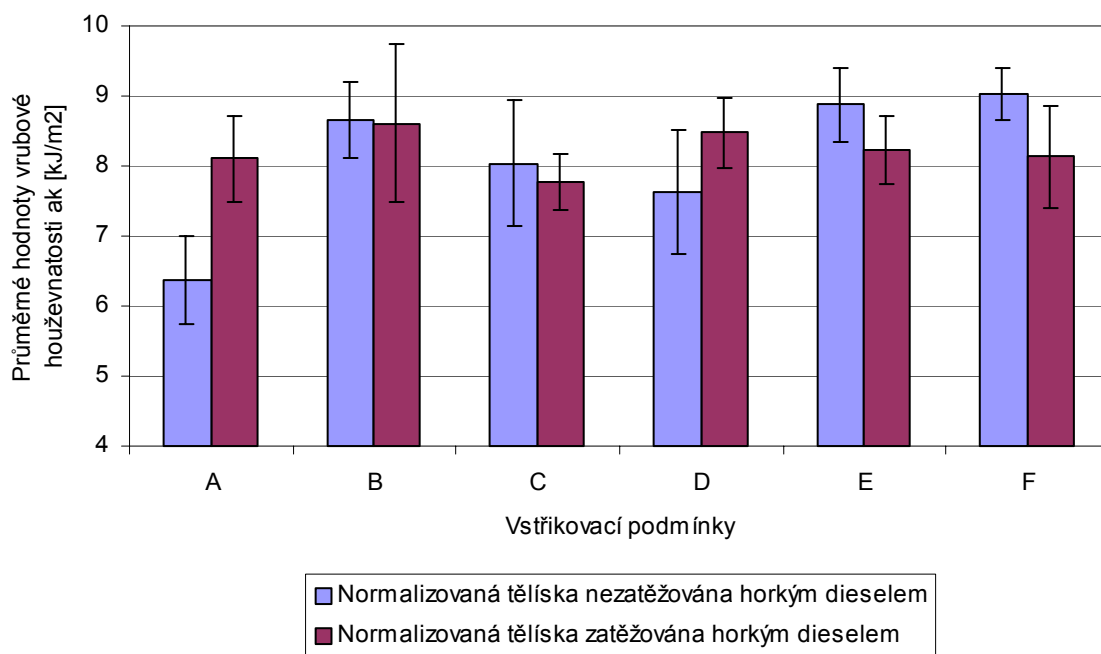


Obr. 57. Tažnost POM při různých vstřikovacích podmínkách v závislosti na teplotě paliva – normalizovaná tělíska

Změna tažností v závislosti na teplotě je velmi vysoká u všech tělísek vstřikovaných za podmínek „A“ – „F“. Největší změnu vykazují tělíska vstřikovaná za podmínek „D“ a „F“.

### 8.1.2 Vrubová houževnatost

Pomocí Charpyho kladiva a programu testXpert 9.1 byly pro normalizovaná tělíska vyhodnoceny parametry vrubové houževnatosti  $a_k$  [ $\text{kJ/m}^2$ ], deformační energie spotřebovaná na přeražení tělesa  $W(\text{TTL})$  [J]. Pro statické vyhodnocení byly uvedeny také hodnoty rychlosti při přeražení zkušební tělíska  $V(m)$  [m/s] a maximální síly  $F(m)$  [kN].



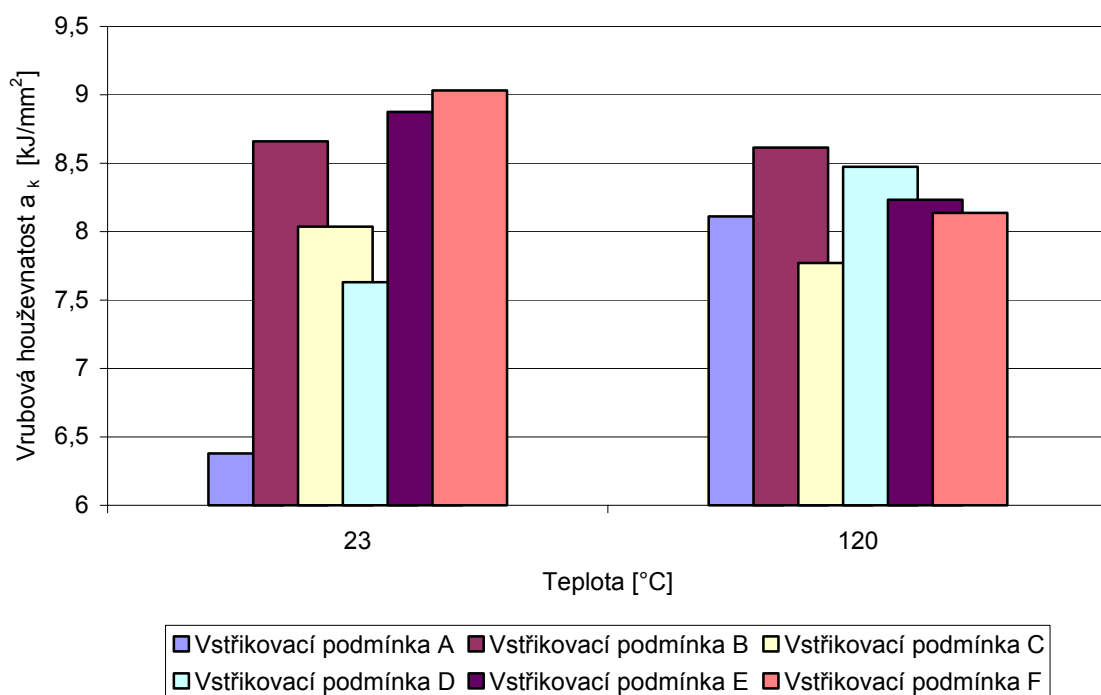
Obr. 58. Porovnání průměrných hodnot vrubové houževnatosti  $a_k$

Výrobce udává **hodnotu vrubové houževnatosti**  $a_k = 7 \text{ kJ/m}^2$ , při našem měření jsme zjistili, že hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných zkušebních tělísek jsou řádově o  $1,5 \text{ kJ/m}^2$  vyšší. Veliké rozdíly nejsou patrné ani mezi vzorky, které byly namáčeny v horké naftě, tak ani mezi vzorky, které nebyly vystaveny této podmínce.

Nejvyšší průměrnou hodnotu vrubové houževnatosti vykazují tělíska vstřikována za podmínky „F“ – kde  $a_k = 9 \text{ kJ/m}^2$ , a nejnižší průměrná hodnota byla stanovena u tělísek se vstřikovací podmínkou „A“ – kde  $a_k = 6,4 \text{ kJ/m}^2$ .

Nejvyšší průměrnou hodnotu vrubové houževnatosti tělísek vystavených horkému dieselu vykazuje vstřikovací podmínka „B“ – kde  $a_k = 8,6 \text{ kJ/m}^2$ , a nejnižší hodnotu vstřikovací podmínka „C“ – kde  $a_k = 7,8 \text{ kJ/m}^2$ .

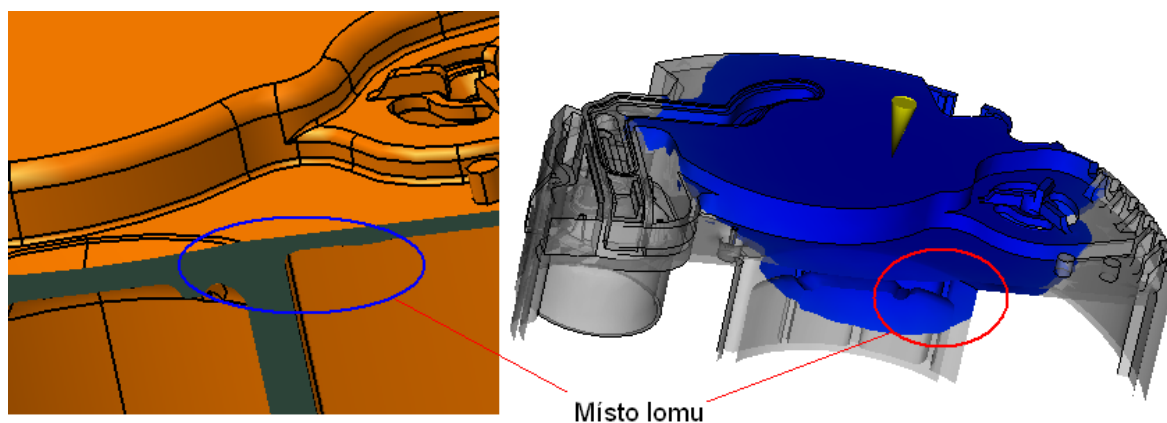
Z výsledných hodnot vrubové houževnatosti lze také vyčíst, že ve většině případů je vrubová houževnatost nižší, pokud byla tělíska zatěžována horkým dieselem. Jen v případě vstřikovací podmínky „A“ a „D“ se průměrná vrubová houževnatost zvýšila díky působení horkého paliva. Z těchto výsledků můžeme usuzovat, že tělíska vstřikovaná za podmínek „A“ a „D“ získala, díky působení horkého dieselu, větší schopnost odolávat křehkému lomu, zatímco pro ostatní vstřikovací podmínky mělo působení horkého dieselu opačný efekt. Vysokou houževnatostí usuzujeme dostatečnou pevnost, ale i schopnost deformace [20].



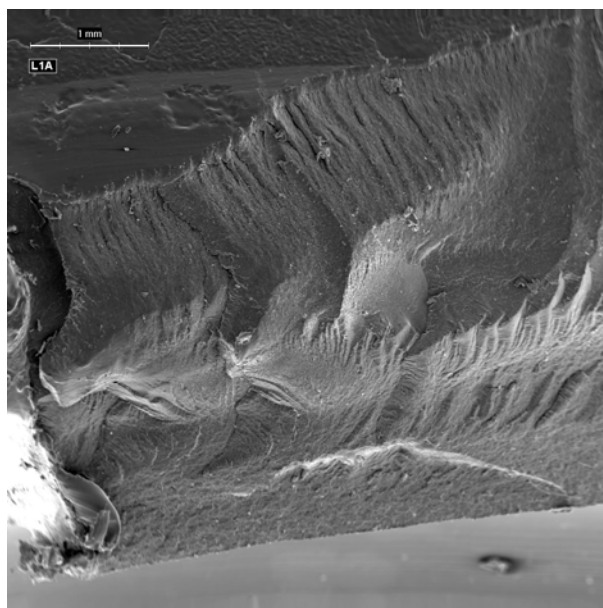
Obr. 59. Závislost vrubové houževnatosti na teplotě paliva při různých vstřikovacích podmínkách

### 8.1.3 Morfologie lomových ploch pomocí SEM, vliv konstrukce a plnění dílu Hrnc

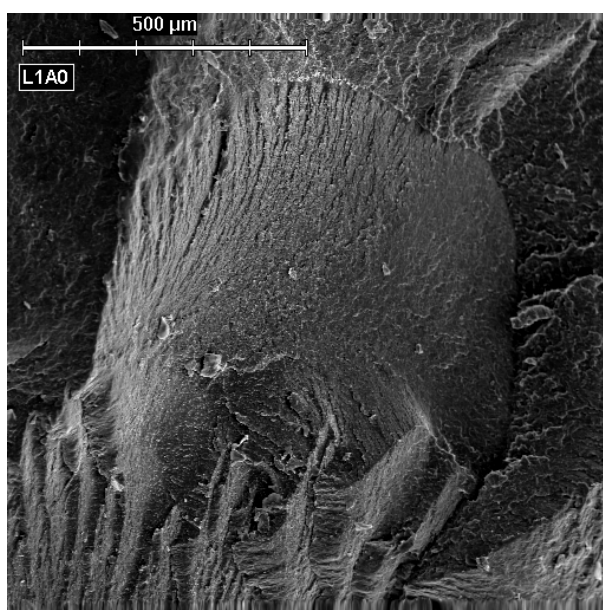
Pro každý vzorek s lomovou částí byla vybrána pouze ta místa, která vypovídala o vzniku lomu, většinou nebyly snímkovány všechny části vzorku do detailu. U snímků, které byly pořízeny, byla podrobně popsána lomová plocha a v závěru pak bylo provedeno celkové zhodnocení výstřiku.



Obr. 60. Detail místa lomu vzorku L1 a způsob plnění zkoumaného místa



Obr. 61. Lomová plocha části vzorku L1A pořízena SEM JEOL 6300

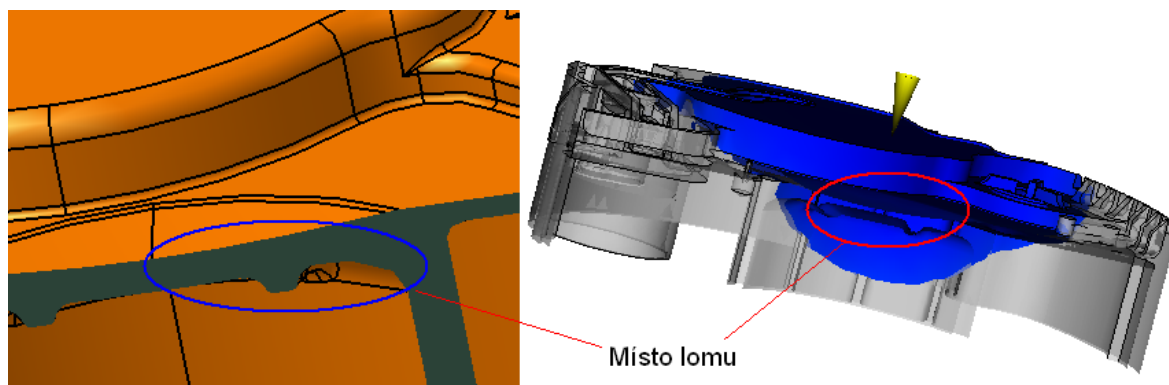


Obr. 62. Lomová plocha části vzorku L1A – detail L1A0 pořízena SEM JEOL 6300

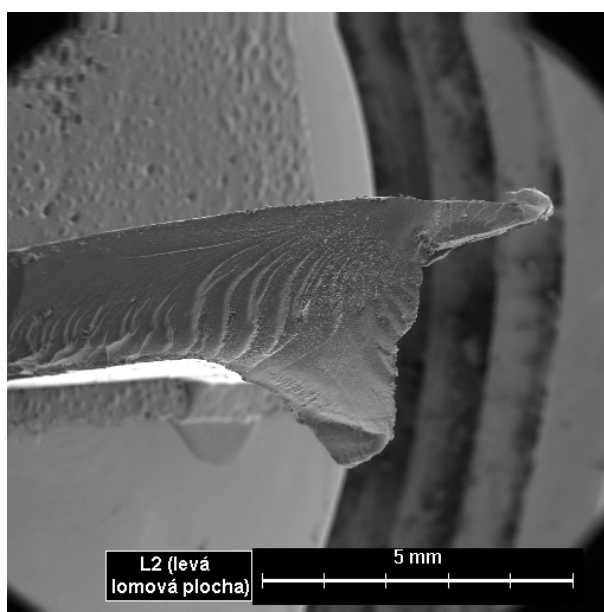
Jak je patrné z obrázku 60, tavenina v místě lomu L1A musí překonat ostrý přechod směru toku. Lze v tomto místě předpokládat vznik různých heterogenit, jako jsou např. lunkry.

U snímků z lomových částí (viz Obr.61), nelze konstatovat, že v pozorovaném místě je ohnisko vzniku lomu a jeho šíření se po celém dílu. Na detailním snímku L1A0

(viz Obr. 62) můžeme pozorovat místo, odkud se trhlina šířila, a na snímku L1A (viz Obr. 61) sledujeme její postupné šíření až k okraji vzorku.

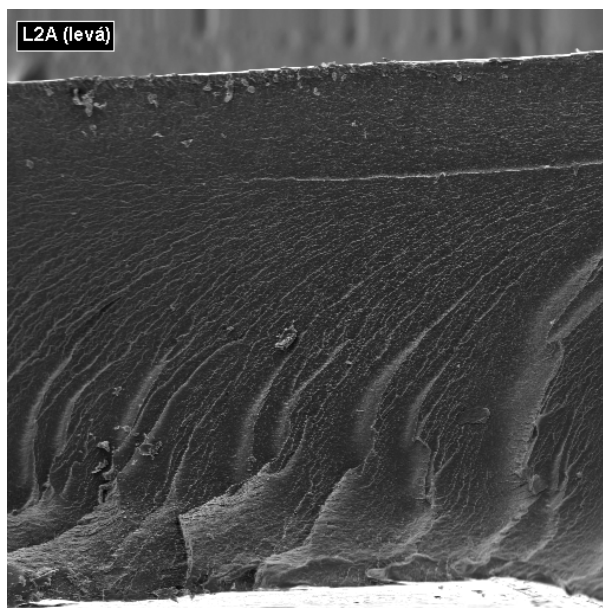


Obr. 63. Detail místa lomu vzorku L2 – levá strana a způsob plnění zkoumaného místa



Obr. 64. Lomová plocha části vzorku L2 pořízena SEM JEOL 6300

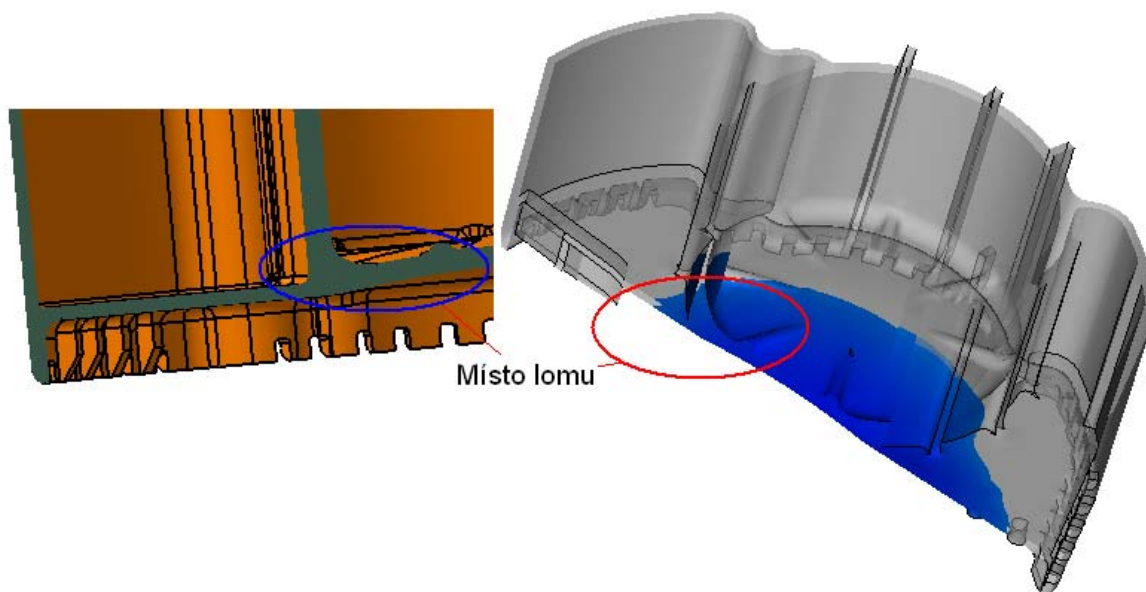




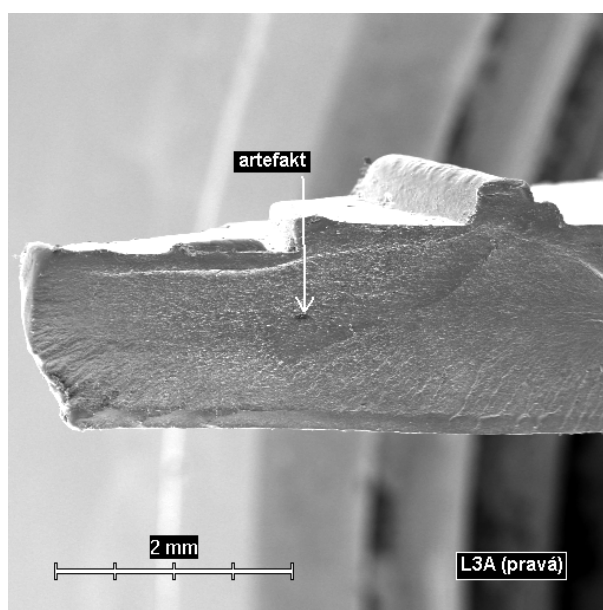
Obr. 65. Lomová plocha části vzorku L2A pořízena SEM JEOL 6300

K obrázku 63 , na kterém je vidět místo lomu a také smysl toku taveniny, můžeme říci, že z konstrukčního hlediska nelze očekávat vznik některých vnitřních vad. Tok taveniny v této části je rovnoměrný a má stejný smysl jako v místě v toku.

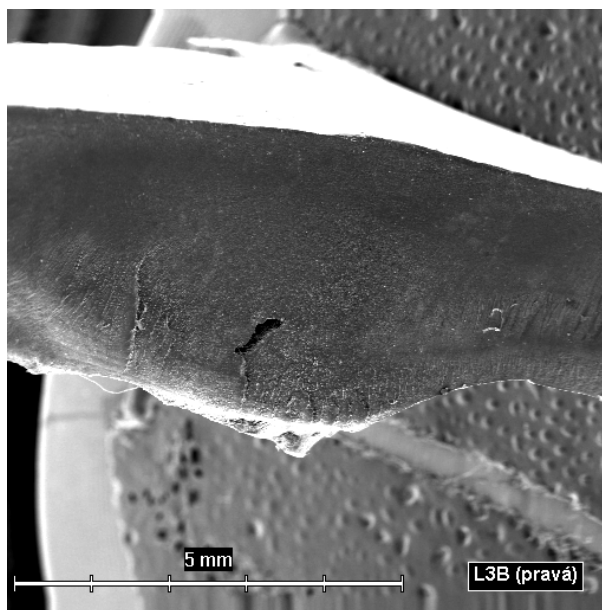
Díky snímkům pořízených SEM, můžeme konstatovat, že toto místo není iniciátorem šíření se lomu po celém dílu. Na detailním snímku L2A (viz. Obr. 64) pozorujeme v horní části přechod mezi místy, kde je menší procento krystalů („amorfní část“) a větší procento krystalů („krystalická část“). Tato přechodová vrstva nám ukazuje účinek chladnutí daného dílu. Ve spodní části snímku sledujeme místa, o kterých lze říci, že lom v této sekci byl dosti křehký.



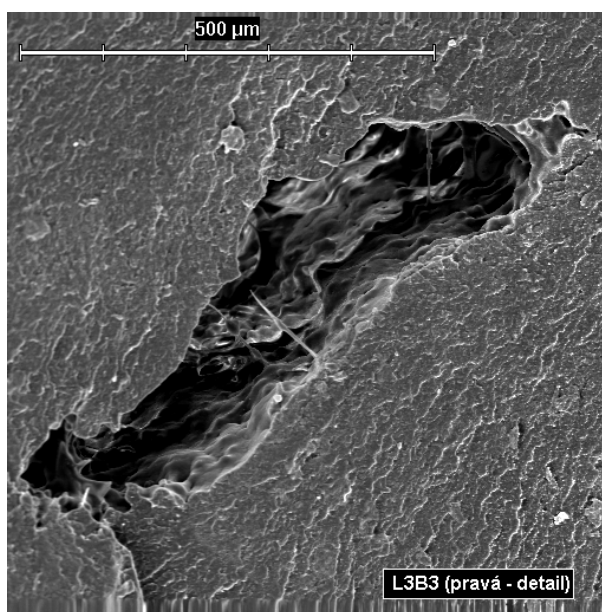
Obr. 66. Detail místa lomu vzorku L3 – pravá strana a způsob plnění zkoumaného místa



Obr. 67. Lomová plocha části vzorku L3A pořizena SEM JEOL 6300



Obr. 68. Lomová plocha části vzorku L3B pořízena SEM JEOL 6300



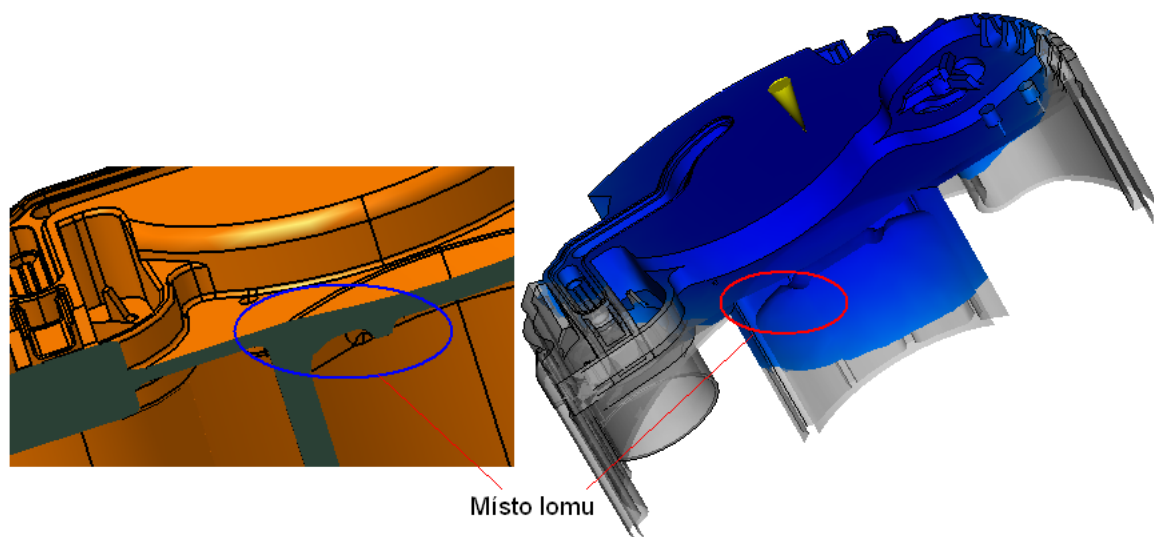
Obr. 69. Lomová plocha části vzorku L3B3 pořízena SEM JEOL 6300

Podle místa, kde byl odebrán vzorek ke sledování na SEM, a podle způsobu plnění dílu ve sledovaném místě, lze opět říci, že tavenina v tomto místě musí překonat ostrý přechod ve směru toku. Tato část vypovídá o možném vzniku vnitřních vad.

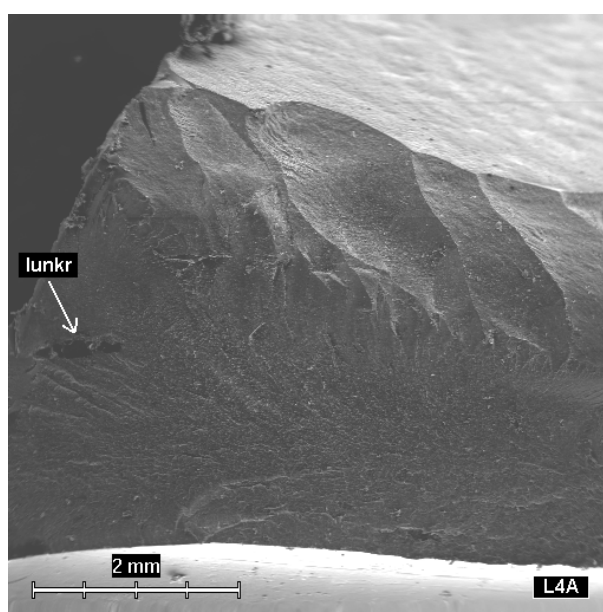
Na snímku pořízeném ze SEM (viz. Obr. 67) je vidět silná přechodová vrstva mezi amorfni a krystalickou fází. Na spodní části tohoto obrázku můžeme usuzovat na vznik křehkého lomu.

Na snímku L3B a jeho detailu L3B3 (viz. Obr. 68 a 69) sledujeme vznik lunkru. Toto bodové přepětí může být iniciátorem šíření trhliny. V tomto případě se ale tak nestalo,

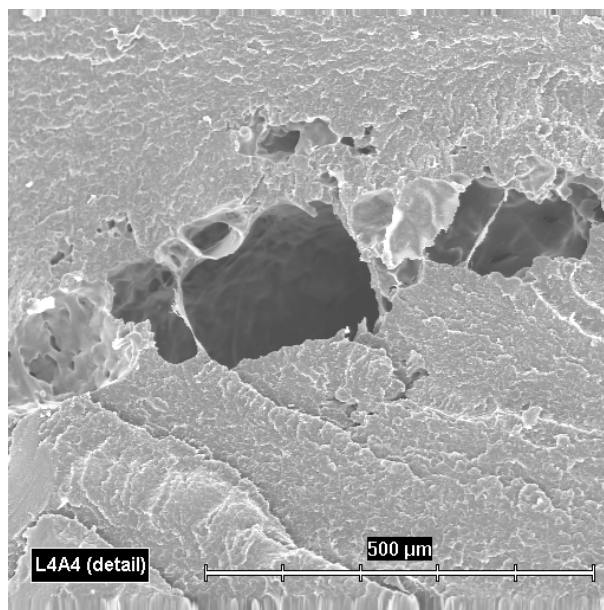
nelze tedy konstatovat, že toto místo je počátek lomu, který se šířil po celém dílci. Na snímku L3B3 (viz. Obr. 69) pozorujeme detail luntru. O vzniku různých odchlíplých míst uvnitř či na okrajích můžeme říci, že jsou důsledkem obrovských sil vznikajících při chladnutí dílu v tomto iniciátoru napětí.



Obr. 70. Detail místa lomu vzorku L4 a způsob plnění zkoumaného místa



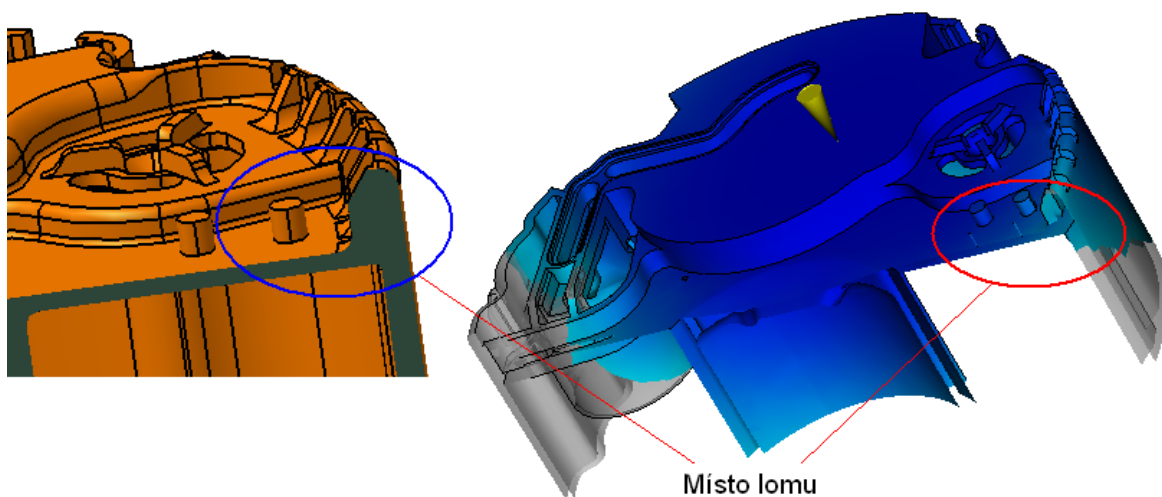
Obr. 71. Lomová plocha části vzorku L4A pořizena SEM JEOL 6300



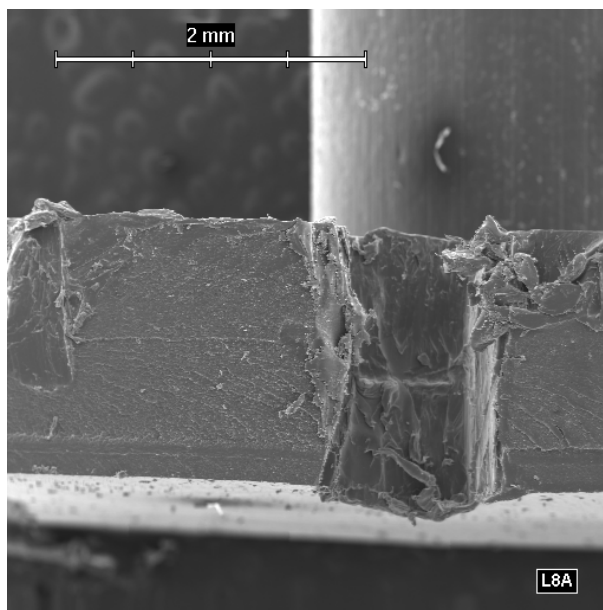
Obr. 72. Lomová plocha části vzorku L4A4 pořízena SEM JEOL 6300

O místě lomu (viz. Obr. 70) a také o smyslu toku taveniny, můžeme opět říci, že toto místo je velmi problémové z hlediska vzniku vnitřních vad.

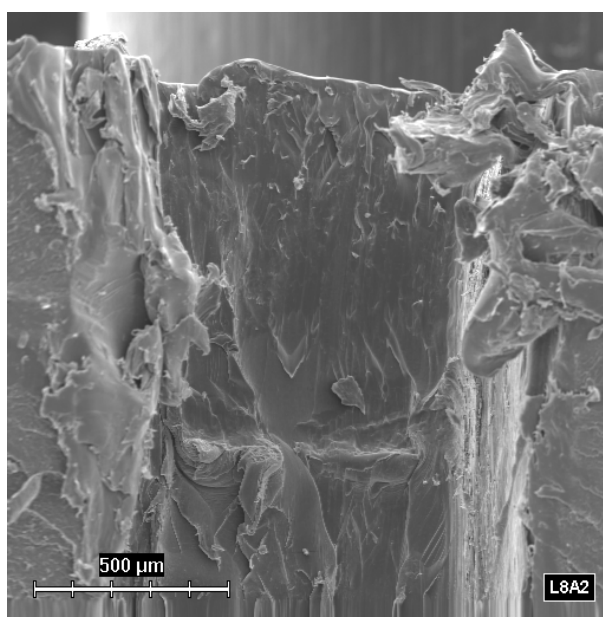
Na snímcích pořízených na elektronovém mikroskopu, můžeme pozorovat vznik lunkru, který může být iniciátorem napětí. Šíření trhliny po celém dílu z tohoto místa nelze ovšem potvrdit.



Obr. 73. Detail místa lomu vzorku L8 a způsob plnění zkoumaného místa



Obr. 74. Lomová plocha části vzorku L8A pořízena SEM JEOL 6300

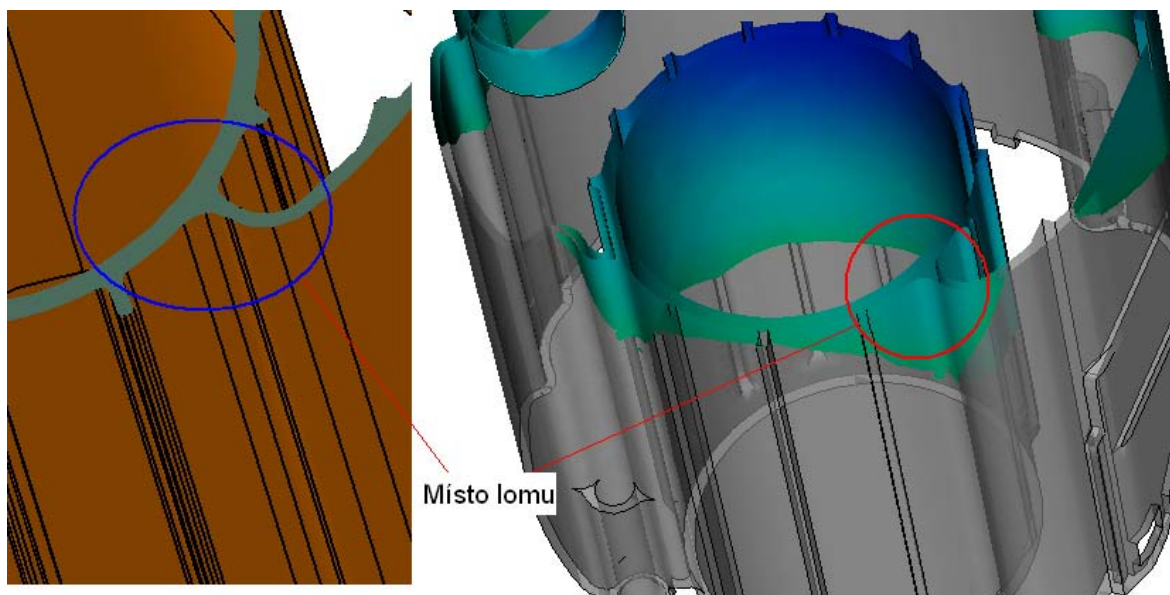


Obr. 75. Lomová plocha části vzorku L8A2 pořízena SEM JEOL 6300

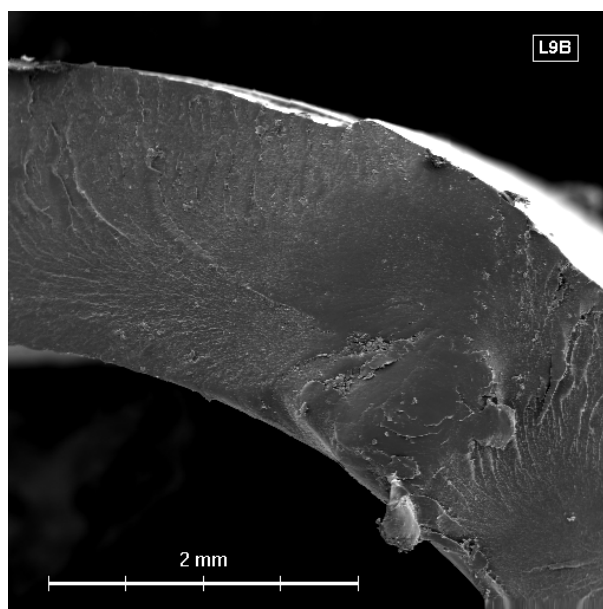
Na obrázku místa lomu (viz. Obr. 73) lze pozorovat, že jde o dosti kritické místo. Toto také potvrzuje snímek, na kterém je vidět smysl toku taveniny v této části. Tavenina zde překonává ostrý přechod ve směru toku.

Ze snímků ze SEM (viz. Obr. 74 a 75) lze provést závěry, které vypovídají o dosti kritické části lomu. Na těchto obrázcích sledujeme silné orientační efekty (pravá část snímku L8A2 viz Obr. 75) a vysokou vláknitou strukturu. Na spodní části snímku L8A2 (viz Obr. 75) pozorujeme křehkou oblast.

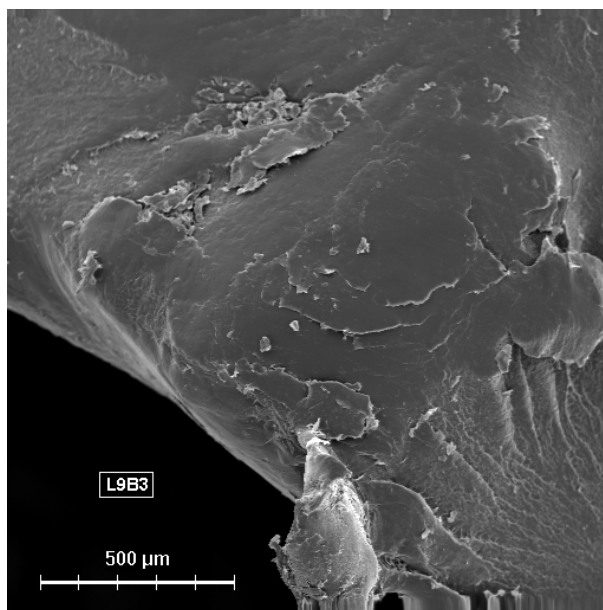
Díky těmto snímkům můžeme tvrdit, že by mohlo jít pravděpodobně o ohnisko šíření lomu po celém dílci.



Obr. 76. Detail místa lomu vzorku L9 a způsob plnění zkoumaného místa



Obr. 77. Lomová plocha části vzorku L9B pořizena SEM JEOL 6300



Obr. 78. Lomová plocha části vzorku L9B3 pořízena SEM JEOL 6300

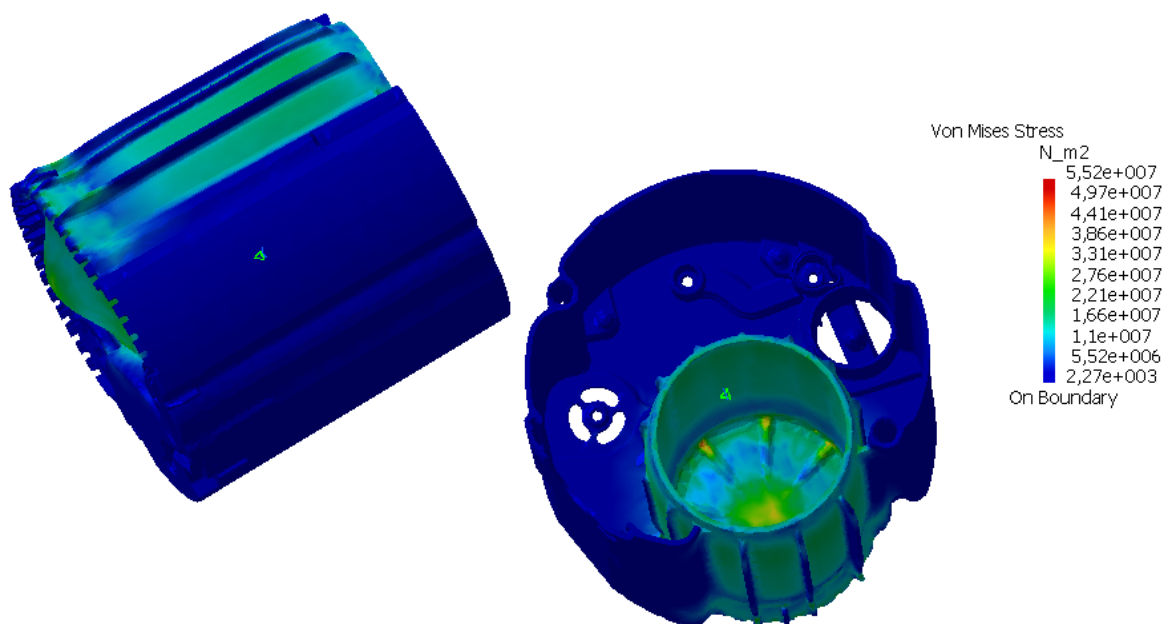
O místě lomu a způsobu toku taveniny v této sledované části můžeme říci, že nejde o tolik kritické místo, tok taveniny je rovnoměrný. Můžeme ovšem spekulovat o vzniku studených spojů v některých částech sledovaného místa.

Snímky ze SEM nám ukazují na vznik křehkého lomu a lesklém místo na detailu snímku L9B3 (viz Obr. 78) můžeme označit jako studený spoj. Toto sledované místo nebylo iniciátorem šíření lomu.

Jelikož způsob vzniku a následného šíření trhliny na sledovaném dílu nemuselo být pouze následkem vnitřní struktury, byl proto dílec Hrncel podroben také pevnostní a tokové analýze. Naším úkolem tedy také bylo pochopit, jakým jiným způsobem je daný díl namáhán.

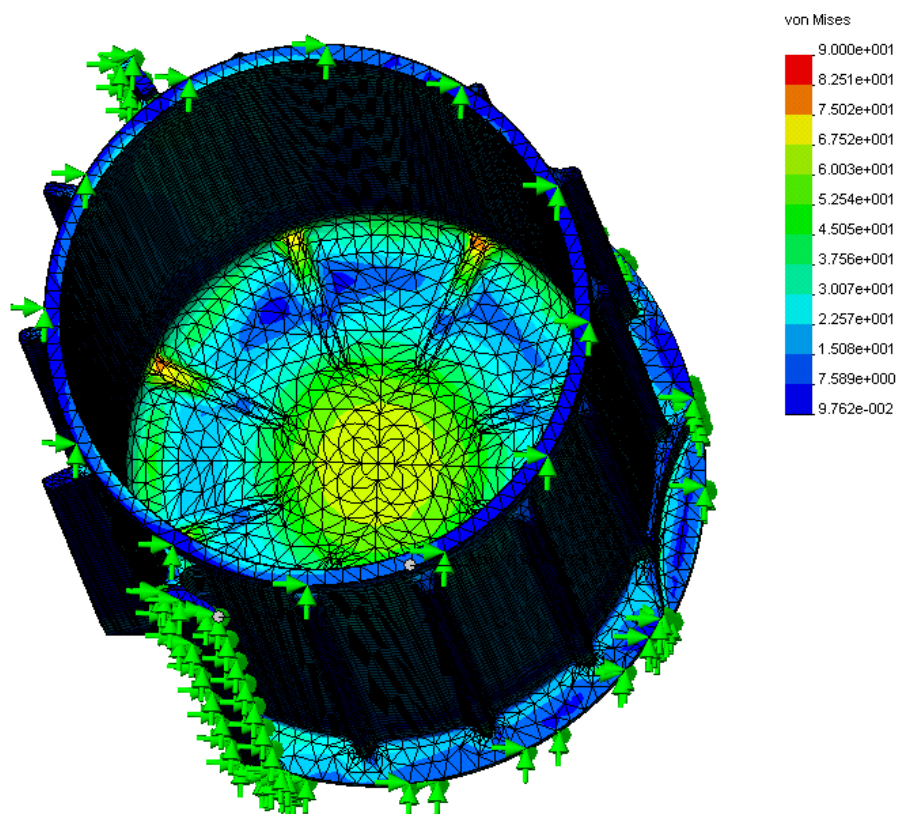
Dílec Hrncel jsme podrobili pevnostní analýze v programu Catia P3V5R15. Dále byla z dílu Hrncel vyřezána pouze část pro filtr (nejvíce namáhaná část) a podrobena pevnostní analýze v programu COSMOS Design STAR 3.0. Tento program byl vybrán pro jeho rozšířené možnosti sledování dílů z pevnostního hlediska. Program Catia P3V5R15 nám vyhodnotí pouze hodnotu Von Mises.



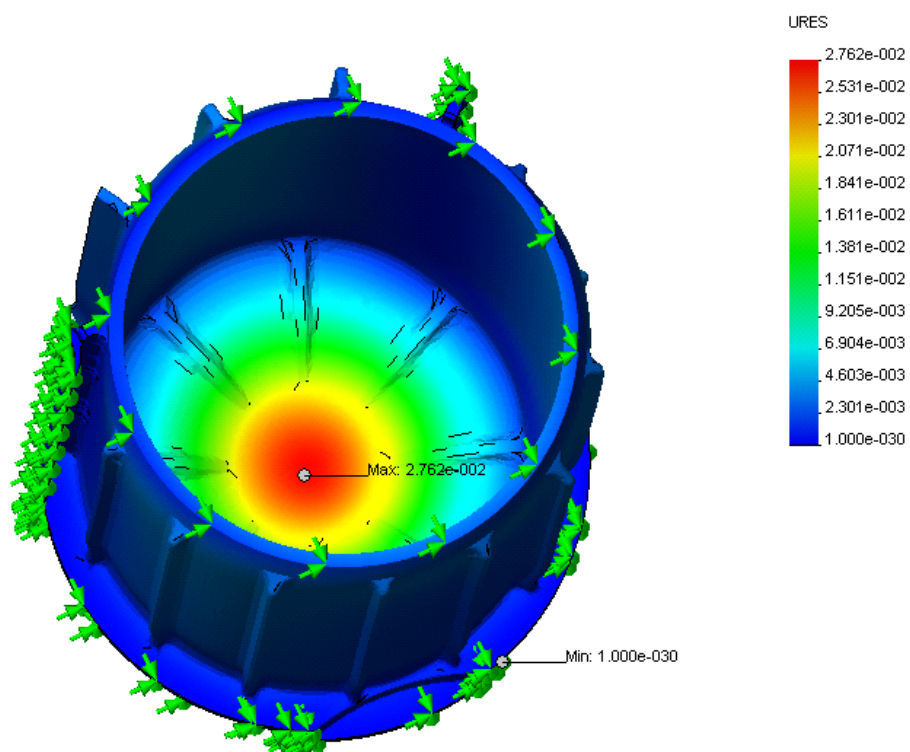


Obr. 79. Průběh napětí a způsob deformace dílu Hrncel pomocí programu Catia P3V5R15

Dutina části pro filtr byla zatížena tlakem o hodnotě 1.45 MPa, při této hodnotě došlo k destrukci tohoto dílu, vstup do této části byl pevně vetknut (simulace víčka, které je přivařeno na vrchní části místa pro filtr). Nejvyšší hodnoty Von Mises napětí byla naměřena na žebrech na dně dutiny pro filtr. Tabulková hodnota pro napětí na mezi kluzu materiálu Iupital F20-30 je  $\sigma_k = 64$  MPa. Hodnota napětí dle Von Mises byla 55,2 MPa.



Obr. 80. Průběh napětí v části pro filtr pomocí programu COSMOS Design STAR 3.0

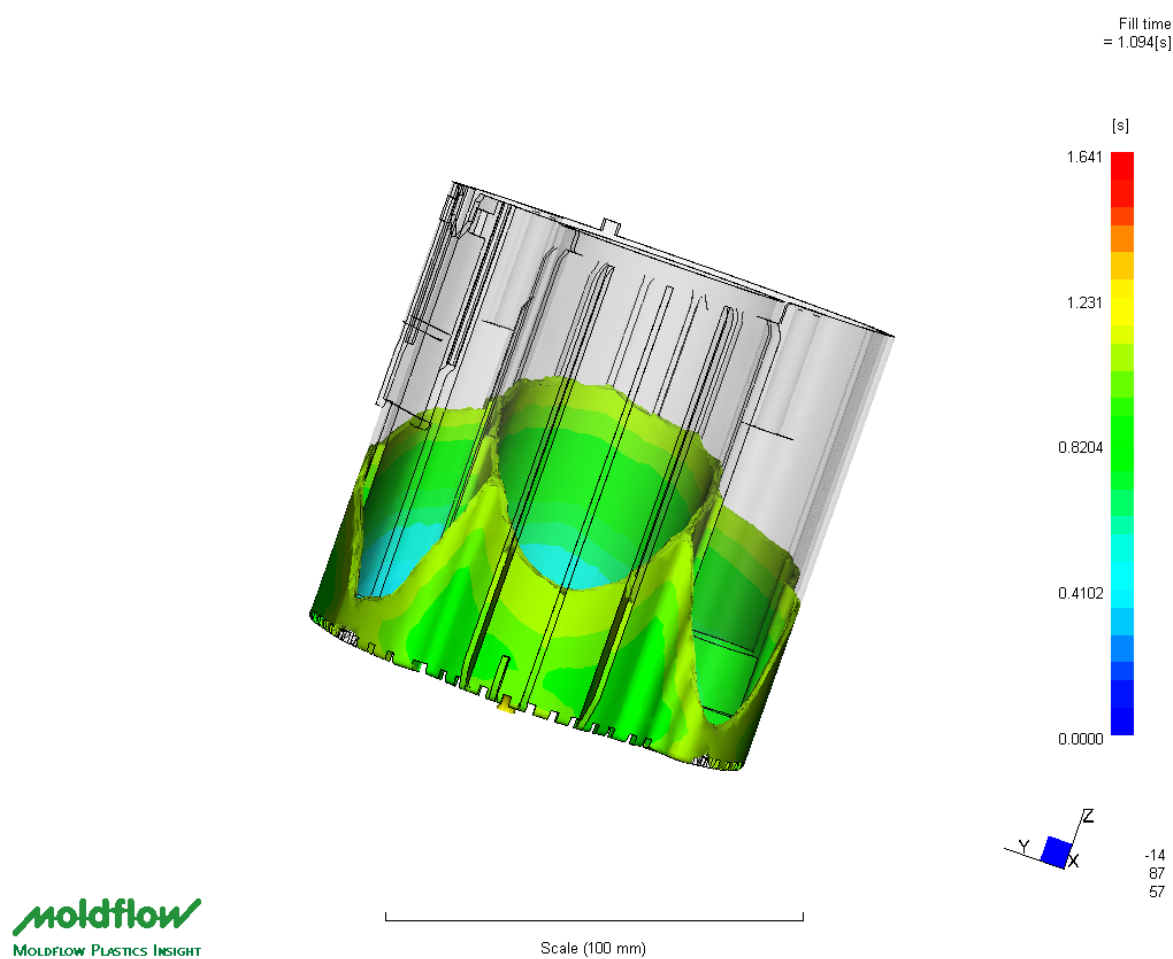


Obr. 81. Průběh deformace v části pro filtr pomocí programu COSMOS Design STAR 3.0

V případě, že jsme sledovali pouze část pro filtr v programu COSMOS Design STAR 3.0, nám vyšla hodnota napětí dle Von Mises 90 MPa a deformace (velikost posunutí) byla spočtena na 0,02762 mm.

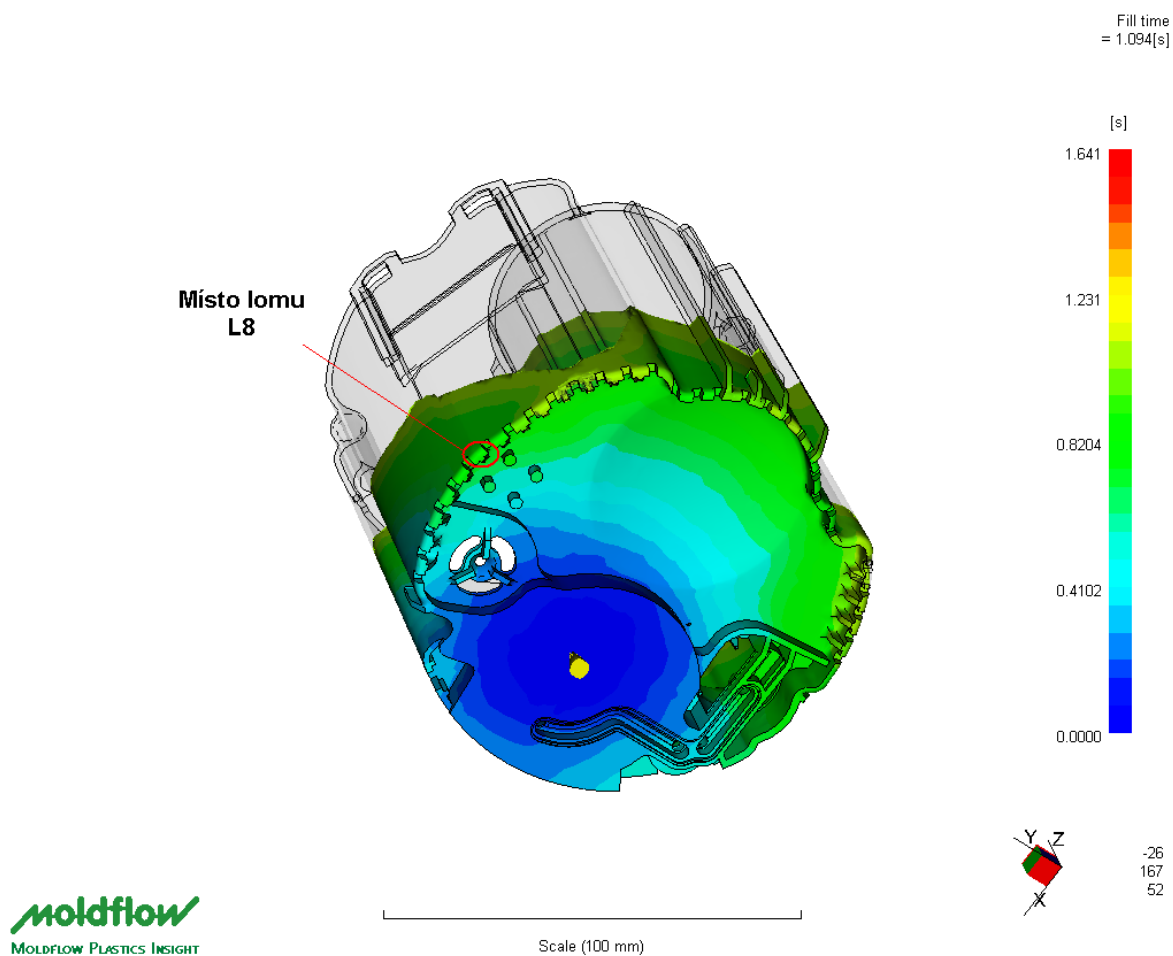
Z těchto výsledků můžeme předpokládat, že vznik praskliny může mít také za následek konstrukční řešení daného dílu.

Tokovou analýzu jsem provedli v programu Moldflow Plastic Insight 5.1. Porovnávali jsme zda na vznik praskliny a jejího šíření nemělo také vliv způsob plnění dílu Hrnc.



Obr. 82. Způsob plnění dílu Hrnc – vznik studených spojů

Na obrázku 82 pozorujeme průběh toku taveniny a místa, kde vznikají studené spoje. Podle vzniku a šíření trhliny na tomto dílu nemůžeme potvrdit, že způsob toku taveniny by měl vliv na vzniklou vadu.

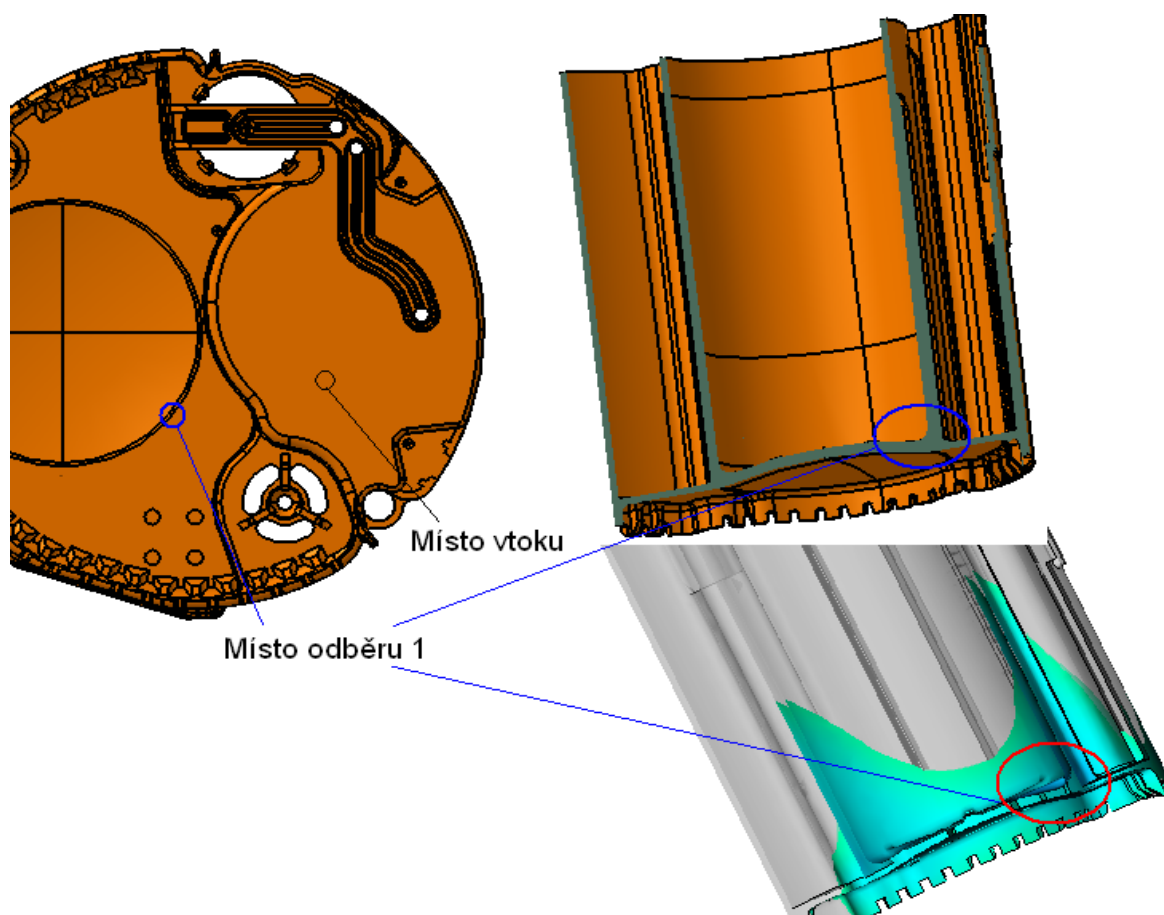


Obr. 83. Kritické místo L8 dle SEM – tok taveniny v místě L8

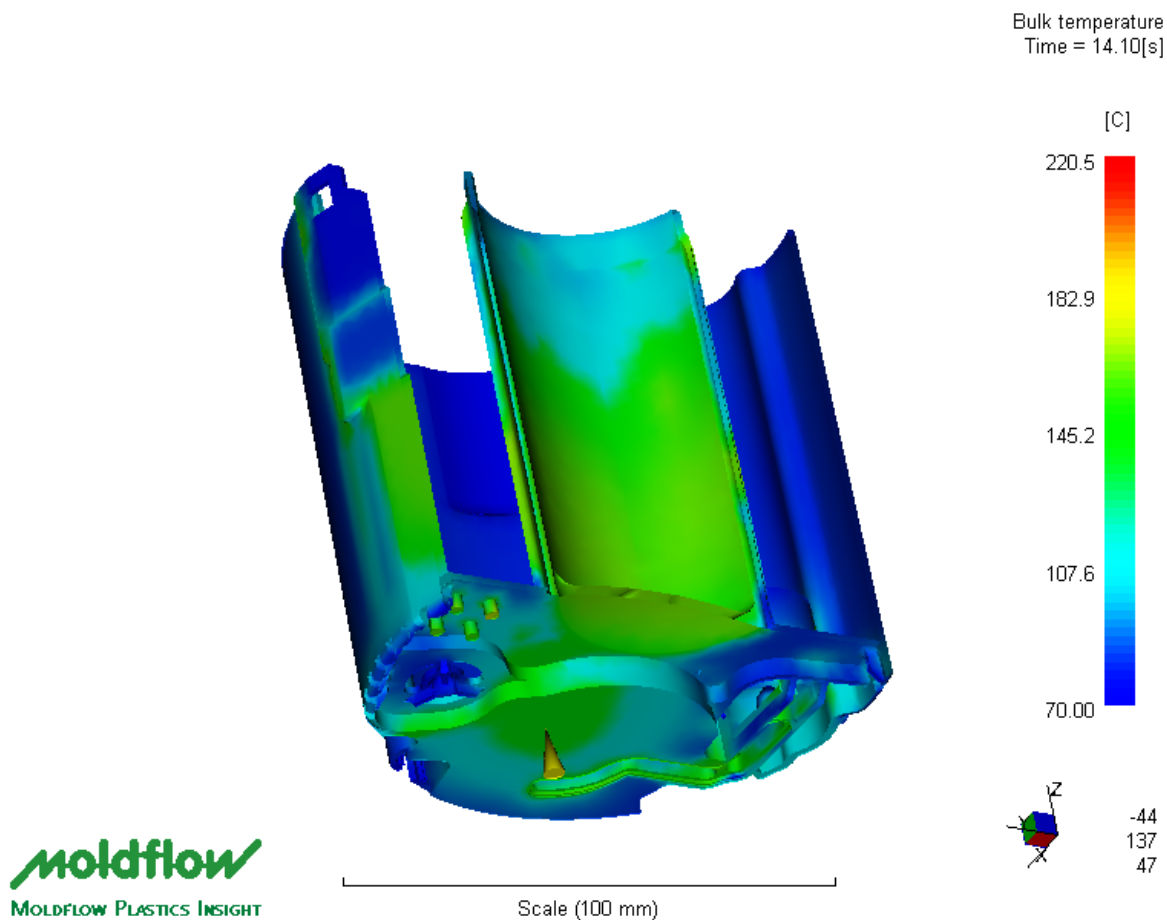
Pomocí snímků získaných ze SEM jsme vybrali jako nejkritičtější část, místo L8. Ze způsobu toku taveniny ale nemůžeme potvrdit, že na vznik trhliny v této části mělo vliv také plnění dílu. Studený spoj vzniká daleko od této kritické části.

#### 8.1.4 Vliv konstrukčního řešení na vady výrobku - mikrotomové řezy

Pro porovnání snímků z mikrotomových řezů s moldflow analýzou vybíráme každé sledované místo zvlášť a hodnotíme vliv toku taveniny na případné vzniklé vady.

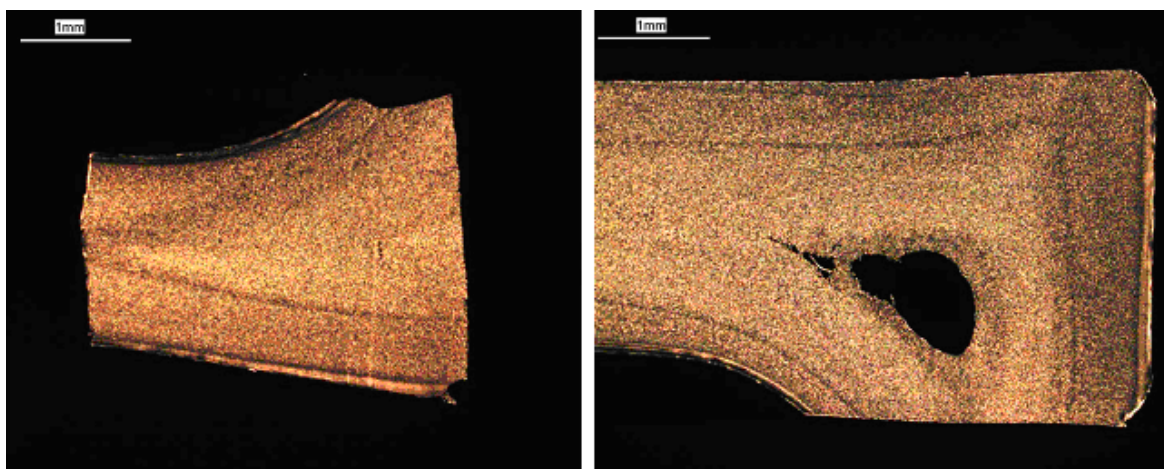


Obr. 84. Místo odběru vzorku 1 z nádoby palivového modulu a způsob toku taveniny

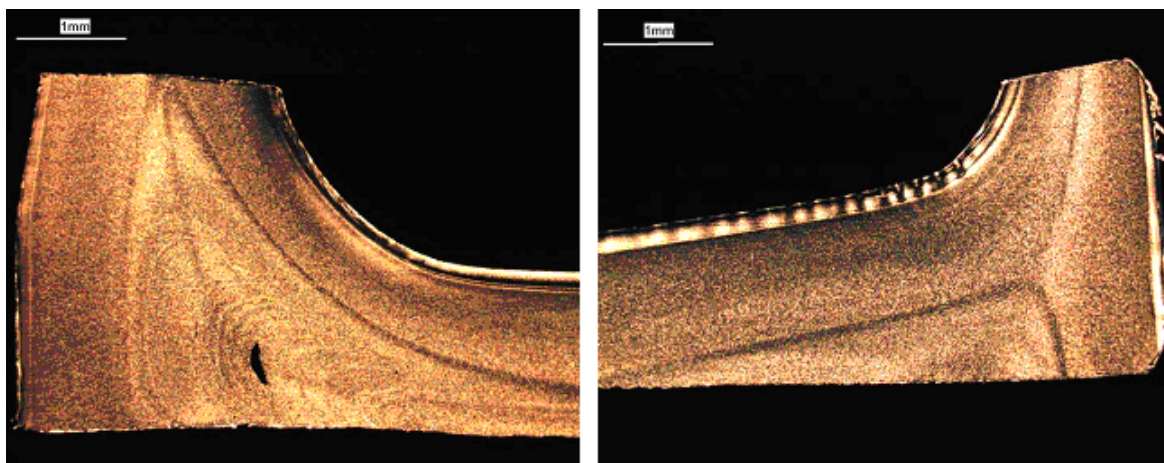


Obr. 85. Chladnutí místa pro filtr v čase 14 s

Ze způsobu chladnutí můžeme říci, že v důsledku rozdílných teplot na stěně dílu Hrnc a stěnách místa pro filtr mohou vznikat velká zbytková napětí. Tato zbytková napětí mohou být iniciátorem vzniklých vad.

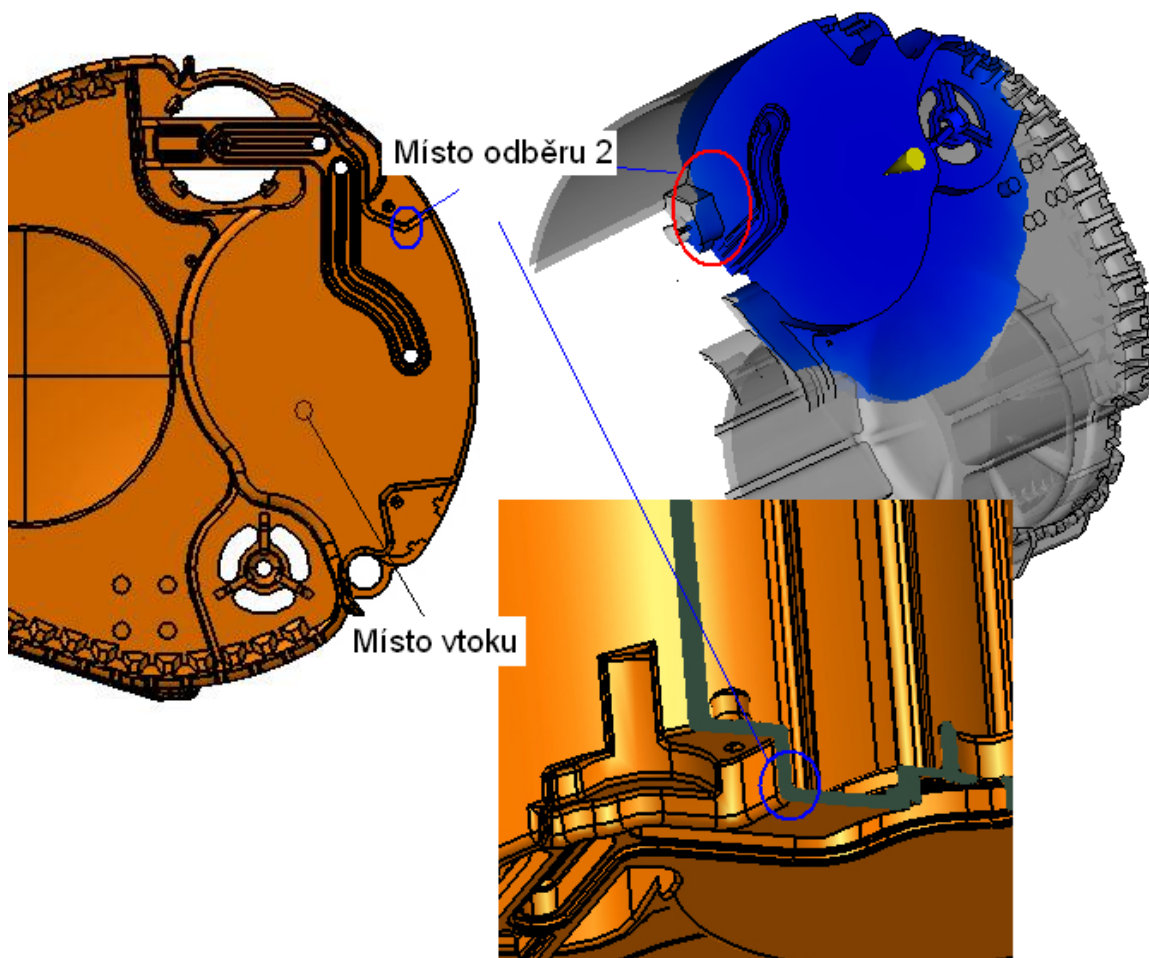


Obr. 86. Mikrotomové řezy z místa 1, vzorky vstříkovány za podmínky A – vzorek na snímku vpravo byl vystaven horkému dieslu

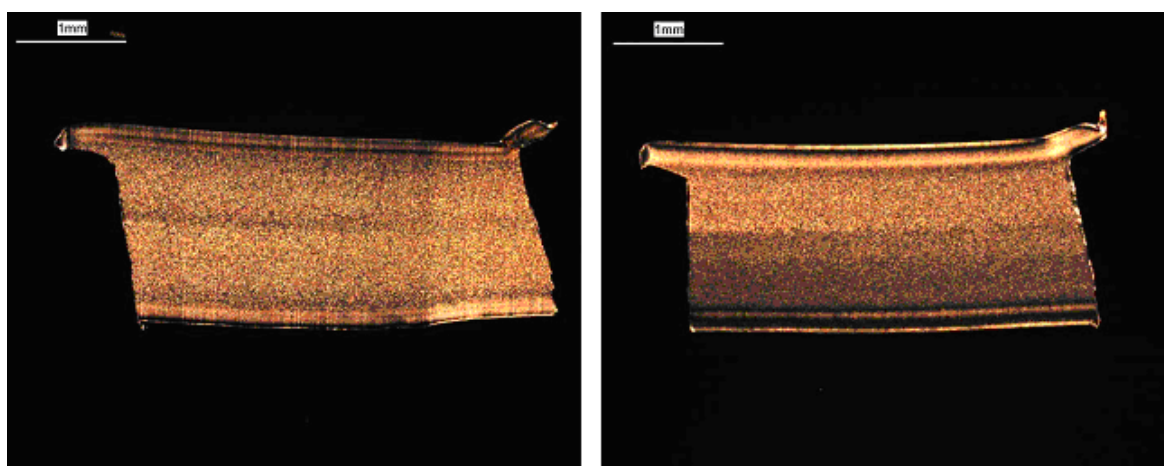


Obr. 87. Mikrotomové řezy z místa 1, vzorky vstříkované za podmínky F – vzorek na snímku vpravo byl vystaven horkému dieslu

Místo 1 bylo vybráno z důvodu možnosti vzniku lunkrů a viditelných tokových linií. Snímky z mikrotomových řezů z daného místa to potvrdily. Při porovnávání snímků vzorků vstříkovaných za podmínek A a F lze konstatovat, že v obou případech jsou viditelné silné tokové linie, ovšem u vstříkovací podmínky F jsou výraznější. Lunkry objevující se jak na vzorku vstříkovaném za podmínky A, tak i podmínky F jsou následkem přechodu taveniny z jednoho směru do druhého (ostrý přechod) a jsou také způsobeny tím, že tloušťka stěny v jedné části dílu je menší než tloušťka stěny v druhé části. Účinek paliva na vzniku lunkru nemůžeme potvrdit, protože lunkr se objevuje jak na dílu namáhaném horkým dieselem tak i na dílu, který nebyl namáhán. V případě vstříkovací podmínky A je lunkr viditelný na vzorku, který byl vystaven horkému dieselu a v případě vstříkovací podmínky F se objevuje na vzorku, který horkému dieselu nebyl vystaven.



Obr. 88. Místo odběru vzorku 2 z nádoby palivového modulu a způsob toku taveniny

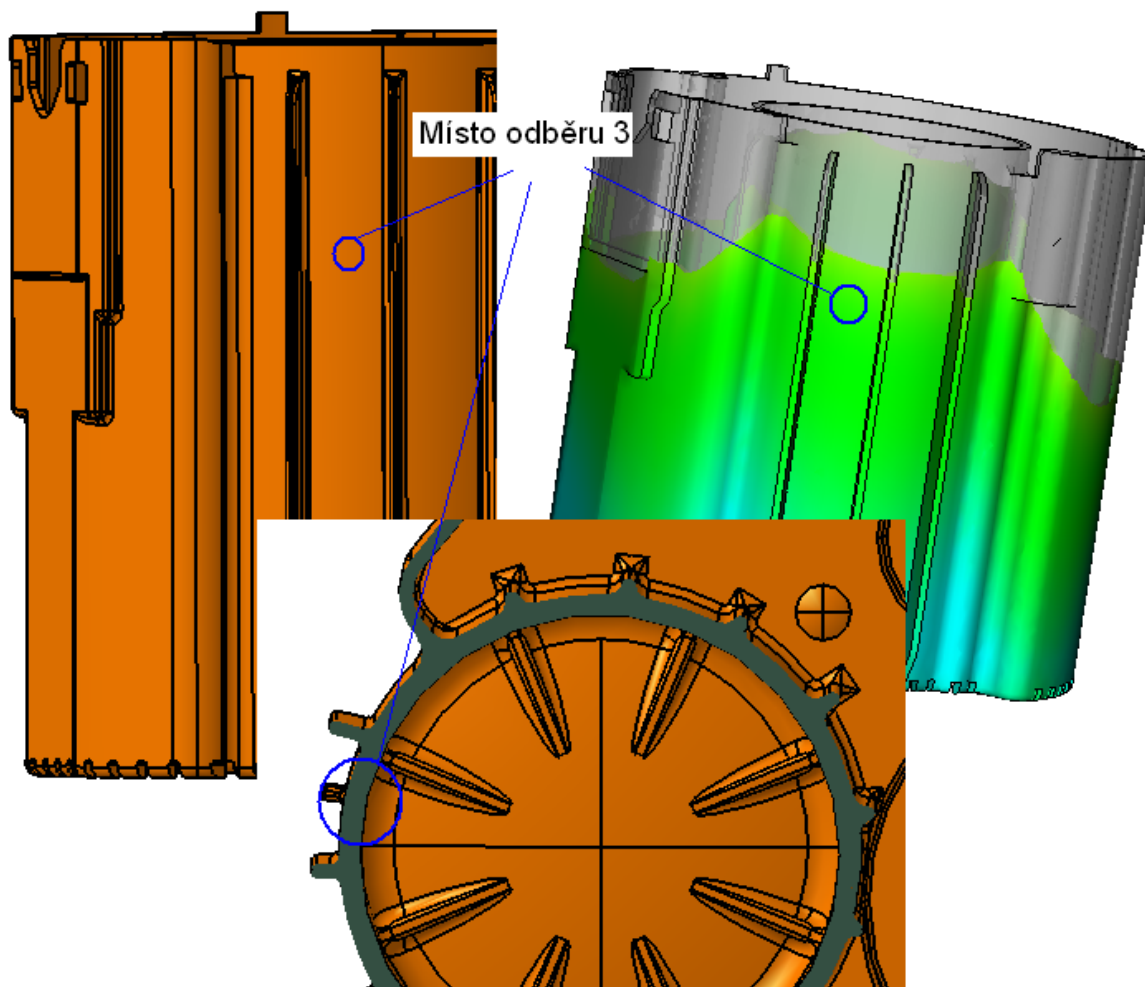


Obr. 89. Mikrotomové řezy z místa 2, vzorky vstříkovány za podmínky A a F – vzorek na snímku vpravo byl vstříkován za podmínky F

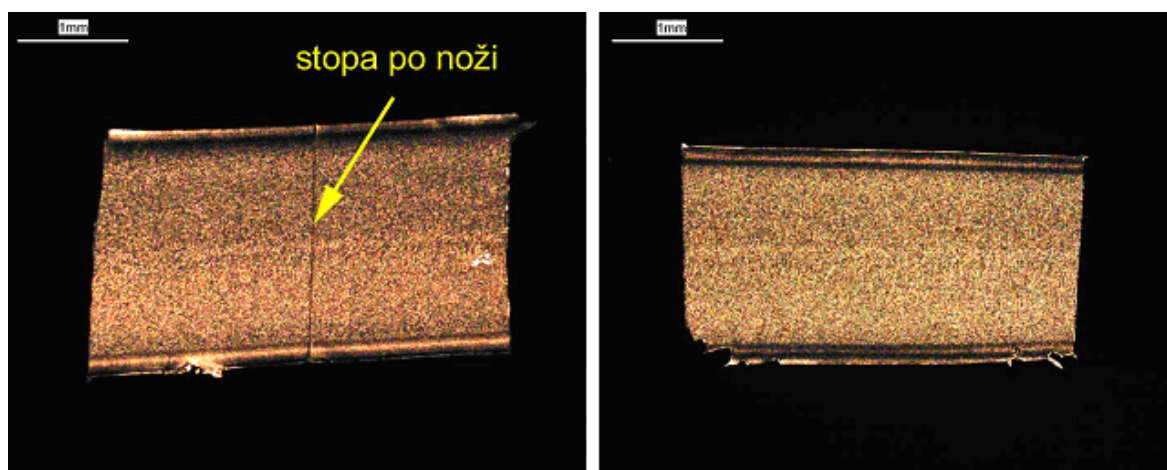
Vzorky odebrané z místa 2 byly také vstříkovány za podmínek A a F, ale nebyly vystavovány horkému dieselu. Náš předpoklad byl, že v těchto místech nalezneme jako v případě vzorku odebíraného z místa 1 nějakou vnitřní vadu. V tomto případě se tak



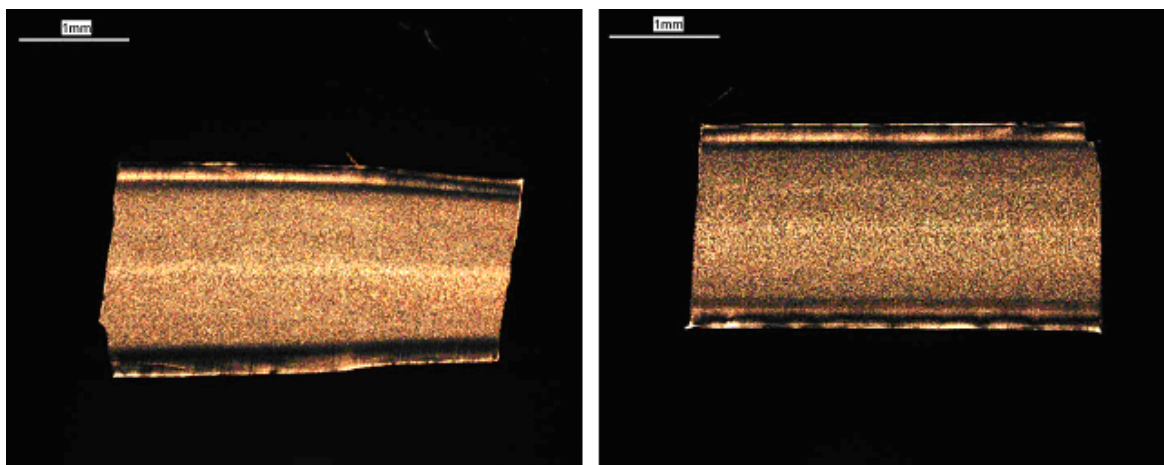
nestalo a na snímcích z mikrotomových řezů nelze pozorovat vznik lunkrů nebo silné tokové linie. Z konstrukčního hlediska lze říci, že vzorek odebraný z tohoto místa nemusí být nijak problémový, tloušťky stěn jsou ve všech směrech, kudy teče tavenina, stejné.



Obr. 90. Místo odběru vzorku 3 z nádoby palivového modulu a způsob toku taveniny

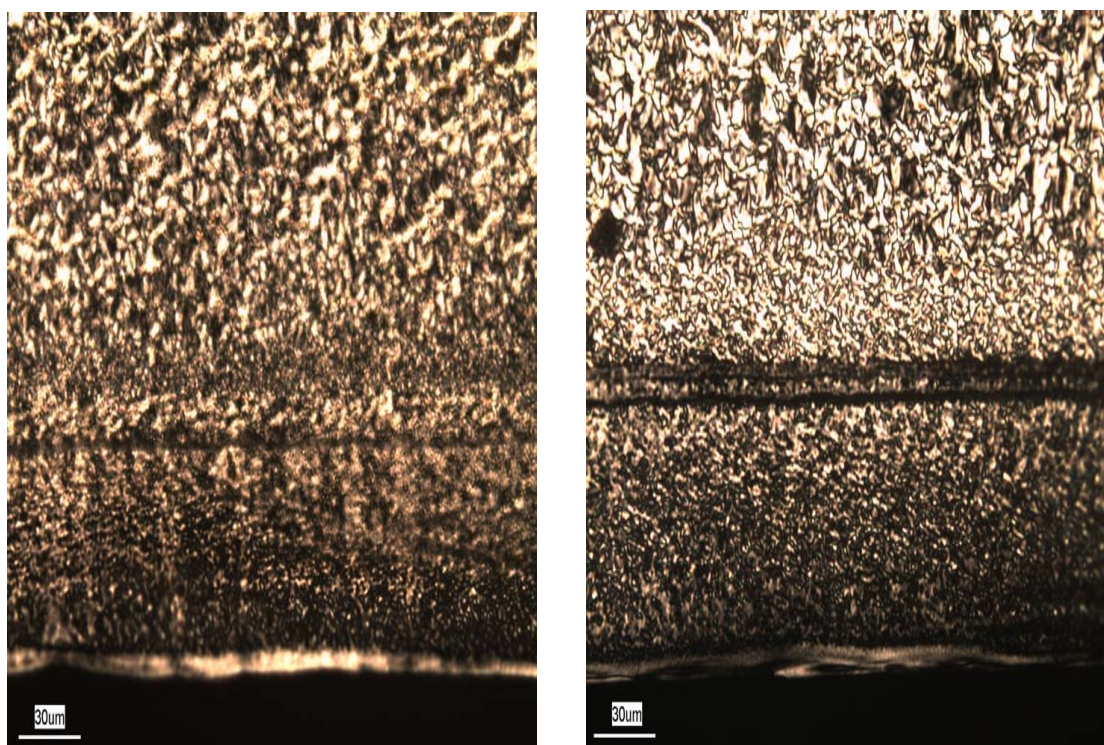


Obr. 91. Mikrotomové řezy z místa 3, vzorky vstříkovány za podmínky A – vzorek na snímku vpravo byl vystaven horkému dieselu



Obr. 92. Mikrotomové řezy z místa 3, vzorky vstříkovány za podmínky F – vzorek na snímku vpravo byl vystaven horkému dieselu

Řezy provedené na vzorku odebíraného z místa 3 byly provedeny ve směru toku taveniny, na snímcích z mikrotomových řezů lze pozorovat směr toku taveniny. Vzorky byly opět vstříkovány za podmínek A a F a z jednoho dílu Hrncel byly vystaveny působení horkého dieselu. Ze snímků námi uvedených nelze vyčíst, zda horké palivo má na dané místo nějaký vliv.



Obr. 93. Mikrotomový řez z místa 1 – dolní okraj, vzorky vstříkovány za podmínky A – snímek vlevo - vzorek nebyl vystaven horkému dieslu

Na obrázku 93 můžeme vidět snímky z mikrotomých řezů místa 1, dolního okraje. Tento dílec, z kterého se odebírali vzorky pro mikrotomové řezy, byl vstříkovan za podmínky A.

V závěru spekulujeme, zda výsledky, pořízené z tahových a vrubových zkoušek, nám dávají odpověď o působení horkého dieselu na daný polymer tím, že palivo nám způsobuje dokrystalizování POM. Na snímcích (viz Obr. 93) vidíme tedy vzorek, který byl zatěžován horkým dieselem a vzorek, který tímto způsobem namáhán nebyl. Budeme-li hodnotit vizuálně velikost krystalů na snímcích pořízených ze vzorků z dílu v zatíženém a nezatíženém stavu, můžeme říci, že vzorek z dílu, který byl zatěžován horkým dieselem, vykazuje větší množství krystalické fáze než vzorek z dílu, který palivem namáhám nebyl. Tímto můžeme alespoň částečně potvrdit teorii, že horký diesel způsobil dokrystalizování POM.

## ZÁVĚR

Vývoj v oblasti polymerních materiálů, který směřuje ke stále technicky náročnějším výrobkům, vystaveným složitým podmínkám namáhání, vyvolal potřebu sledovat tyto polymery a výrobky, které jsou z těchto polymerů vyrobeny, různými metodami zkoušek. Ukázalo se, že pro sledování polymerů a výrobků, z nich vyrobených, jsou také vhodné statické, dynamické a morfologické metody. Tato diplomová práce se zabývala vztahem mezi statickými (tahovými) zkouškami, dynamickými (vrubová houževnatost) zkouškami v závislosti působení horkého paliva a vstřikovacích podmínek na mechanické vlastnosti daného polymeru. Dále se pak tato práce zabývala sledováním lomových ploch (vystříknutého dílu Hrnc, který byl vystaven tlakové zkoušce, kdy do uzavřené části pro filtr, byla vhnána pod určitým tlakem kapalina, do té doby, dokud nedošlo k destrukci), pomocí SEM a zkoumáním vnitřních vad (odebráním vzorků z konstrukčních kritických míst speciálním vrtáčkem) pomocí světelné mikroskopie (mikrotomové řezy). Také v závislosti na výsledcích ze SEM a z mikrotomových řezů byla provedena toková a mechanická analýza a byl sledován tok taveniny a mechanické namáhání daného dílu..

Výsledky z provedených zkoušek by měly být doplňkem pro manuál hodnocení kvality výrobků z POM a závěry by měly dát obrázek o důležitosti daných metod.

Z naměřených hodnot byly zjištěny následující závěry:

- Z tahových zkoušek lze vyčíst, že horký diesel způsobil, u všech vstřikovacích podmínek, zvýšení pevnosti a tažnosti. Naopak se POM projevuje snížením modulu pružnosti, tuhosti, díky působení horkého paliva.

Zatížení nenormalizovaných tělísek horkým palivem diesel způsobilo výrazné snížení tuhosti, ale mírný nárůst pevnosti (resp. meze kluzu) a především nárůst tažnosti. Tato změna je patrnější u vstřikovacího režimu F. Pro daný výrobek (tlaková nádoba filtru paliva, jež je hlavní částí výrobku Hrnc), u něhož není hlavní požadavkem tvarová stabilita ale pevnost, je tato reakce materiálu na zatížení horkým palivem příznivá. Dokonce lze říci, že z hlediska vlivu horkého paliva na tento materiál je právě podmínka vstřikování F příznivější.

Na snímcích získaných z mikrotomových řezů jsme pozorovali, že pokud byl díl zatěžován horkým dieselem, zvýšila se krystalinita. Pokud je krystalinita vyšší, tak se nám zvyšuje hustota, modul pružnosti, pevnost, mez kluzu a tvarová stálost.

Naopak se nám snižuje tažnost a vrubová houževnatost [25]. Z tahových zkoušek jsme ale naměřili, že nám modul pružnosti klesl a naopak se nám zvýšila tažnost. Usuzujeme tedy, že více než zvýšení podílu krystalické fáze, má na daný polymer vyšší vliv bobtnání a zvýšení volného objemu. Díky zvětšenému volnému objemu se modul pružnosti snížil a naopak se nám zvýšila tažnost.

- Z výsledných hodnot vrubové houževnatosti lze vyčíst, že ve většině případů je vrubová houževnatost nižší, pokud byla tělíska zatěžována horkým dieselem. Jen v případě vstřikovací podmínky A a D je průměrná vrubová houževnatost vyšší díky působení horkého paliva. Z těchto výsledků můžeme usuzovat, že tělíska vstřikovaná za podmínek A a D získala, díky působení horkého dieselu, větší schopnost odolávat křehkému lomu, zatímco pro ostatní vstřikovací podmínky mělo působení horkého dieselu opačný efekt. Vysokou houževnatostí usuzujeme dostatečnou pevnost, ale i schopnost deformace.
- Ze snímků pořízených skanovacím (rastrovacím) elektronovým mikroskopem je patrné, že lze jednoduše sledovat strukturu lomových částí vzorků a také určit vznik lomu.

Největší šíření praskliny bylo na dně nádoby, v těsné blízkosti vtoku a ve spojení mezi částí určenou pro filtr a zbytkem dílu Hrnc. K dalšímu šíření lomu došlo na stěně filtru. Můžeme tedy konstatovat, že tato část je jednou z nejkritičtějších na celém výrobku.

Za místo, které bylo s největší pravděpodobností iniciátorem vzniku lomu, bylo označeno místo vzorku L8. Na snímcích ze SEM z tohoto místa bylo pozorováno největší množství chyb.

Při hodnocení výstřiku pomocí snímku ze SEM lze říci, že nejpravděpodobnější chybou bylo zvýšení proudění taveniny a snížení teploty chladicího media od standardních podmínek vstřikování.

Pokud máme říci, zda nám elektronová mikroskopie může přinést nějaké výsledky, můžeme konstatovat, že ano. Velkou předností SEM je jeho velká hloubka ostrosti, v důsledku které lze z dvojrozměrných fotografií ze SEM nalézt jistý trojrozměrný aspekt. Zvětšení, které nám tento přístroj poskytuje, jsme ale nevyužili. Otázkou tedy zůstává, zda by nebylo lepší využít levnějších metod pozorování lomových částí. SEM nám ovšem nemůže dát celkový obrázek o problémech vzniklých na výrobcích, jeho kombinace s jinými metodami je tou nejlepší alternativou. Proto byl daný díl

podroben mechanické a tokové analýze. Toková analýza nám nepotvrdila, že na vzniku a šíření trhliny by mohlo mít vliv plnění daného dílu. Naopak pomocí mechanické analýzy jsme zjistili nejkritičtější (nejnamáhavější) místa na dílu Hrnc a můžeme potvrdit, že na vzniku a šíření trhliny mohlo mít také vliv konstrukční řešení dílu.

- Mikrotomové řezy jsou velmi užitečnou metodou k hledání vad ve vnitřní struktuře výrobku. V kombinaci s dalšími metodami nám mohou podrobně popsat chování materiálů ve sledovaných místech. Díky kombinaci námi sledovaných míst (mikrotomových řezů) s tokovou analýzou lze konstatovat, že pouze v případě vzorku odebíraného z místa 1 byl předpoklad vzniku vnitřních vad potvrzen. Naopak při sledování míst 2 a 3 se nepotvrdil.

Zjištěné výsledky byly naměřeny pro konkrétní materiál a vylisek. Podmínky měření a jejich změna může určitým způsobem ovlivňovat získané hodnoty.

Co se týká hodnocení výsledků pro vytvoření manuálu kvality, můžeme konstatovat, že statické (tahové) a dynamické (vrubová houževnatost) zkoušky mají smysl pokud chceme mít představu o mechanických vlastnostech daného polymeru. Jestliže se budeme zabývat vytvořením manuálu kvality pro daný výrobek z určitého polymeru, tak můžeme říci, že tahové zkoušky provedené na tělíscích vyřezaných z daného dílu, nám nemohou vytvořit celkový obrázek o mechanickém namáhání daného dílce. Takové výsledky z těchto zkoušek nemůžeme porovnávat s materiálovými vlastnostmi daného polymeru. Můžeme si ovšem udělat přibližný obrázek o mechanických vlastnostech v daném místě, z kterého bylo zkušební tělísko vyřezáno, hlavně v případech, kdy předpokládáme ve sledovaném místě, díky konstrukční obtížnosti, některé vnitřní vady.

Pokud budeme hodnotit elektronovou mikroskopii (SEM) jako metodu, kterou je možno využít pro manuál hodnocení kvality daného výrobku, musíme říci, že pokud nevyužijeme hloubku ostrosti SEM, je tato metoda velice nákladná.

Světelná mikroskopie (mikrotomové řezy) je metoda, kterou lze sledovat vnitřní strukturu a vady daného polymeru. Z hlediska užití této metody pro manuál hodnocení kvality, můžeme konstatovat, že nám může poskytnout takové výsledky, o kterých lze říci, že pro hodnocení kvality jsou velice užitečné.

Jako doplněk pro elektronovou mikroskopii (SEM) a mikrotomové řezy byla provedena mechanická a toková analýza. Mechanická a toková analýza byla provedena proto, abychom pochopili jakým způsobem se daný díl vstříkuje či jak je namáhán, a mohli

případně spekulovat, zda na případném vzniku vnitřních vad, jako jsou lunkry či studené spoje, nebo na způsobu vzniku trhliny, nemá také vliv plnění či konstrukční řešení daného dílu.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- (1) MLEZIVA, J., ŠŇUPÁREK, J. *Polymery : výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Brno : Sobotáles, 2000. 544 s.
- (2) SOVA, M., KREBS, J. a kol. *Termoplasty v praxi*. Praha : Verlag Dashofer, 2001. 2 sv. (500, 500 s.).
- (3) PTÁČEK, L., a kol. *Nauka o materiálu I,II*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 2 sv. (400, 500 s.).
- (4) RAAB, M. *Materiály a člověk*. Praha : Encyklopedický dům, spol.s.r.o., 1999. 200s.
- (5) RYBNÍKÁŘ, F., DITRYCH, Z., KLÁCEL, Z., ORDELT, O. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Praha : SNTL, 1965. 200 s.
- (6) LEDNICKÝ, F. Morfologie lomových ploch křehkých lomů amorfních polymerů. *Chemické listy*. Praha : Ústav makromolekulární chemie ČSAV, 1973. s. 20.
- (7) ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005. 100 s.
- (8) ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*. Brno : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1988. 200 s.
- (9) *Part and Mold Design* [online]. Pittsburg : Bayer Corporation, [2000] [cit. 2000-04-01]. Anglický. Dostupný z WWW: <<http://www.bayer.com/polymers-usa>>.
- (10) *General design principles* [online]. Geneva : Dupont de Nemours International S.A., [1999] [cit. 1999-07-01]. Anglický. Dostupný z WWW: <<http://www.dupont.com>>.
- (11) *Design check chart* [online]. Geneva : Dupont de Nemours International S.A., [1999] [cit. 1999-07-01]. Anglický. Dostupný z WWW: <<http://www.dupont.com>>.
- (12) *Design guide* [online]. Sittard : DSM Engineering Plastics., [2000] [cit. 2000-09-01]. Anglický. Dostupný z WWW: <<http://www.dsmep.com>>.
- (13) *Robert Bosch, České Budějovice* [CD-ROM]. c2004
- (14) Příkryl, P. *Aplikace vodivých typů konstrukčních plastů na palivové moduly*. Praha, 2005. Diplomová práce



- (15) ČSN EN ISO 527-2: *Plasty- Stanovení tahových vlastností- Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*, 1998.
- (16) ČSN EN ISO 179: *Plasty- Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*, 1998.
- (17) CAFOUREK, M. *Vztah mezi lomovou houževnatostí a geometrií vrubu u krátkovláknového kompozitu s PP matric*. Zlín, 2005. 120s. Diplomová práce.
- (18) ČERNOCH, S. *Strojně technická příručka*. Praha : SNTL, 1968. 2 sv. (1100, 1100 s.).
- (19) SCHATZ, M., VONDRÁČEK, P. *Zkoušení polymerů*. Praha : SNTL, 1979. 260 s.
- (20) LAPČÍK, L., RAAB, M. *Nauka o materiálech II*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2004. 133 s.
- (21) LUTONSKÝ, Z. *Konstrukce upínacích čelistí pro tahové zkoušky vzorků z polymerních materiálů*. Zlín, 2005. 60 s. Bakalářská práce.
- (22) LEDNICKÝ, F. *Mikroskopické techniky pro polymery*, 2001. (Nepublikováno).
- (23) NEBESÁŘOVÁ, J. *Elektronová mikroskopie*, (2001). (Nepublikováno).
- (24) *Acetal Copolymer Iupital* [online]. Tokyo : Mitsubishi Engineering-Plastics Corporation., [1996] [cit. 1996-07-01]. Anglický. Dostupný z WWW: <<http://www.m-ep.co.jp/mep-en/index.htm>>.
- (25) KOLOUCH, J. *Strojní součásti z plastů*. Praha: SNTL, 1981. 260 s.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$a_k$	[kJm <sup>-2</sup> ]	Vrubová houževnatost Charpy
$a_n$	[kJm <sup>-2</sup> ]	Rázová houževnatost Charpy
$b$	[mm]	Šířka zkušebního tělesa
$E$	[MPa]	Modul pružnosti
$F$	[N]	Síla
$F_{max}$	[N]	Maximální síla
$F_r$	[N]	Síla při přetržení tělesa
$F_k$	[N]	Síla na mezi kluzu
$F_b$	[N]	Síla na smluvní mezi kluzu
$h$	[mm]	Tloušťka zkušebního tělesa
$K$	[MPa <sup>-1</sup> ]	Součinitel úměrnosti
$L$	[mm]	Délka zkušebního tělesa
$l$	[mm]	Délka po protažení
$l_0$	[mm]	Původní délka
$\Delta l$	[mm]	Změna délky
POM	[-]	Polyoxymethylén.
PVC	[-]	Polyvinylchlorid
PE	[-]	Polyethylén
PP	[-]	Polypropylén
$r$	[mm]	Radius
SEM	[-]	Skannovací (rastrovací) elektronový mikroskop
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez tělesa
$S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	Počáteční průřez tělesa

---

$t$	[mm]	Hloubka vrubu
$V$	[m/s]	Rychlost
$\sigma$	[MPa]	Smluvní napětí
$\sigma_k$	[MPa]	Napětí na mezi kluzu
$\sigma_u$	[MPa]	Napětí na mezi úměrnosti
$\sigma_t$	[MPa]	Pevnost v tahu
$\sigma_r$	[MPa]	Napětí při přetržení
$\varepsilon_k$	[%]	Deformace na mezi kluzu
$\varepsilon_r$	[%]	Poměrné prodloužení při přetržení - Tažnost
$\varepsilon_s$	[-]	Relativní změna průřezu
$\varepsilon_l$	[-]	Relativní změna délky
$\mu$	[-]	Poissonovo číslo

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Část palivového modulu Hrnc	10
Obr. 2. Obecná křivka „síla – prodloužení“ [21].	16
Obr. 3. Charakteristické křivky různých materiálů [21].	19
Obr. 4. Závislost „napětí – poměrné prodloužení“ počáteční oblast [21].	20
Obr. 5. Princip přeražení tělíska Charpyho kladivem [11].	22
Obr. 6. Způsob přeražení tělíska dle ISO 179 [16].	22
Obr. 7. Vliv délky trhliny $c$ na pevnost v tahu $\sigma_t$ [20].	27
Obr. 8. Schematické znázornění závislosti síla-průhyb při rázové zkoušce, které odpovídají nestabilnímu (a), částečně stabilnímu (b) a stabilnímu lomu (c). [17, 20]	28
Obr. 9. Závislost rázové energie na teplotě při rázové zkoušce [20].	29
Obr. 10. Nedokonalé zaplnění výrobku vlivem rozdílu tloušťky stěn [9].	31
Obr. 11. Zborcení tvaru a deformace důsledkem nerovnoměrného smršťování [9].	32
Obr. 12. Vznik propadliny [12]	32
Obr. 13. Vada povrchu [1]	33
Obr. 14. Skrytá vada materiálu „lunkr“ – tenký řez 7 $\mu\text{m}$ , polarizované světlo [1]	33
Obr. 15. Skrytá vada materiálu „prasklina“ vlivem mechanického namáhání – tenký řez 7 $\mu\text{m}$ , polarizované světlo [1]	34
Obr. 16. Skryté vady „lunkry“ a nehomogenní struktura materiálu – tenký řez 7 $\mu\text{m}$ , polarizované světlo [1].	34
Obr. 17. Skryté vady - studený spoj a linie po tečení – tenký řez 7 $\mu\text{m}$ , polarizované světlo [1].	35
Obr. 18. Úprava tvaru zmenšením tloušťky stěny v kritické části výrobku – snížení vnitřního pnutí vlivem stejných rozměrů tloušťky stěn [9]	36
Obr. 19. Volba správného radiusu – snížení tloušťky stěny v místě zaoblení [9]	36
Obr. 20. Úprava pomocí různého způsobu zaoblení ostrého přechodu [9]	36
Obr. 21. Vytvoření drážky pro usměrnění toku taveniny a správnému plnění v dutině formy [9]	37
Obr. 22. Úprava výrobku pomocí drážek pro usměrnění toku taveniny [9]	37
Obr. 23. Snížení tloušťky stěn v místech vzniku případných problémů [9]	37
Obr. 24. Sledování povrchové vrstvy různých druhů POM – různé struktury povrchové vrstvy a také různé ostroty u jednotlivých materiálů. Kromě materiálu IUPITAL je obtížné tuto hranici jednoznačně vyznačit [1].	41
Obr. 25. Vstříkovací stroj ARB370C [1].	43
Obr. 26. Vstříkovací stroj ENGEL – ES 750/175 HL [1].	46
Obr. 27. Princip vyhazování výlisku Hrnc [1].	46
Obr. 28. Normalizované zkušební těleso pro tahovou zkoušku	48
Obr. 29. Zkušební tělíska vrubové houževnatosti	49
Obr. 30. Výrobek Hrnc před a po přivaření víka filtru a s naznačením polohy zkušebních těles	50
Obr. 31. Zkušební tahové tělíska	50
Obr. 32. Přípravek pro obrábění zkušebních těles (včetně těles)	51
Obr. 33. Univerzální trhací stroj Zwick 145665	52
Obr. 34. Program testXpert 7.11 při zpracování dat	54
Obr. 35. Charpyho kladivo Zwick 5113	55
Obr. 36. Program testXpert 9.1 při zpracovávání dat pro rázovou a vrubovou houževnatost	56
Obr. 37. Konstrukce skanovacího elektronového mikroskopu [23]	57
Obr. 38. Místa praskliny a odběru vzorků dílce Hrnc, spodní část	58

Obr. 39. Místa praskliny a odběru vzorků dílce Hrnc, boční část .....	59
Obr. 40. Podavač vzorku umístěného na terčiku do vakuové komory SEM [23] .....	60
Obr. 41. Skanovací elektronový mikroskop JEOL 6300 [23] .....	60
Obr. 42. Označení polohy vzorku na terčiku .....	61
Obr. 43. Příklad základního rozdělení sledovaného vzorku (L1) .....	61
Obr. 44. Detailní označení daného místa vzorku (místo L1A) .....	62
Obr. 45. Nůž pro mikrotomové řezy LEICA SM 2500 E .....	64
Obr. 46. Světelný mikroskop LEICA DFC 280 .....	65
Obr. 47. Porovnání průměrných hodnot modulu pružnosti E – normalizovaná tělíska .....	67
Obr. 48. Porovnání průměrných hodnot modulu pružnosti E – nenormalizovaná tělíska .....	67
Obr. 49. Porovnání průměrných hodnot meze kluzu $\sigma_k$ – normalizovaná tělíska .....	69
Obr. 50. Porovnání průměrných hodnot meze kluzu $\sigma_k$ – nenormalizovaná tělíska .....	69
Obr. 51. Porovnání průměrných hodnot meze úměrnosti $\sigma_u$ .....	70
Obr. 52. Porovnání průměrných hodnot deformací na mezích kluzu $\varepsilon_k$ – normalizovaná tělíska .....	71
Obr. 53. Porovnání průměrných hodnot deformací na mezích kluzu $\varepsilon_k$ – nenormalizovaná tělíska .....	72
Obr. 54. Porovnání průměrných hodnot tažností (poměrné deformace při přetržení) $\varepsilon_r$ – normalizovaná tělíska .....	73
Obr. 55. Porovnání průměrných hodnot tažností (poměrné deformace při přetržení) $\varepsilon_r$ – nenormalizovaná tělíska .....	73
Obr. 56. Pevnost POM při různých vstřikovacích podmínkách v závislosti na teplotě paliva – normalizovaná tělíska .....	74
Obr. 57. Tažnost POM při různých vstřikovacích podmínkách v závislosti na teplotě paliva – normalizovaná tělíska .....	75
Obr. 58. Porovnání průměrných hodnot vrubové houževnatosti $a_k$ .....	76
Obr. 59. Závislost vrubové houževnatosti na teplotě paliva při různých vstřikovacích podmínkách .....	77
Obr. 60. Detail místa lomu vzorku L1 a způsob plnění zkoumaného místa .....	77
Obr. 61. Lomová plocha části vzorku L1A pořízena SEM JEOL 6300 .....	78
Obr. 62. Lomová plocha části vzorku L1A – detail L1A0 pořízena SEM JEOL 6300 .....	78
Obr. 63. Detail místa lomu vzorku L2 – levá strana a způsob plnění zkoumaného místa .....	79
Obr. 64. Lomová plocha části vzorku L2 pořízena SEM JEOL 6300 .....	79
Obr. 65. Lomová plocha části vzorku L2A pořízena SEM JEOL 6300 .....	80
Obr. 66. Detail místa lomu vzorku L3 – pravá strana a způsob plnění zkoumaného místa .....	81
Obr. 67. Lomová plocha části vzorku L3A pořízena SEM JEOL 6300 .....	81
Obr. 68. Lomová plocha části vzorku L3B pořízena SEM JEOL 6300 .....	82
Obr. 69. Lomová plocha části vzorku L3B3 pořízena SEM JEOL 6300 .....	82
Obr. 70. Detail místa lomu vzorku L4 a způsob plnění zkoumaného místa .....	83
Obr. 71. Lomová plocha části vzorku L4A pořízena SEM JEOL 6300 .....	83
Obr. 72. Lomová plocha části vzorku L4A4 pořízena SEM JEOL 6300 .....	84
Obr. 73. Detail místa lomu vzorku L8 a způsob plnění zkoumaného místa .....	84
Obr. 74. Lomová plocha části vzorku L8A pořízena SEM JEOL 6300 .....	85
Obr. 75. Lomová plocha části vzorku L8A2 pořízena SEM JEOL 6300 .....	85
Obr. 76. Detail místa lomu vzorku L9 a způsob plnění zkoumaného místa .....	86
Obr. 77. Lomová plocha části vzorku L9B pořízena SEM JEOL 6300 .....	86
Obr. 78. Lomová plocha části vzorku L9B3 pořízena SEM JEOL 6300 .....	87
Obr. 79. Průběh napětí a způsob deformace dílu Hrnc pomocí programu Catia P3V5R1588 .....	89
Obr. 80. Průběh napětí v části pro filtr pomocí programu COSMOS Design STAR 3.0 .....	89
Obr. 81. Průběh deformace v části pro filtr pomocí programu COSMOS Design STAR 3.089 .....	89

Obr. 82. Způsob plnění dílu Hrnc – vznik studených spojů .....	90
Obr. 83. Kritické místo L8 dle SEM – tok taveniny v místě L8.....	91
Obr. 84. Místo odběru vzorku 1 z nádoby palivového modulu a způsob toku taveniny ....	92
Obr. 85. Chladnutí místa pro filtr v čase 14 s .....	93
Obr. 86. Mikrotomové řezy z místa 1, vzorky vstříkovány za podmínky A – vzorek na snímku vpravo byl vystaven horkému dieslu .....	93
Obr. 87. Mikrotomové řezy z místa 1, vzorky vstříkovány za podmínky F – vzorek na snímku vpravo byl vystaven horkému dieslu .....	94
Obr. 88. Místo odběru vzorku 2 z nádoby palivového modulu a způsob toku taveniny .....	95
Obr. 89. Mikrotomové řezy z místa 2, vzorky vstříkovány za podmínky A a F – vzorek na snímku vpravo byl vstříkovan za podmínky F.....	95
Obr. 90. Místo odběru vzorku 3 z nádoby palivového modulu a způsob toku taveniny .....	96
Obr. 91. Mikrotomové řezy z místa 3, vzorky vstříkovány za podmínky A – vzorek na snímku vpravo byl vystaven horkému dieslu.....	96
Obr. 92. Mikrotomové řezy z místa 3, vzorky vstříkovány za podmínky F – vzorek na snímku vpravo byl vystaven horkému dieslu.....	97
Obr. 93. Mikrotomový řez z místa 1 – dolní okraj, vzorky vstříkovány za podmínky A – snímek vlevo - vzorek nebyl vystaven horkému dieslu.....	97

**SEZNAM TABULEK**

Tab. I. Vlastnosti POM [2] .....	12
Tab. II. Doporučené teploty zpracování POM [2].....	13
Tab. III. Změny velikosti smrštění POM v závislosti na teplotě formy [2].....	13
Tab. IV. Faktory ovlivňující vzhled lomové plochy [6].....	25
Tab. V. Vlastnosti kopolymeru POM – Iupital F20-03 [24] .....	42
Tab. VI. Základní parametry stroje ARBURG – ARB370C [1] .....	44
Tab. VII. Cyklus vstřikování tahových tělísek .....	44
Tab. VIII. Cyklus vstřikování tělísek pro rázovou a vrubovou houževnatost .....	45
Tab. IX. Teplotní režimy podmínek vstřikování A – F .....	45
Tab. X. Základní parametry stroje ENGEL – ES 750/175 HL [1] .....	47
Tab. XI. Cyklus vstřikování dílců Hrnců .....	47
Tab. XII. Teplotní režimy podmínek vstřikování dílce Hrnců A a F .....	48
Tab. XIII. Rozměry normalizovaných tahových těles .....	48
Tab. XIV. Rozměry těles pro vrubovou houževnatost .....	49
Tab. XV. Rozměr zkušebních těles pro tahovou zkoušku (viz Obr.31) .....	51
Tab. XVI. Technická data zkušebního zařízení ZWICK 1456.....	52
Tab. XVII. Technická data Zkušebního zařízení ZWICK 5113.....	54

**SEZNAM PŘÍLOH**

P 1: Naměřené hodnoty $E$ – normalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem .....	113
P 2: Naměřené hodnoty $\sigma_k$ – normalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem .....	114
P 3: Naměřené hodnoty $\sigma_u$ – normalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem .....	115
P 4: Naměřené hodnoty $\varepsilon_K$ – normalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem .....	116
P 5: Naměřené hodnoty $\varepsilon_r$ – normalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem .....	117
P 6: Hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek A a B – nezatěžované horkým dieselem.....	118
P 7: Hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek C a D – nezatěžované horkým dieselem.....	119
P 8: Hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek E a F – nezatěžované horkým dieselem.....	120
P 9: Hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek A a B – zatěžované horkým dieselem .....	121
P 10: Hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek C a D – zatěžované horkým dieselem.....	122
P 11: Hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek E a F – zatěžované horkým dieselem .....	123
P 12: Naměřené hodnoty $\varepsilon_r$ – nenormalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem .....	124
P 13: Naměřené hodnoty $\varepsilon_K$ – nenormalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem .....	125
P 14: Naměřené hodnoty $\sigma_k$ – nenormalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem .....	126
P 15: Naměřené hodnoty $E$ – nenormalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem .....	127
P 16: Tahové křivky normalizovaných tělísek A (bez působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm .....	128
P 17: Tahové křivky normalizovaných tělísek B (bez působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm .....	129
P 18: Tahové křivky normalizovaných tělísek C (bez působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm .....	130
P 19: Tahové křivky normalizovaných tělísek D (bez působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm .....	131
P 20: Tahové křivky normalizovaných tělísek E (bez působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm .....	132
P 21: Tahové křivky normalizovaných tělísek F (bez působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm .....	133
P 22: Tahové křivky normalizovaných tělísek A (působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm .....	134
P 23: Tahové křivky normalizovaných tělísek B (působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm .....	135



P 24: Tahové křivky normalizovaných tělísek C (působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm .....	136
P 25: Tahové křivky normalizovaných tělísek D (působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm .....	137
P 26: Tahové křivky normalizovaných tělísek E (působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm .....	138
P 27: Tahové křivky normalizovaných tělísek F (působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm .....	139
P 28: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek A – působení horkého dieselu .....	140
P 29: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek B – působení horkého dieselu .....	141
P 30: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek C – působení horkého dieselu .....	141
P 31: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek D – působení horkého dieselu .....	141
P 32: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek E – působení horkého dieselu .....	142
P 33: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek F – působení horkého dieselu .....	142
P 34: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek A – bez působení horkého dieselu .....	142
P 35: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek B – bez působení horkého dieselu .....	143
P 36: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek C – bez působení horkého dieselu .....	143
P 37: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek D – bez působení horkého dieselu .....	143
P 38: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek E – bez působení horkého dieselu .....	144
P 39: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek F – bez působení horkého dieselu .....	144
P 40: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-1 (bez působení horkého dieselu) ....	144
P 41: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-2 (bez působení horkého dieselu) ....	145
P 42: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-3 (bez působení horkého dieselu) ....	145
P 43: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-4 (bez působení horkého dieselu) ....	146
P 44: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-5 (bez působení horkého dieselu) ....	146
P 45: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-1 (působení horkého dieselu) .....	147
P 46: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-2 (působení horkého dieselu) .....	147
P 47: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-3 (působení horkého dieselu) .....	148
P 48: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-4 (působení horkého dieselu) .....	148
P 49: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-5 (působení horkého dieselu) .....	149
P 50: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-1 (bez působení horkého dieselu) ....	149
P 51: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-2 (bez působení horkého dieselu) ....	150
P 52: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-3 (bez působení horkého dieselu) ....	150
P 53: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-4 (bez působení horkého dieselu) ....	151
P 54: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-5 (bez působení horkého dieselu) ....	151
P 55: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-6 (bez působení horkého dieselu) ....	152
P 56: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-1 (působení horkého dieselu) .....	152
P 57: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-2 (působení horkého dieselu) .....	153

---

P 58: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-3 (působení horkého dieselu).....	153
P 59: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-4 (působení horkého dieselu).....	154
P 60: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-5 (působení horkého dieselu).....	154

P 1: Naměřené hodnoty E – normalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky					
	A	B	C	D	E	F
1	2712,050	2692,310	2820,240	2768,190	2417,520	2717,150
2	2595,980	2555,940	2661,210	2376,020	2646,150	2491,340
3	2575,350	2196,280	2536,860	2680,490	2633,050	2567,970
4	2556,350	2642,040	2734,750	2622,910	2647,220	2592,110
5	2429,180	2651,650	2626,670	2492,870	2516,310	2663,710
6	2630,030	2580,070	2718,560	2482,890	2694,330	2588,220
7	2666,120	2631,250	2698,860	2929,040	2886,010	2641,570
8	2594,420	2626,350	2625,860	2717,450	2750,410	2654,520
9	2671,570	2589,040	2520,190	2574,630	2690,020	2455,100
10	2647,070	2565,430	2670,600	2429,600	2920,000	2688,520
$\bar{X}$	2607,812	2573,036	2661,380	2607,409	2680,102	2606,021
s	79,089	139,044	90,238	170,569	151,077	84,319
v	3,030	5,400	3,390	6,540	5,640	3,240

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky					
	A	B	C	D	E	F
1	2272,160	2273,380	2283,660	2270,560	2360,960	2221,590
2	2239,820	2293,670	2315,200	2215,550	2388,230	2354,330
3	2492,890	2104,360	2420,240	2829,940	2343,990	2363,130
4	1368,060	2392,620	2425,590	2297,190	2306,510	2141,030
5	2376,510	2278,200	2267,790	2174,700	2127,760	1968,570
6	2235,970	2319,400	2560,390	2596,440	2253,370	2188,460
7	2323,640	2280,850	2332,590	1968,640	2354,060	2379,180
8	2502,350	2387,930	2441,470	2176,790	2028,270	2574,940
9	2285,480	2354,520	2566,620	2579,800	1545,620	2568,620
10	2463,570	2304,850	2122,540	2437,730	2388,150	2227,770
$\bar{X}$	2256,045	2298,978	2373,609	2354,734	2209,692	2298,762
s	328,163	81,334	137,048	254,885	261,912	188,522
v	14,550	3,540	5,770	10,820	11,850	8,200

P 2: Naměřené hodnoty  $\sigma_k$  – normalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky					
	A	B	C	D	E	F
1	60,230	58,010	59,710	58,120	59,400	57,150
2	58,710	58,040	59,830	57,760	59,390	57,440
3	59,250	48,590	59,950	58,090	59,380	57,940
4	59,750	57,950	59,980	57,920	59,120	57,880
5	59,290	58,030	59,730	57,960	59,100	57,250
6	59,110	57,920	59,690	58,120	59,540	57,780
7	59,310	57,750	60,180	58,180	59,470	57,470
8	59,210	57,700	59,980	57,780	59,550	57,510
9	58,710	57,230	60,120	57,950	59,200	58,050
10	59,250	57,230	60,050	58,220	59,030	57,710
$\bar{X}$	59,282	56,845	59,922	58,010	59,318	57,618
s	0,448	2,917	0,174	0,161	0,190	0,301
v	0,760	5,130	0,290	0,280	0,320	0,520

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky					
	A	B	C	D	E	F
1	58,890	58,010	60,340	59,630	59,560	59,810
2	59,510	58,180	60,150	58,710	59,640	59,880
3	59,120	58,090	59,730	59,190	59,240	59,420
4	59,450	58,210	59,970	58,830	59,380	59,400
5	59,060	58,060	59,980	58,920	59,410	59,960
6	59,110	57,740	60,070	58,340	59,450	59,470
7	59,030	57,850	59,830	58,920	59,450	59,530
8	59,180	57,980	59,920	58,900	59,650	59,560
9	59,490	58,030	60,140	59,140	59,120	59,580
10	59,300	58,100	60,080	59,200	59,140	59,600
$\bar{X}$	59,214	58,025	60,021	58,978	59,404	59,621
s	0,213	0,143	0,175	0,343	0,189	0,195
v	0,360	0,250	0,290	0,580	0,320	0,330

P 3: Naměřené hodnoty  $\sigma_u$  – normalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky					
	A	B	C	D	E	F
1	32,590	29,790	31,510	30,600	36,950	30,500
2	32,280	32,000	33,760	35,530	33,880	33,090
3	33,260	25,870	36,110	32,020	32,750	32,860
4	34,140	30,820	32,830	32,220	32,770	33,400
5	35,150	30,400	33,610	33,660	34,100	30,070
6	32,190	31,240	32,220	34,370	32,190	32,710
7	32,500	30,500	33,350	29,460	28,980	31,320
8	33,380	30,410	33,880	30,790	31,890	30,760
9	31,110	31,120	36,380	32,370	32,440	35,130
10	32,550	30,780	32,860	35,190	29,470	31,210
$\bar{X}$	32,915	30,293	33,651	32,621	32,542	32,105
s	1,127	1,663	1,549	2,033	2,271	1,587
v	3,424	5,490	4,602	6,234	6,979	4,944

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky					
	A	B	C	D	E	F
1	28,980	28,060	30,760	28,610	28,050	29,200
2	30,120	27,530	30,600	28,620	28,100	27,260
3	26,300	29,720	27,410	23,190	27,830	26,770
4	26,220	25,920	28,640	26,750	27,900	31,040
5	27,370	27,470	30,890	29,290	30,850	35,820
6	28,220	26,210	27,250	23,980	28,940	29,500
7	27,090	26,920	29,090	34,290	27,910	27,060
8	25,590	26,230	29,040	29,050	32,800	23,180
9	29,080	26,360	27,420	25,450	44,910	24,870
10	26,560	27,170	33,550	26,300	27,790	29,550
$\bar{X}$	27,553	27,159	29,465	27,553	30,508	28,425
s	1,485	1,135	2,000	3,186	5,325	3,506
v	5,388	4,180	6,787	11,562	17,454	12,336

P 4: Naměřené hodnoty  $\varepsilon_K$  – normalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky					
	A	B	C	D	E	F
1	8,700	9,120	8,280	8,070	8,450	8,300
2	8,300	8,910	8,140	8,100	8,510	8,130
3	8,500	8,920	7,980	8,110	8,330	8,110
4	8,720	9,330	7,970	8,100	8,370	8,010
5	8,840	9,490	8,120	8,140	8,530	8,580
6	8,690	9,120	7,750	8,160	8,620	8,010
7	8,470	9,060	8,080	7,940	8,400	8,500
8	8,700	9,390	8,030	8,160	8,280	8,370
9	8,820	8,040	8,220	7,990	8,380	7,910
10	8,170	9,640	8,420	8,110	8,410	7,870
$\bar{X}$	8,591	9,102	8,099	8,088	8,428	8,179
s	0,223	0,444	0,186	0,072	0,102	0,247
v	2,601	4,879	2,293	0,885	1,205	3,014

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky					
	A	B	C	D	E	F
1	11,620	12,950	11,150	11,960	11,630	12,220
2	12,250	12,410	11,680	12,590	11,390	11,410
3	12,650	13,160	11,970	11,920	11,690	12,460
4	16,380	12,840	11,090	12,330	12,000	12,250
5	12,120	12,710	11,410	12,170	12,430	11,210
6	12,250	13,180	11,200	12,510	12,680	12,250
7	12,210	12,850	11,740	12,220	11,670	11,490
8	12,250	12,850	11,350	12,560	12,440	12,390
9	11,680	13,530	11,240	11,970	12,300	12,450
10	12,080	12,600	11,650	12,210	11,880	12,670
$\bar{X}$	12,549	12,908	11,448	12,244	12,011	12,080
s	1,378	0,320	0,295	0,251	0,429	0,512
v	10,982	2,476	2,580	2,048	3,574	4,236

P 5: Naměřené hodnoty  $\varepsilon_r$  – normalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky					
	A	B	C	D	E	F
1	32,960	35,900	33,180	37,870	42,820	36,590
2	24,220	27,550	27,650	40,640	49,480	14,470
3	29,440	31,340	33,680	33,750	32,470	35,700
4	38,590	42,600	28,670	34,590	34,180	34,970
5	18,660	48,260	33,960	30,400	31,200	39,620
6	27,740	36,880	26,460	29,590	30,280	28,740
7	31,100	47,480	38,380	36,600	34,060	29,120
8	45,350	42,160	29,020	36,250	31,780	33,240
9	65,890	10,220	40,390	30,770	38,110	31,400
10	30,790	49,330	38,780	33,660	32,600	38,410
$\bar{X}$	34,474	37,172	33,017	34,412	35,698	32,226
s	13,230	11,954	4,993	3,536	6,114	7,229
v	38,377	32,158	15,122	10,277	17,127	22,433

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky					
	A	B	C	D	E	F
1	32,580	46,520	39,850	46,900	40,100	17,780
2	37,320	42,560	36,570	51,770	39,610	42,550
3	16,290	33,020	31,470	45,210	37,280	48,780
4	55,000	51,690	40,420	48,160	38,920	44,100
5	50,040	46,770	40,190	47,520	43,430	39,580
6	50,510	57,830	40,080	41,690	41,880	60,260
7	25,860	46,510	31,450	44,400	40,500	40,800
8	44,660	44,080	40,970	55,450	34,410	51,670
9	41,200	33,560	37,130	47,320	20,350	27,270
10	40,180	36,910	35,000	39,730	41,020	44,560
$\bar{X}$	39,364	43,945	37,313	46,815	37,750	41,735
s	11,925	7,836	3,649	4,553	6,600	11,992
v	30,293	17,831	9,780	9,725	17,484	28,734

P 6: Hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek A a B – nezatěžované horkým dieselem

Číslo vzorku	F(m) [kN]	V(m) [m/s]	W(TTL) [J]	$a_k$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,332	2,914	0,251	4,120
2	0,321	2,899	0,278	6,220
3	0,332	2,912	0,319	5,950
4	0,337	2,913	0,322	5,970
5	0,337	2,855	0,322	6,020
6	0,347	2,858	0,310	5,980
7	0,332	2,913	0,321	5,920
8	0,332	2,896	0,317	7,320
9	0,332	2,896	0,320	7,380
10	0,321	2,897	0,309	8,910
$\bar{X}$	0,332	2,895	0,307	6,379
v	0,008	0,022	0,024	1,259
s	2,279	0,754	7,718	19,741

Číslo vzorku	F(m) [kN]	V(m) [m/s]	W(TTL) [J]	$a_k$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,337	2,838	0,315	9,28
2	0,321	2,897	0,304	8,79
3	0,321	2,897	0,306	8,98
4	0,326	2,870	0,246	6,95
5	0,342	2,837	0,320	9,40
6	0,342	2,838	0,317	9,29
7	0,321	2,896	0,304	8,87
8	0,332	2,869	0,230	6,43
9	0,332	2,870	0,314	9,13
10	0,342	2,836	0,335	9,48
$\bar{X}$	0,332	2,865	0,299	8,660
v	0,009	0,026	0,034	1,069
s	2,702	0,913	11,261	12,343

P 7: Hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek C a D – nezatěžované horkým dieselem



Číslo vzorku	F(m) [kN]	V(m) [m/s]	W(TTL) [J]	$a_k$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,342	2,852	0,337	7,840
2	0,342	2,839	0,323	9,140
3	0,321	2,845	0,325	9,260
4	0,342	2,838	0,326	9,190
5	0,305	2,912	0,213	3,800
6	0,331	2,912	0,306	6,900
7	0,331	2,896	0,267	7,340
8	0,347	2,853	0,332	7,740
9	0,342	2,838	0,328	9,270
10	0,342	2,837	0,346	9,890
$\bar{X}$	0,335	2,862	0,310	8,037
v	0,013	0,032	0,040	1,791
s	3,878	1,101	13,049	22,278

Číslo vzorku	F(m) [kN]	V(m) [m/s]	W(TTL) [J]	$a_k$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,331	2,897	0,223	5,960
2	0,336	2,896	0,252	6,920
3	0,347	2,834	0,338	9,600
4	0,347	2,832	0,343	9,790
5	0,358	2,851	0,337	7,920
6	0,336	2,896	0,238	6,420
7	0,336	2,856	0,342	8,360
8	0,352	2,851	0,339	7,870
9	0,336	2,914	0,223	4,180
10	0,342	2,838	0,325	9,290
$\bar{X}$	0,342	2,867	0,296	7,631
v	0,009	0,031	0,054	1,784
s	2,524	1,077	18,304	23,375

P 8: Hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek E a F – nezatěžované horkým dieselem

Číslo vzorku	F(m) [kN]	V(m) [m/s]	W(TTL) [J]	$a_k$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,347	2,856	0,343	8,500
2	0,331	2,896	0,299	8,420
3	0,347	2,834	0,339	9,670
4	0,321	2,837	0,328	9,410
5	0,342	2,835	0,334	9,540
6	0,342	2,869	0,236	6,380
7	0,342	2,836	0,337	9,680
8	0,331	2,899	0,325	9,400
9	0,347	2,835	0,333	9,560
10	0,342	2,853	0,347	8,190
$\bar{X}$	0,339	2,855	0,322	8,875
v	0,009	0,025	0,033	1,043
s	2,562	0,885	10,253	11,755

Číslo vzorku	F(m) [kN]	V(m) [m/s]	W(TTL) [J]	$a_k$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,347	2,835	0,334	9,520
2	0,347	2,832	0,341	9,820
3	0,347	2,852	0,337	7,920
4	0,342	2,853	0,351	8,380
5	0,342	2,838	0,326	9,290
6	0,336	2,833	0,343	9,800
7	0,342	2,914	0,358	8,270
8	0,342	2,855	0,347	8,210
9	0,342	2,837	0,347	9,920
10	0,342	2,843	0,344	9,190
$\bar{X}$	0,343	2,849	0,343	9,032
v	0,003	0,024	0,009	0,764
s	0,986	0,854	2,630	8,454

P 9: Hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek A a B – zatěžované horkým dieselem

Číslo vzorku	F(m) [kN]	V(m) [m/s]	W(TTL) [J]	a <sub>k</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,280	2,900	0,309	8,830
2	0,301	2,913	0,311	7,180
3	0,285	2,900	0,316	9,200
4	0,317	2,900	0,325	9,350
5	0,306	2,839	0,322	9,200
6	0,301	2,914	0,261	5,650
7	0,311	2,849	0,337	8,160
8	0,311	2,854	0,321	7,630
9	0,306	2,841	0,314	8,970
10	0,306	2,913	0,303	6,940
$\bar{X}$	0,302	2,882	0,312	8,111
v	0,012	0,032	0,020	1,233
s	3,832	1,116	6,489	15,206

Číslo vzorku	F(m) [kN]	V(m) [m/s]	W(TTL) [J]	a <sub>k</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,316	2,833	0,331	9,900
2	0,306	2,837	0,318	9,520
3	0,385	2,921	0,301	2,220
4	0,295	2,898	0,315	9,340
5	0,301	2,872	0,304	8,990
6	0,290	2,899	0,305	9,120
7	0,306	2,839	0,308	9,220
8	0,290	2,899	0,304	9,050
9	0,311	2,837	0,318	9,430
10	0,306	2,838	0,317	9,350
$\bar{X}$	0,311	2,867	0,312	8,614
v	0,028	0,034	0,009	2,262
s	8,858	1,193	2,985	26,259

P 10: Hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek C a D – zatěžované horkým dieselem

Číslo vzorku	F(m) [kN]	V(m) [m/s]	W(TTL) [J]	$a_k$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,301	2,897	0,308	8,660
2	0,279	2,847	0,300	8,360
3	0,311	2,885	0,320	6,850
4	0,306	2,915	0,337	7,860
5	0,306	2,838	0,318	9,310
6	0,306	2,857	0,325	7,520
7	0,306	2,914	0,323	7,430
8	0,306	2,852	0,337	7,830
9	0,295	2,913	0,314	7,150
10	0,311	2,885	0,317	6,740
$\bar{X}$	0,303	2,880	0,320	7,771
v	0,010	0,030	0,012	0,816
s	3,146	1,033	3,617	10,501

Číslo vzorku	F(m) [kN]	V(m) [m/s]	W(TTL) [J]	$a_k$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,305	2,838	0,331	9,310
2	0,305	2,855	0,332	7,650
3	0,305	2,856	0,326	7,510
4	0,295	2,897	0,321	9,030
5	0,305	2,869	0,326	8,780
6	0,300	2,857	0,321	7,270
7	0,311	2,893	0,298	7,000
8	0,311	2,833	0,347	9,730
9	0,300	2,897	0,341	9,540
10	0,300	2,897	0,316	8,920
$\bar{X}$	0,304	2,869	0,326	8,474
v	0,005	0,025	0,014	1,014
s	1,665	0,877	4,168	11,960

P 11: Hodnoty vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek E a F – zatěžované horkým dieselem

Číslo vzorku	F(m) [kN]	V(m) [m/s]	W(TTL) [J]	$a_k$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,311	2,840	0,320	9,020
2	0,311	2,840	0,322	9,110
3	0,305	2,913	0,325	7,490
4	0,305	2,839	0,332	9,390
5	0,300	2,913	0,309	6,990
6	0,311	2,840	0,322	9,150
7	0,311	2,899	0,316	8,920
8	0,342	2,855	0,314	7,500
9	0,316	2,860	0,303	7,180
10	0,305	2,855	0,330	7,580
$\bar{X}$	0,312	2,865	0,319	8,233
v	0,012	0,031	0,009	0,955
s	3,720	1,075	2,829	11,601

Číslo vzorku	F(m) [kN]	V(m) [m/s]	W(TTL) [J]	$a_k$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,305	2,857	0,336	7,790
2	0,300	2,898	0,343	9,680
3	0,311	2,853	0,332	7,760
4	0,305	2,841	0,322	9,020
5	0,305	2,839	0,328	9,250
6	0,305	2,915	0,331	7,680
7	0,305	2,856	0,327	7,540
8	0,300	2,841	0,320	8,960
9	0,305	2,841	0,322	9,050
10	0,332	2,896	0,217	4,640
$\bar{X}$	0,307	2,864	0,318	8,137
v	0,009	0,028	0,036	1,452
s	2,994	0,989	11,361	17,841

P 12: Naměřené hodnoty  $\varepsilon_r$  – nenormalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky	
	A	F
1	16,740	16,620
2	16,190	16,150
3	17,560	17,790
4	15,110	16,530
5	16,820	17,340
6		16,180
$\bar{X}$	16,484	16,768
s	0,910	0,660
v	5,519	3,936

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky	
	A	F
1	14,530	18,690
2	15,620	17,740
3	17,330	15,660
4	17,320	16,980
5	17,620	18,750
$\bar{X}$	16,484	17,564
s	1,348	1,291
v	8,178	7,353

P 13: Naměřené hodnoty  $\varepsilon_K$  – nenormalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky	
	A	F
1	7,140	7,070
2	7,170	7,070
3	7,340	7,360
4	7,190	7,270
5	7,130	7,110
6		7,070
$\bar{X}$	7,194	7,158
s	0,085	0,126
v	1,182	1,755

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky	
	A	F
1	11,080	10,840
2	10,790	11,000
3	11,080	11,000
4	11,270	11,260
5	11,210	11,180
$\bar{X}$	11,086	11,056
s	0,185	0,166
v	1,669	1,499

P 14: Naměřené hodnoty  $\sigma_k$  – nenormalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky	
	A	F
1	60,639	61,203
2	60,467	60,478
3	60,710	62,134
4	60,405	60,900
5	60,631	60,748
6		60,859
$\bar{X}$	60,571	61,054
s	0,128	0,579
v	0,212	0,948

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky	
	A	F
1	61,858	60,719
2	59,870	62,709
3	59,984	63,788
4	61,408	60,606
5	59,924	69,470
$\bar{X}$	60,609	63,458
s	0,949	3,621
v	1,566	5,706

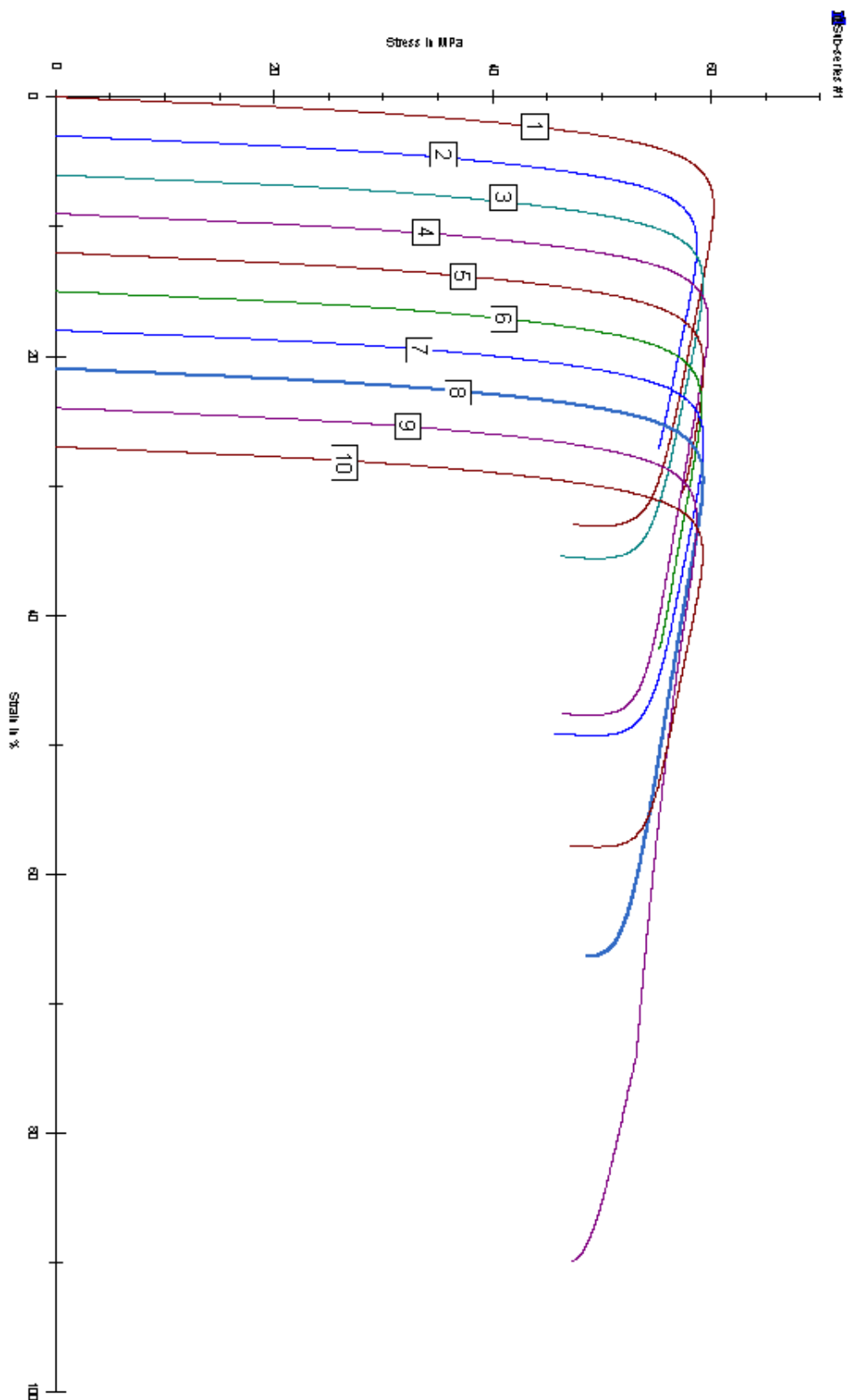
P 15: Naměřené hodnoty E – nenormalizovaná tělíska nezatěžovaná a zatěžovaná horkým dieselem



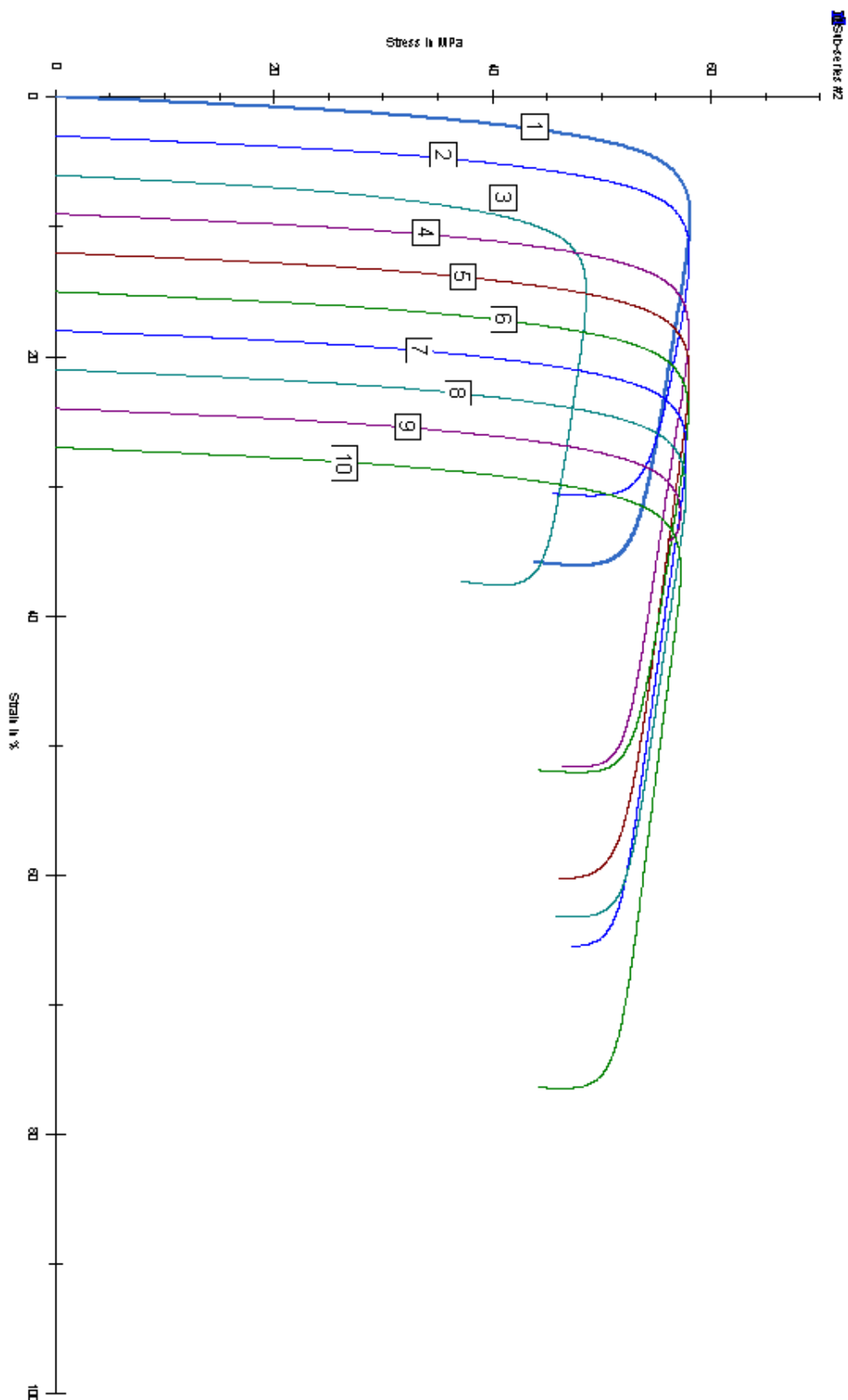
Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky	
	A	F
1	2600,000	2600,000
2	2600,000	2600,000
3	2600,000	2700,000
4	2600,000	2600,000
5	2700,000	2600,000
6		2600,000
$\bar{X}$	2620,000	2616,667
s	44,721	40,825
v	1,707	1,560

Číslo vzorku	Vstřikovací podmínky	
	A	F
1	2400,000	2300,000
2	2400,000	2440,000
3	2300,000	2430,000
4	2390,000	2300,000
5	2300,000	2700,000
$\bar{X}$	2358,000	2434,000
s	53,104	163,340
v	2,252	6,711

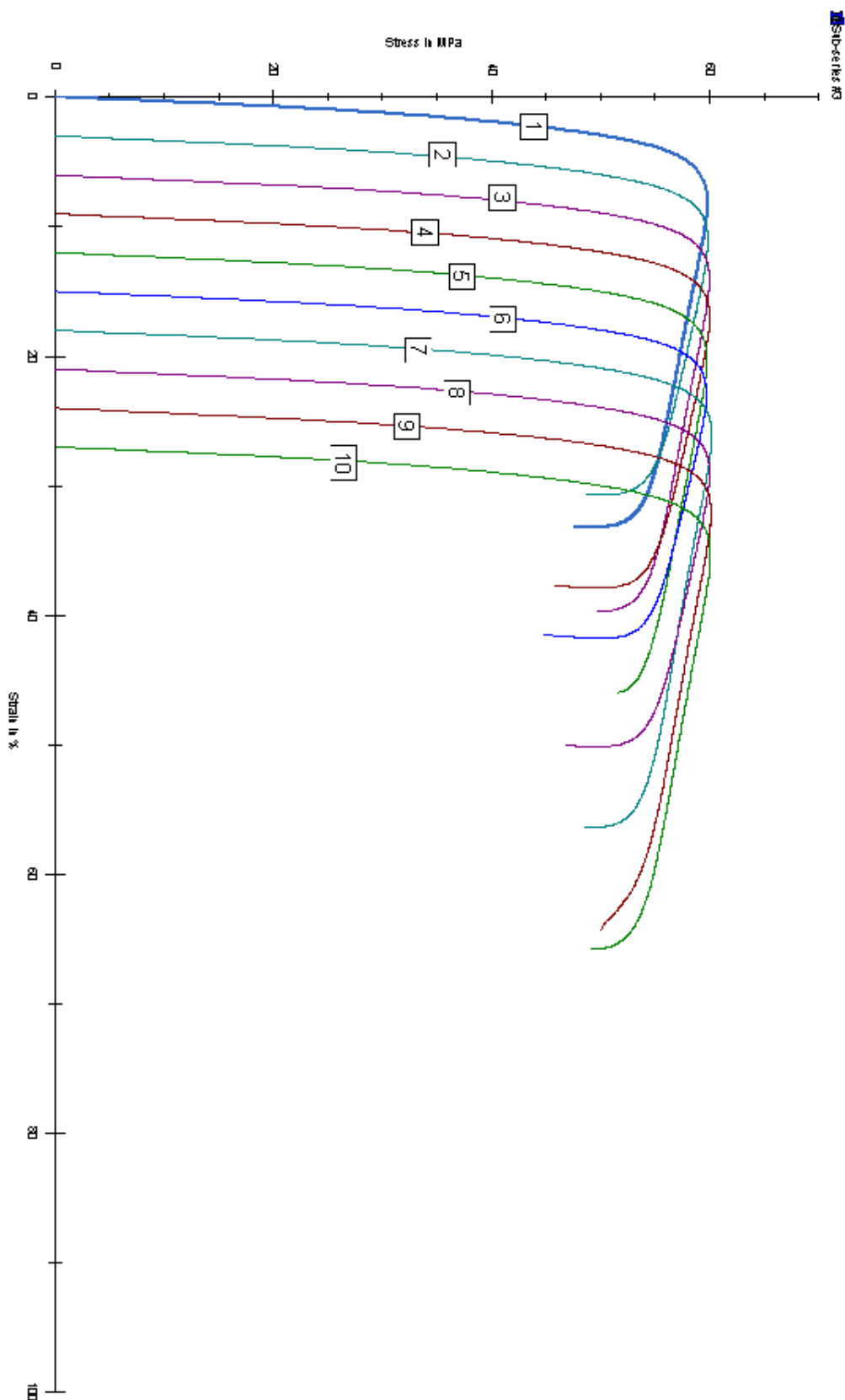
P 16: Tahové křivky normalizovaných tělísek A (bez působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm



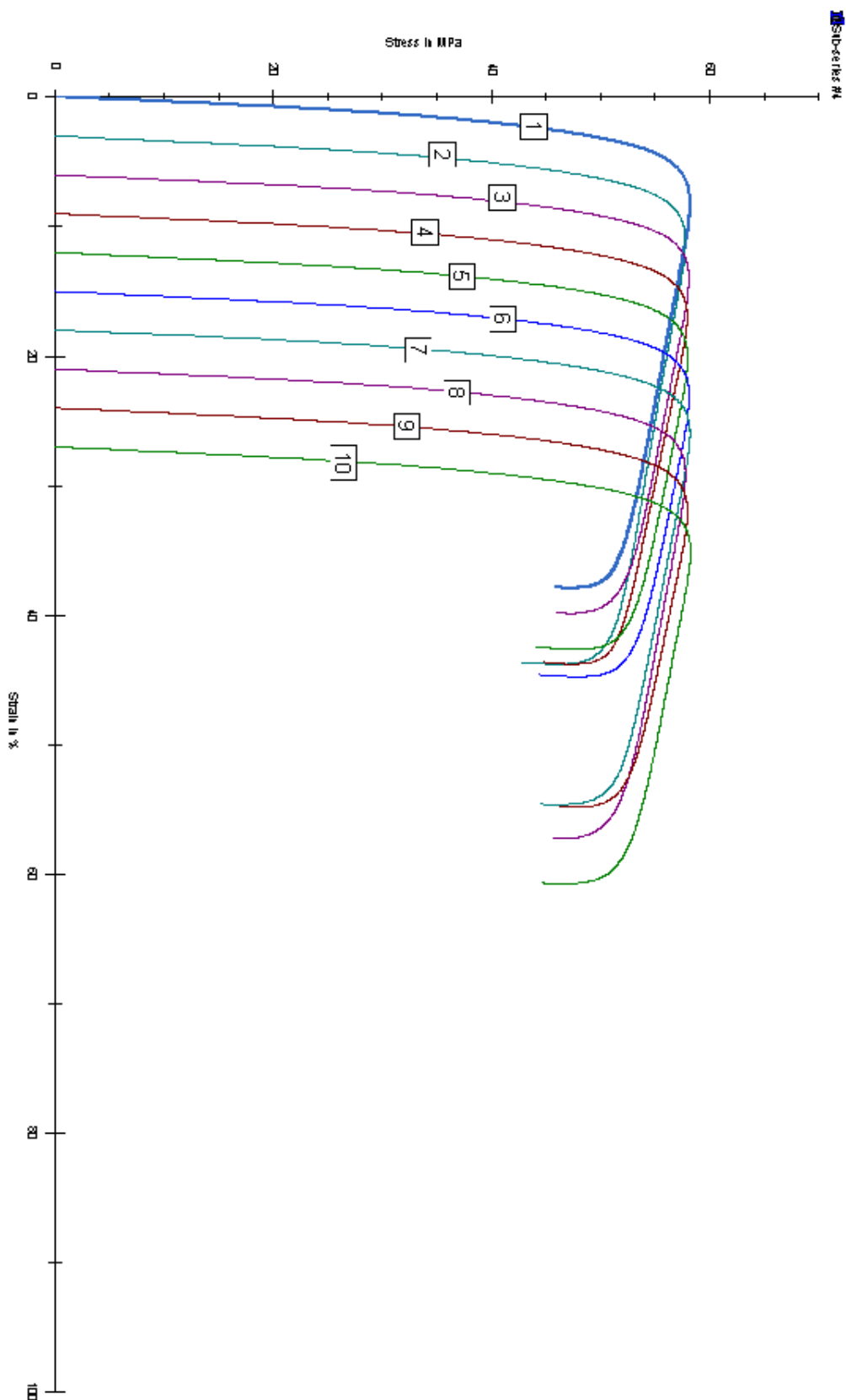
P 17: Tahové křivky normalizovaných tělísek B (bez působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm



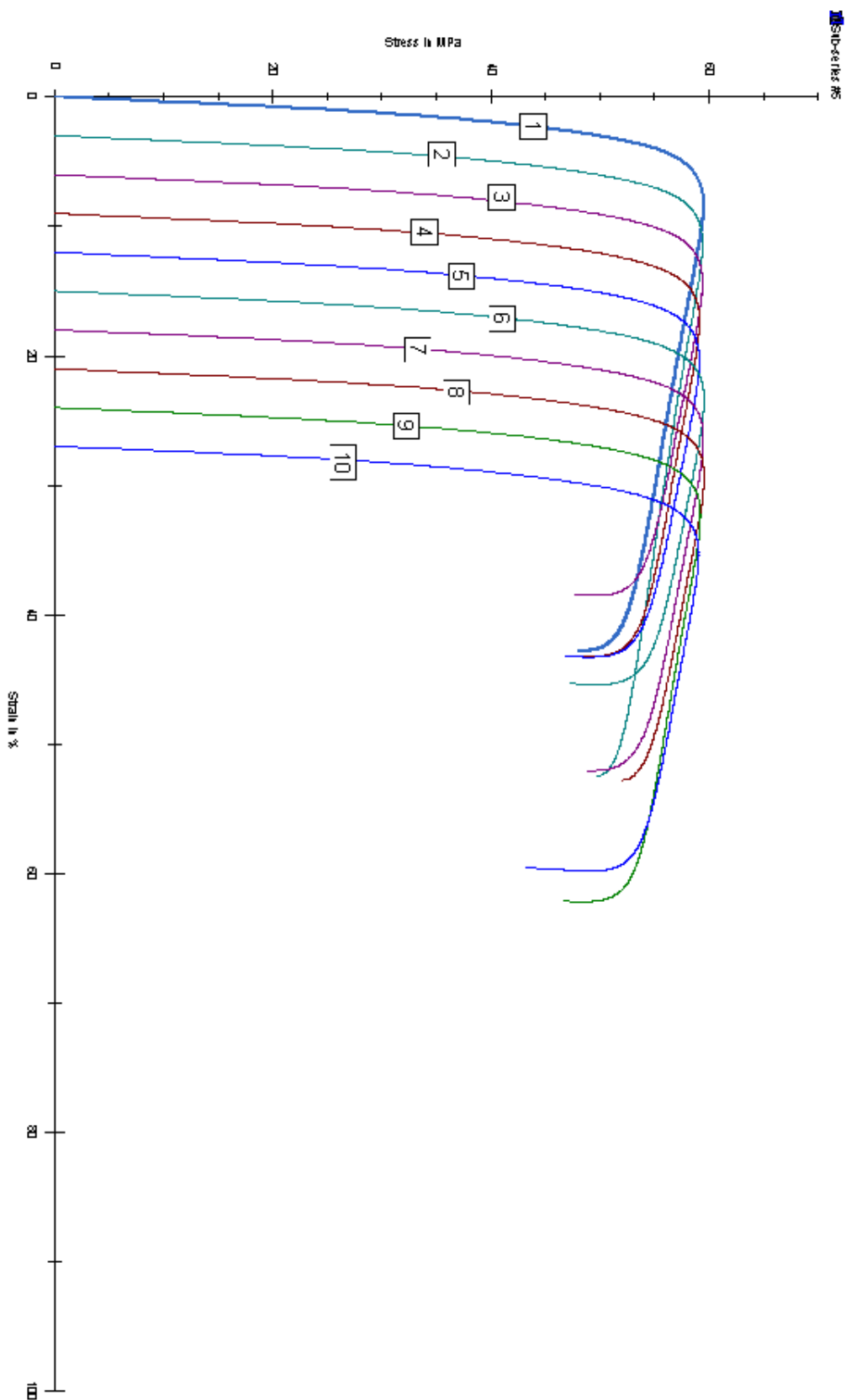
P 18: Tahové křivky normalizovaných tělísek C (bez působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm



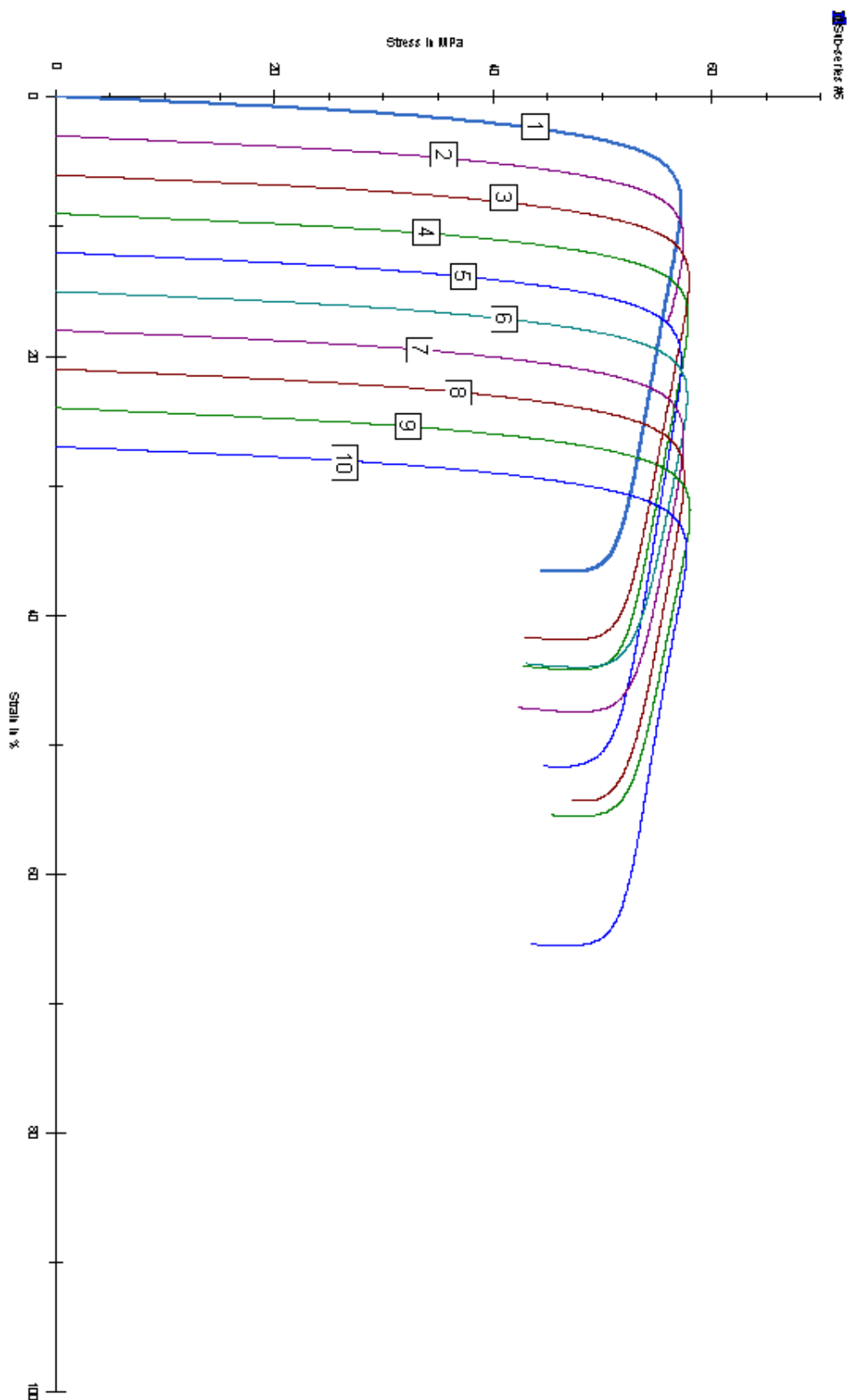
P 19: Tahové křivky normalizovaných tělísek D (bez působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm



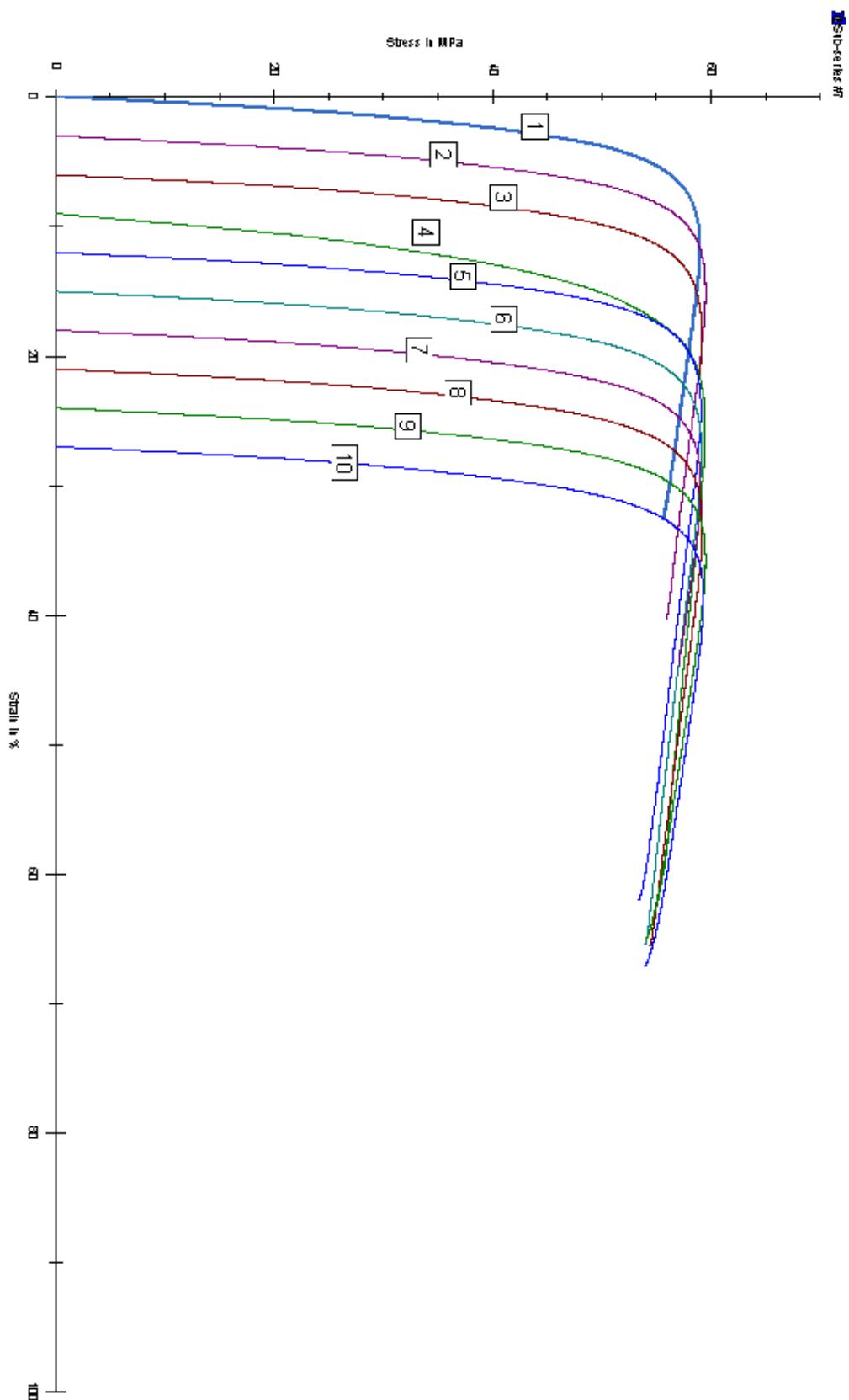
P 20: Tahové křivky normalizovaných tělísek E (bez působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm



P 21: Tahové křivky normalizovaných tělísek F (bez působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm

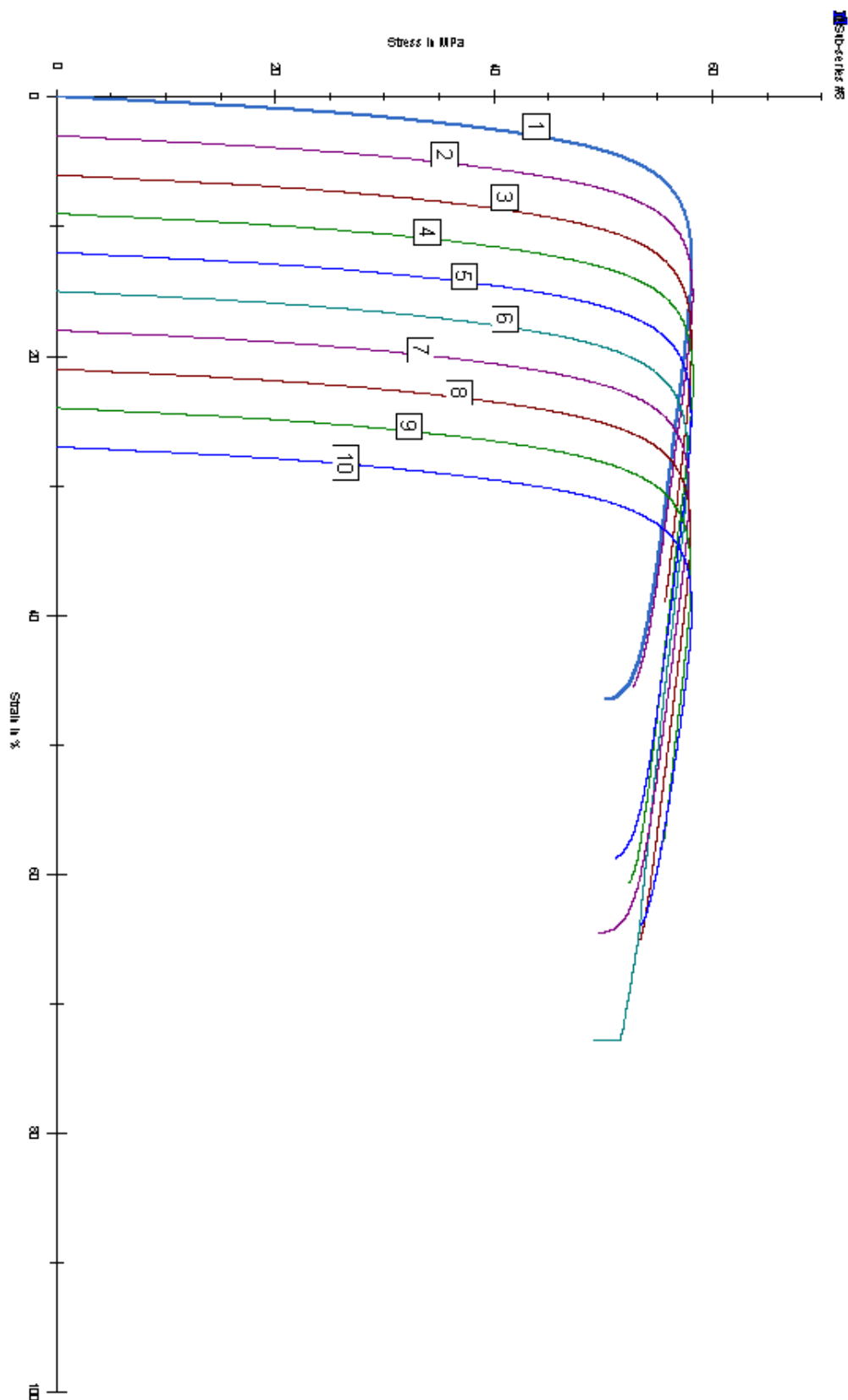


P 22: Tahové křivky normalizovaných tělísek A (působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm

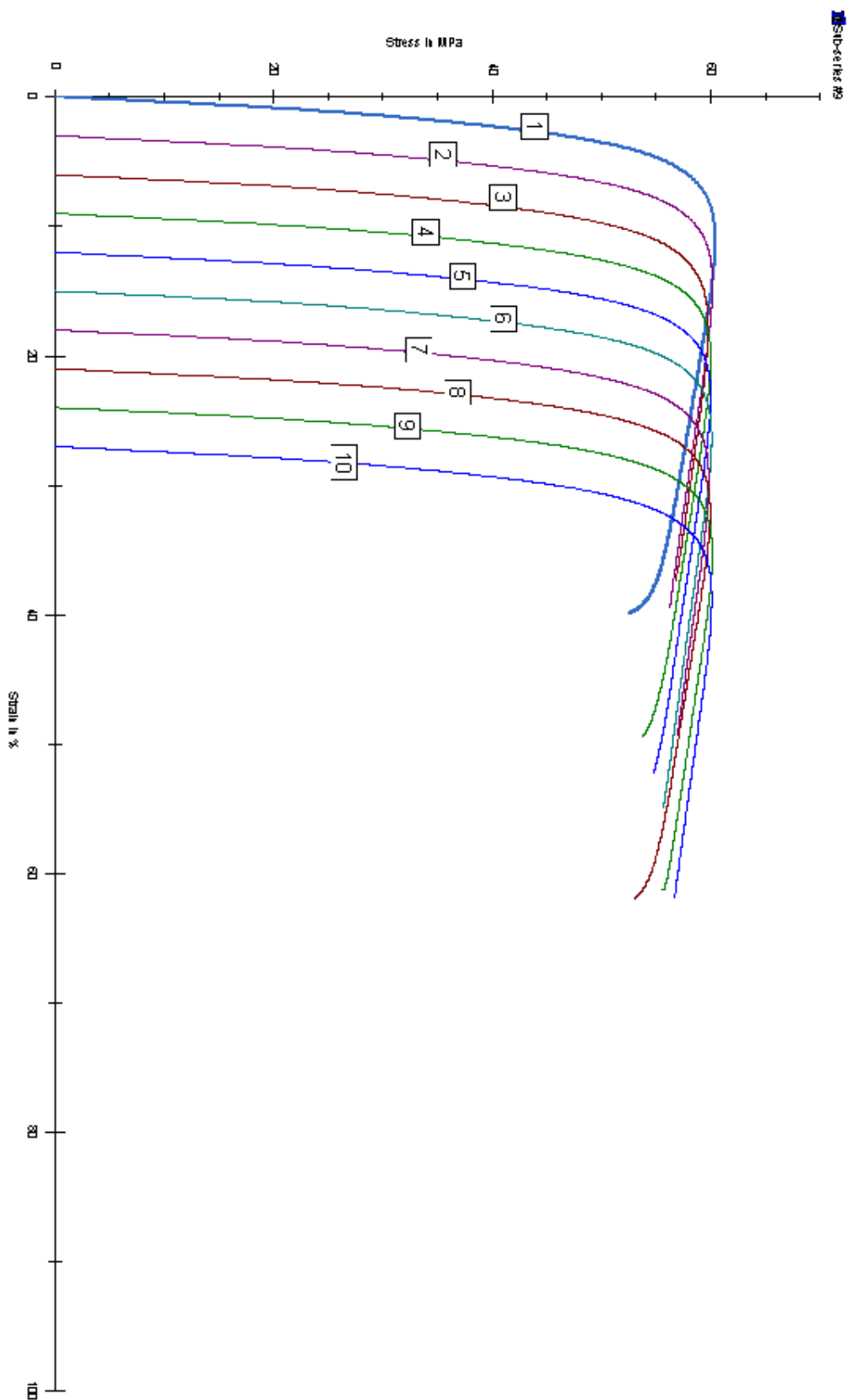


P 23: Tahové křivky normalizovaných tělísek B (působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm

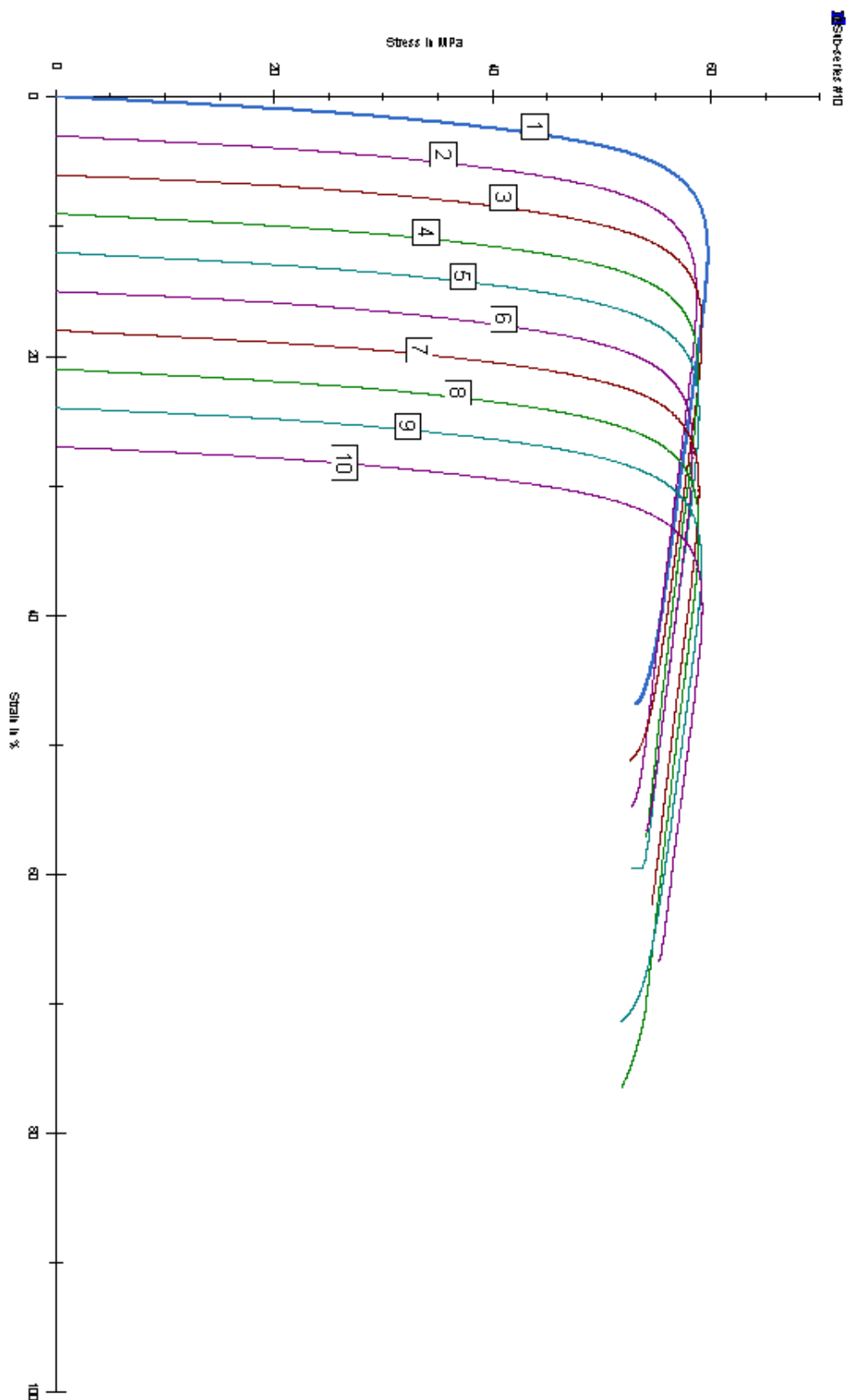




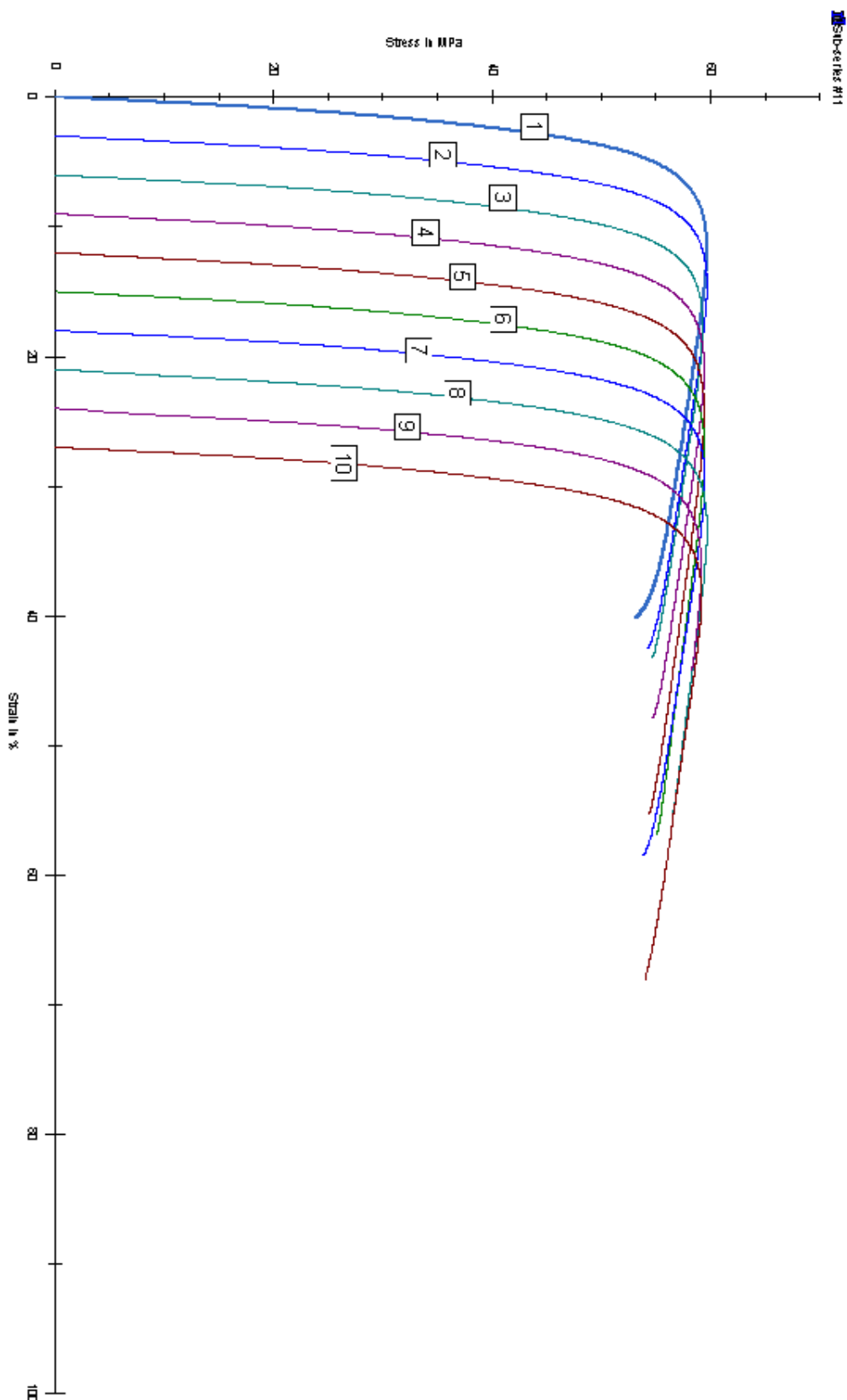
P 24: Tahové křivky normalizovaných tělísek C (působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm



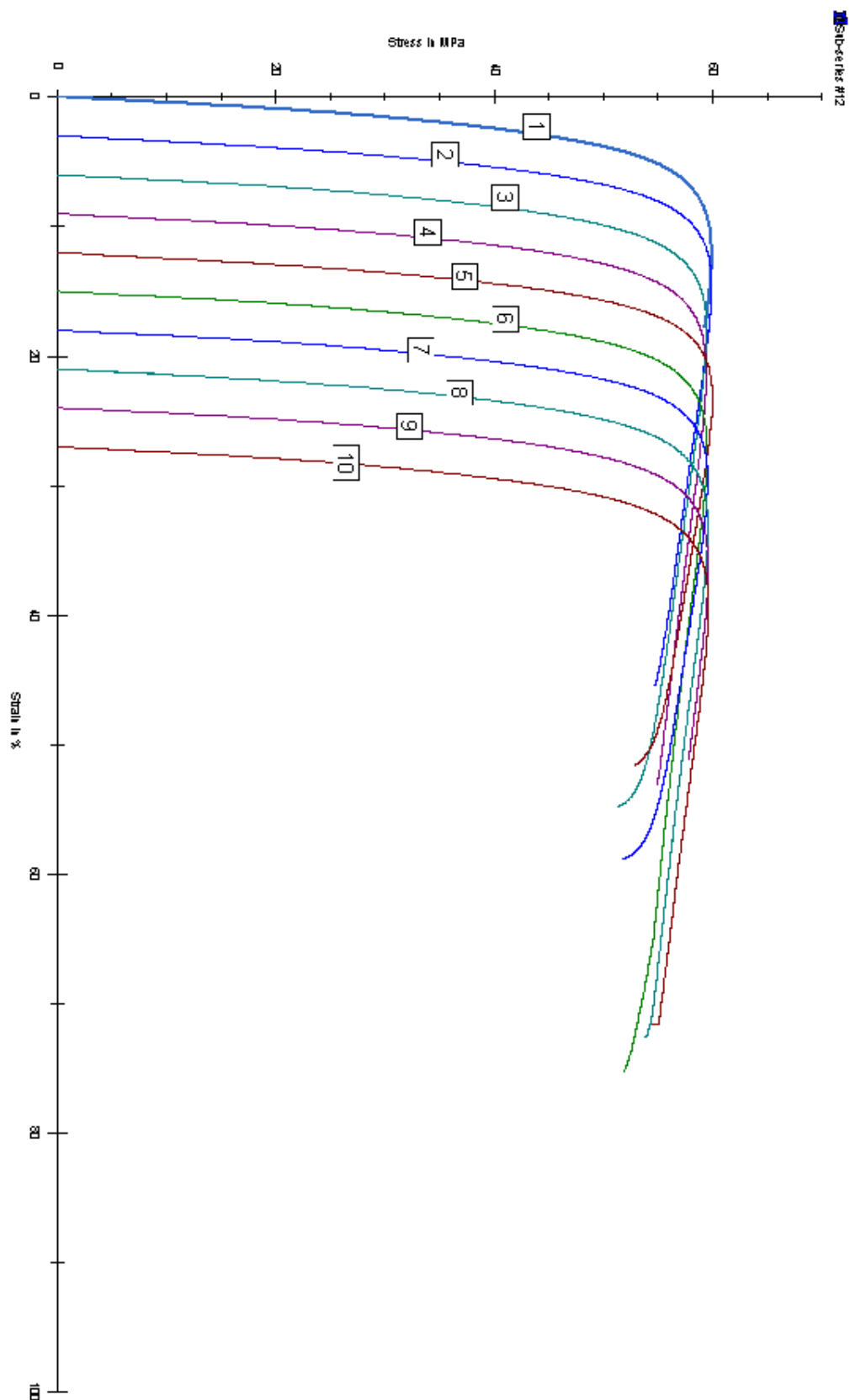
P 25: Tahové křivky normalizovaných tělísek D (působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm



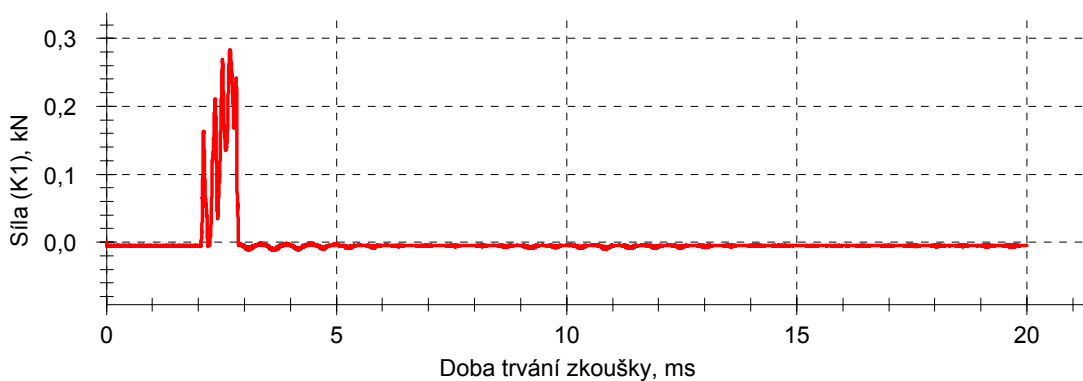
P 26: Tahové křivky normalizovaných tělísek E (působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm



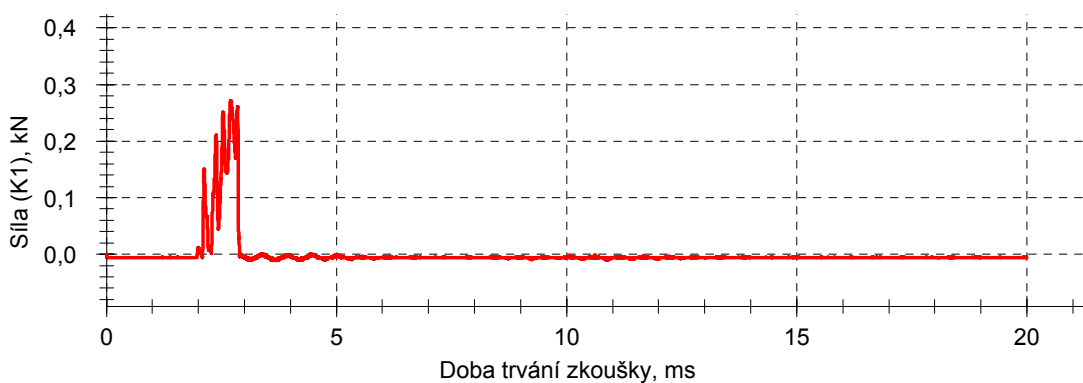
P 27: Tahové křivky normalizovaných tělísek F (působení horkého dieselu) – pro lepší přehlednost řazená za sebou po 3 mm



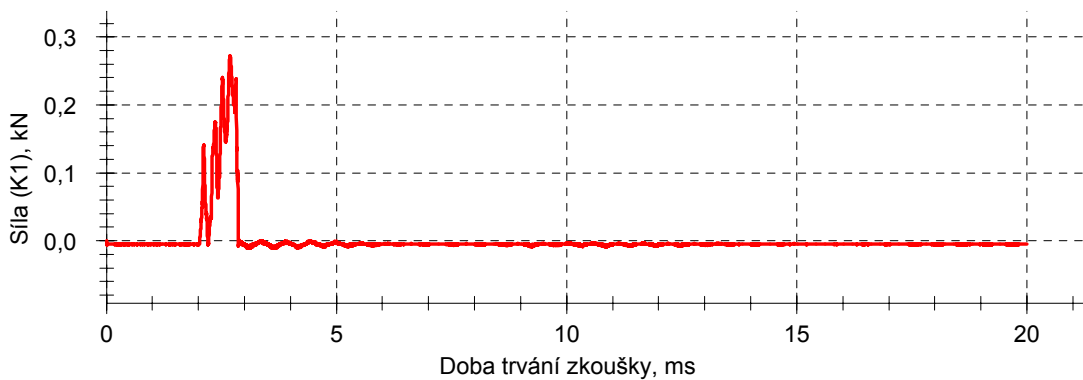
P 28: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek A – působení horkého dieselu



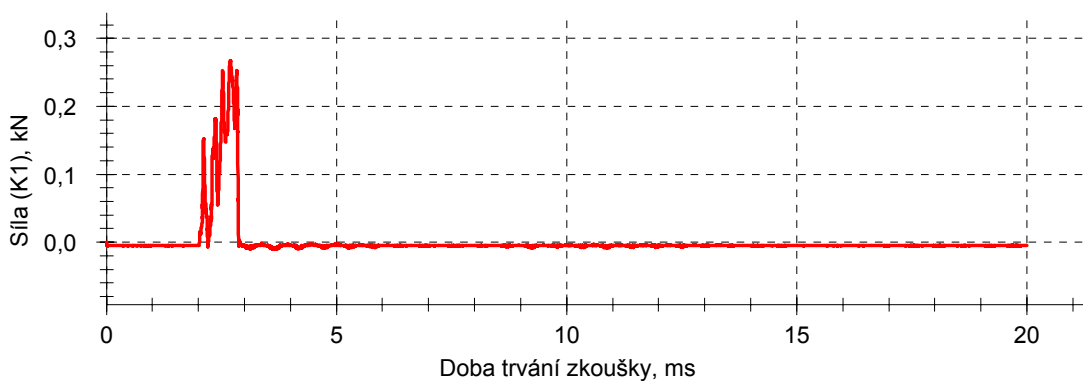
P 29: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek B – působení horkého dieselu



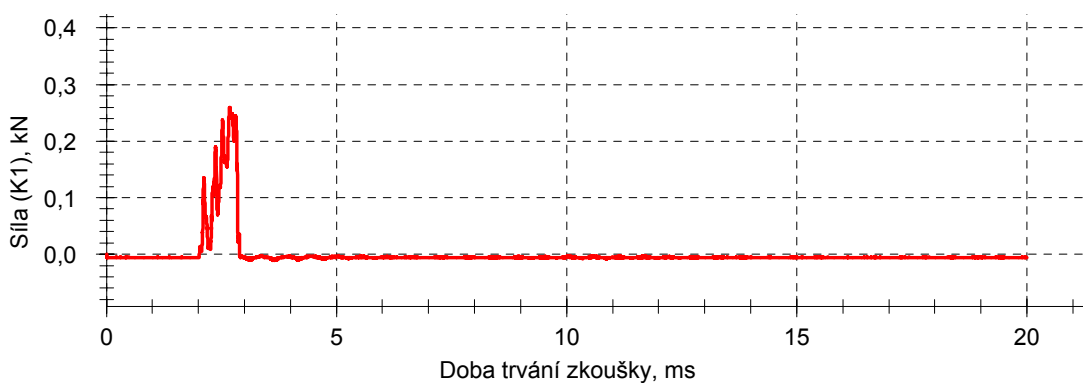
P 30: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek C – působení horkého dieselu



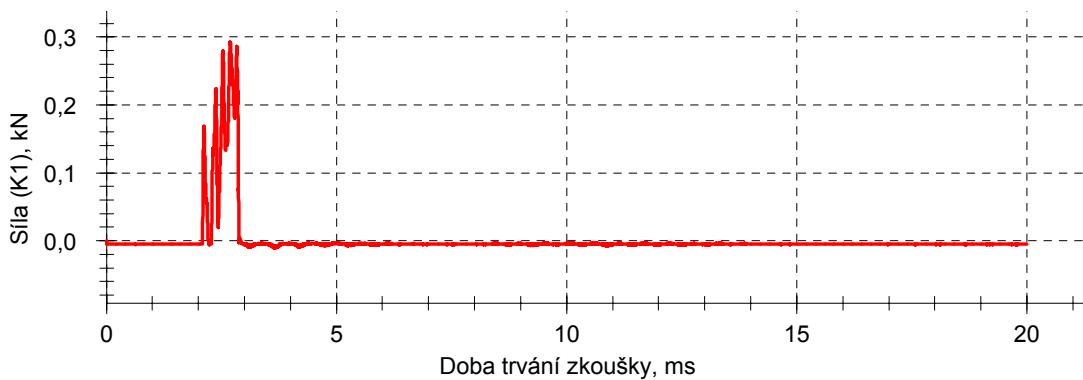
P 31: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek D – působení horkého dieselu



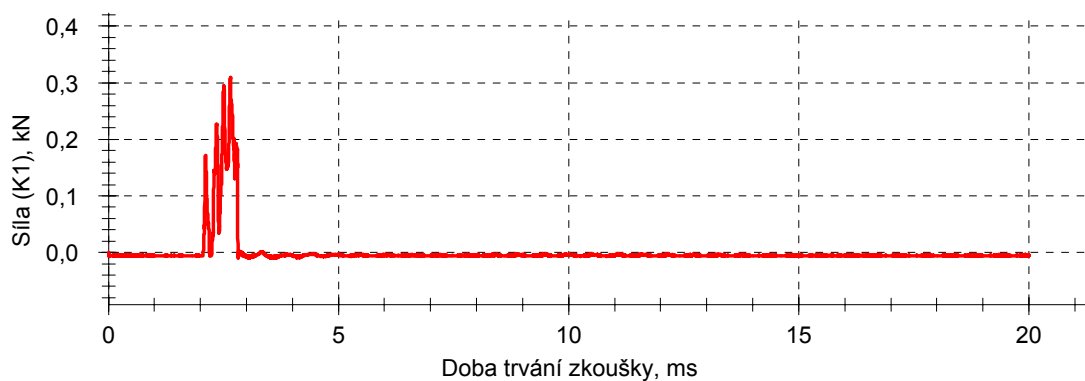
P 32: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek E – působení horkého dieselu



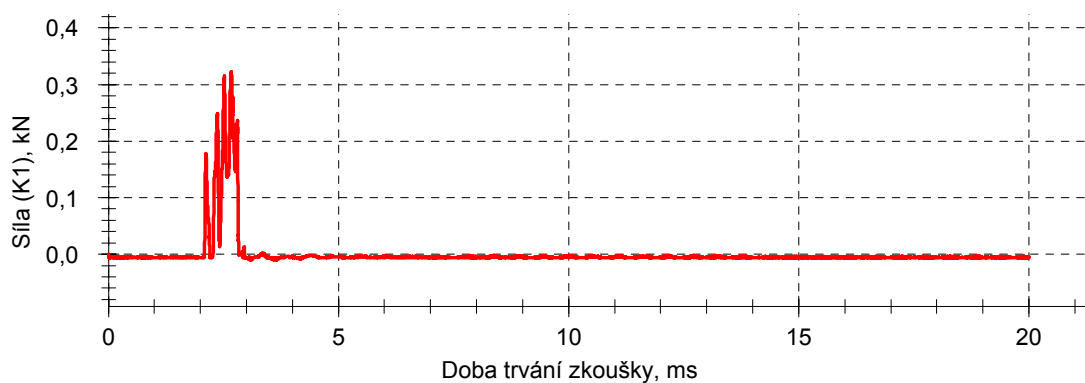
P 33: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek F – působení horkého dieselu



P 34: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek A – bez působení horkého dieselu



P 35: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek B – bez působení horkého dieselu

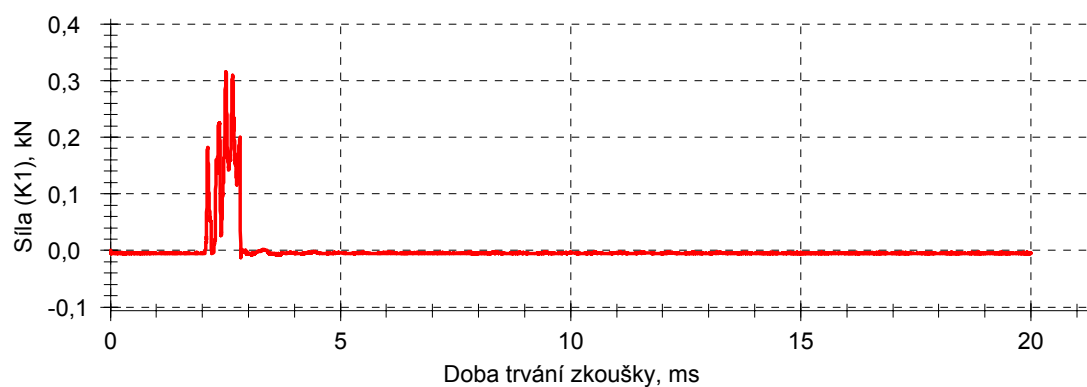


P 36: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek C – bez působení horkého dieselu



P 37: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek D – bez působení horkého dieselu





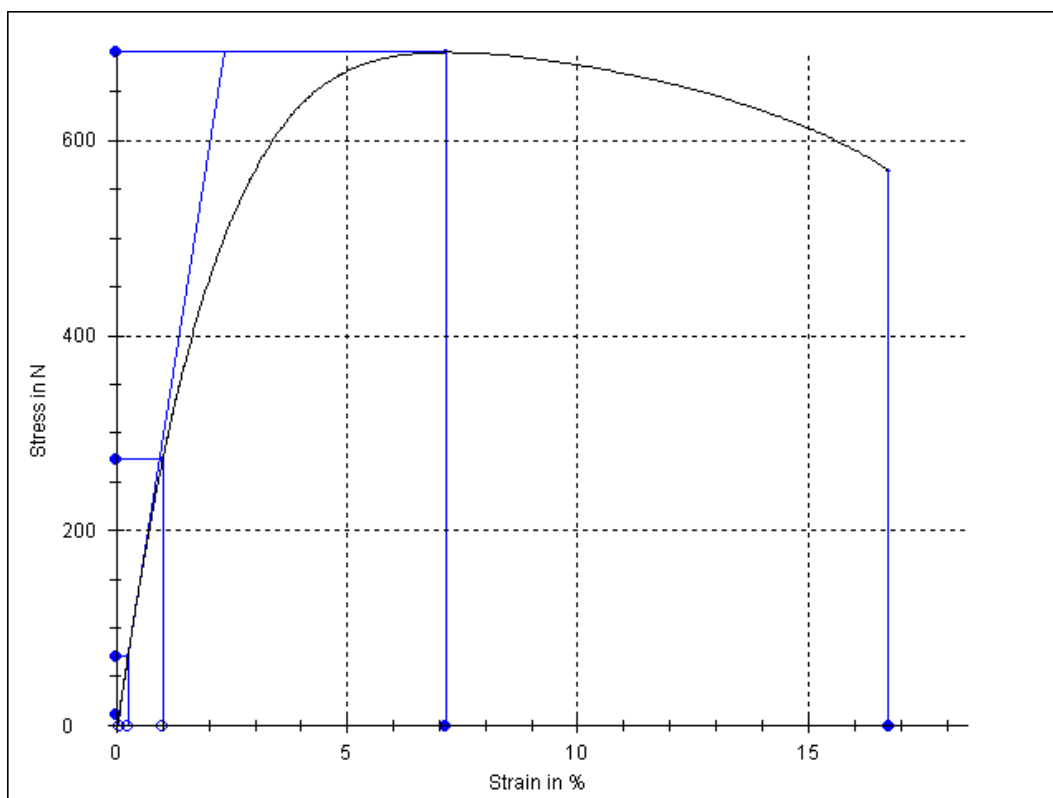
P 38: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek E – bez působení horkého dieselu



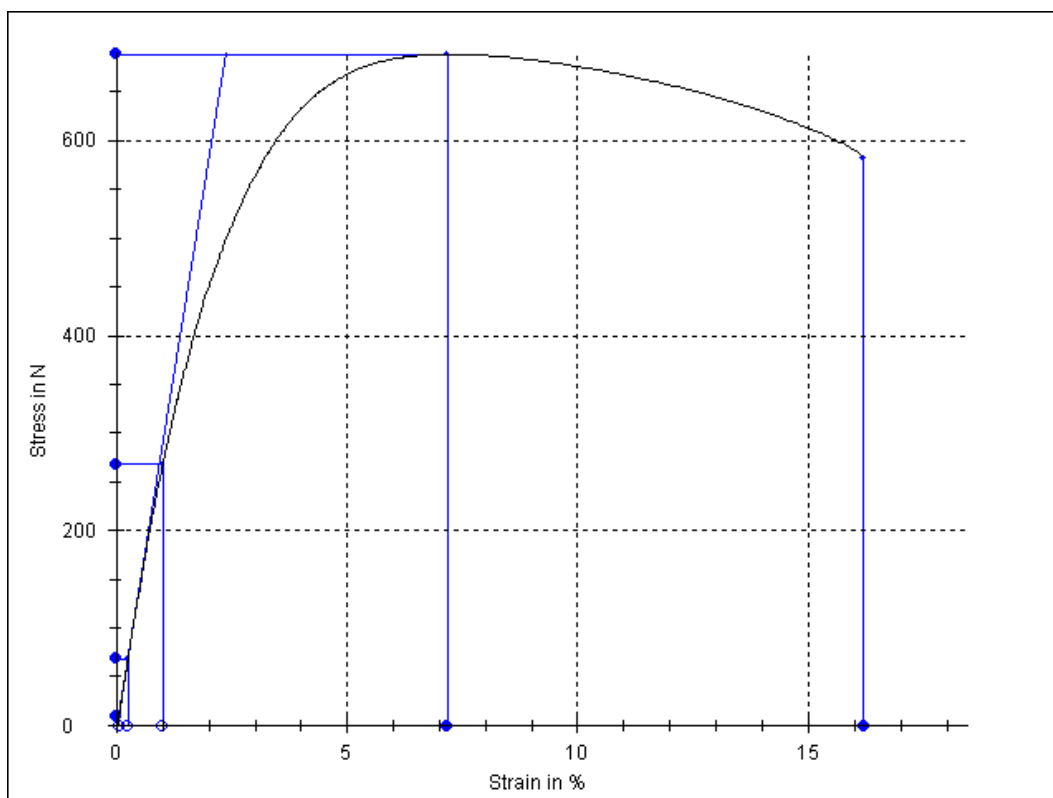
P 39: Křivka průměrných hodnot vrubové houževnatosti normalizovaných tělísek F – bez působení horkého dieselu



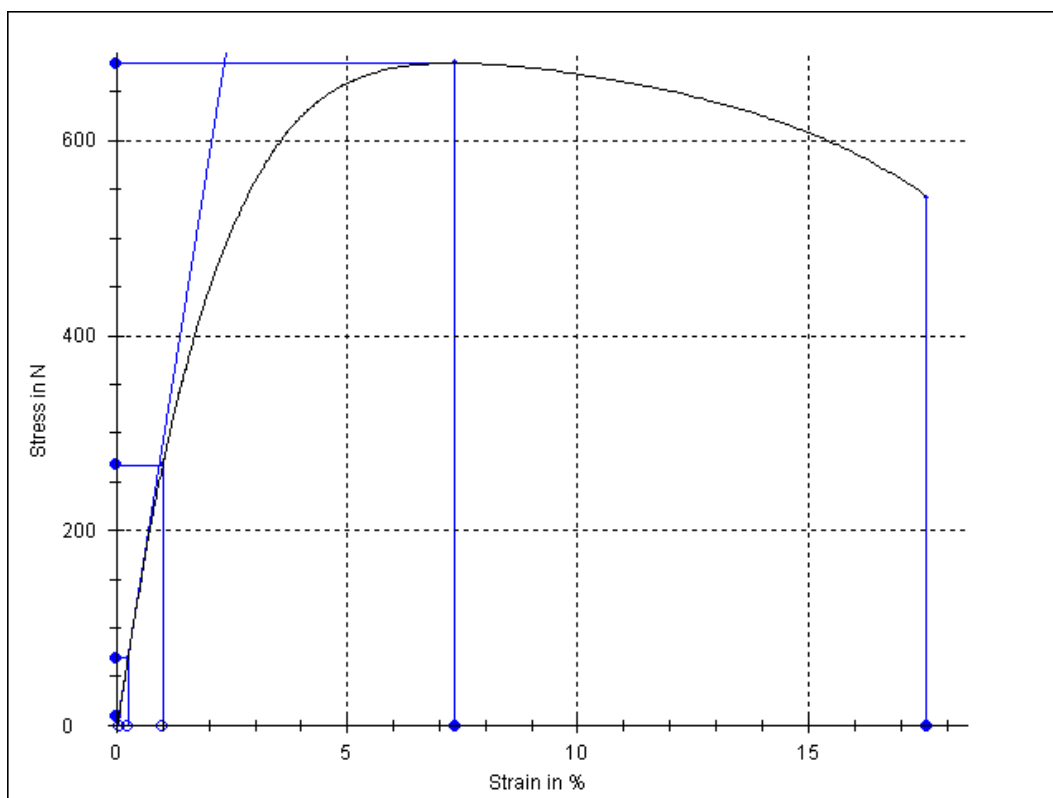
P 40: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-1 (bez působení horkého dieselu)



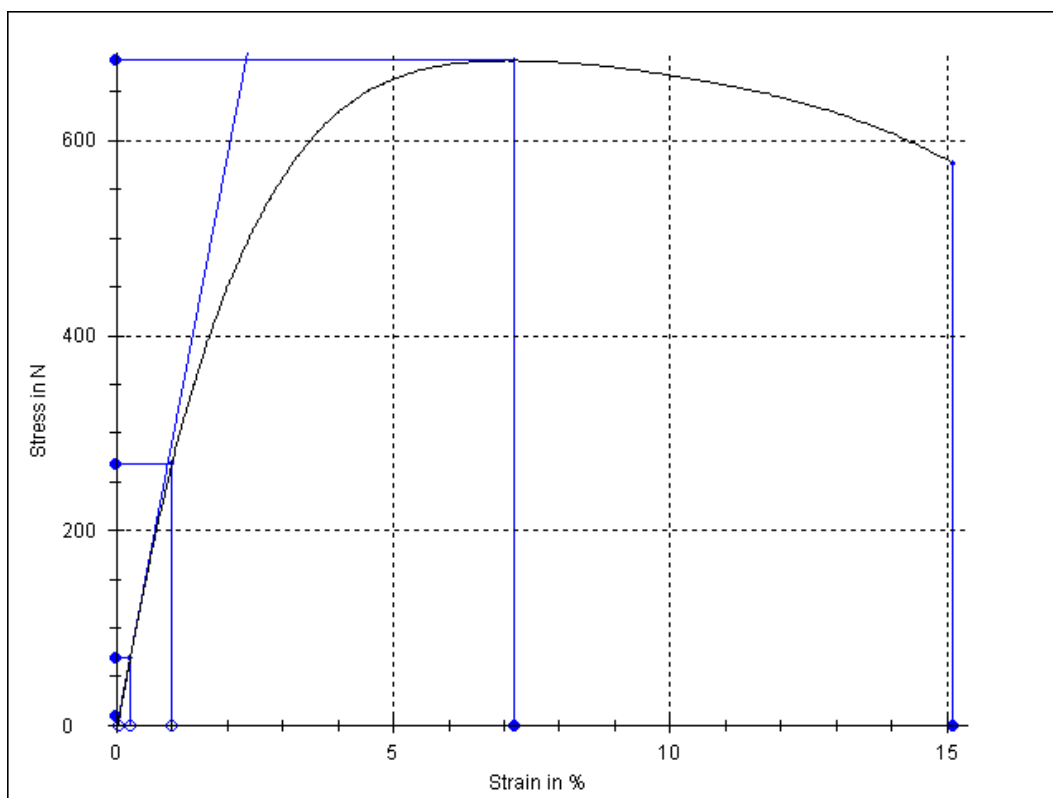
P 41: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-2 (bez působení horkého dieselu)



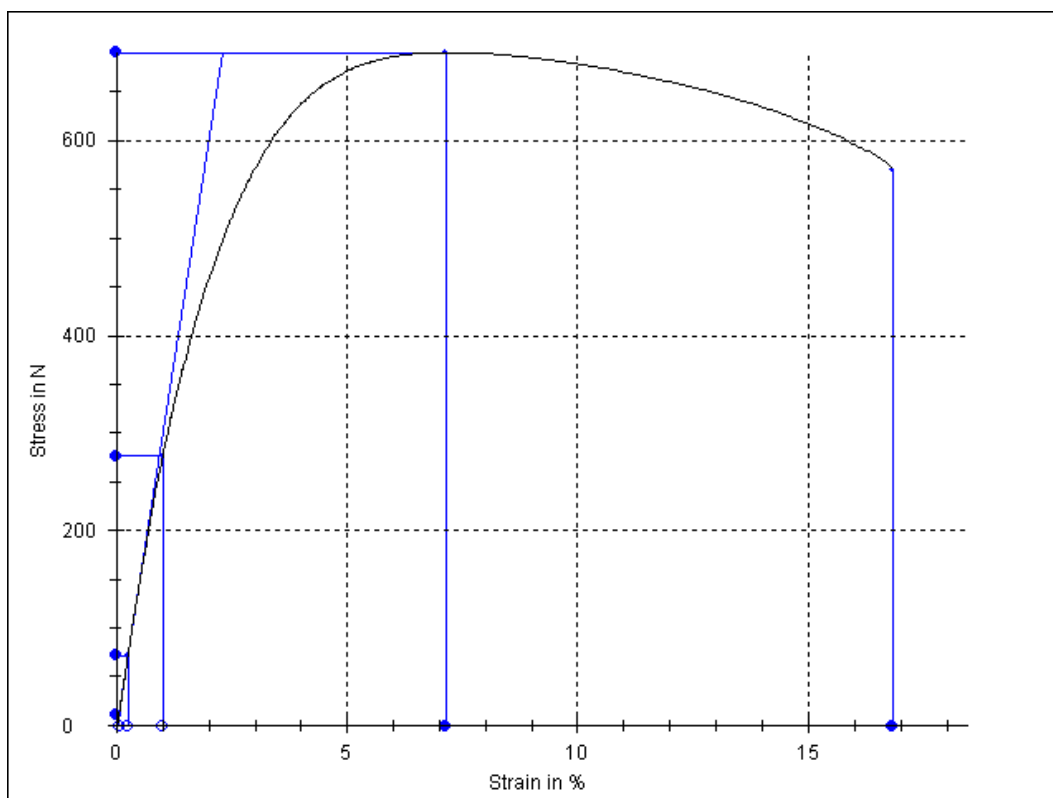
P 42: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-3 (bez působení horkého dieselu)



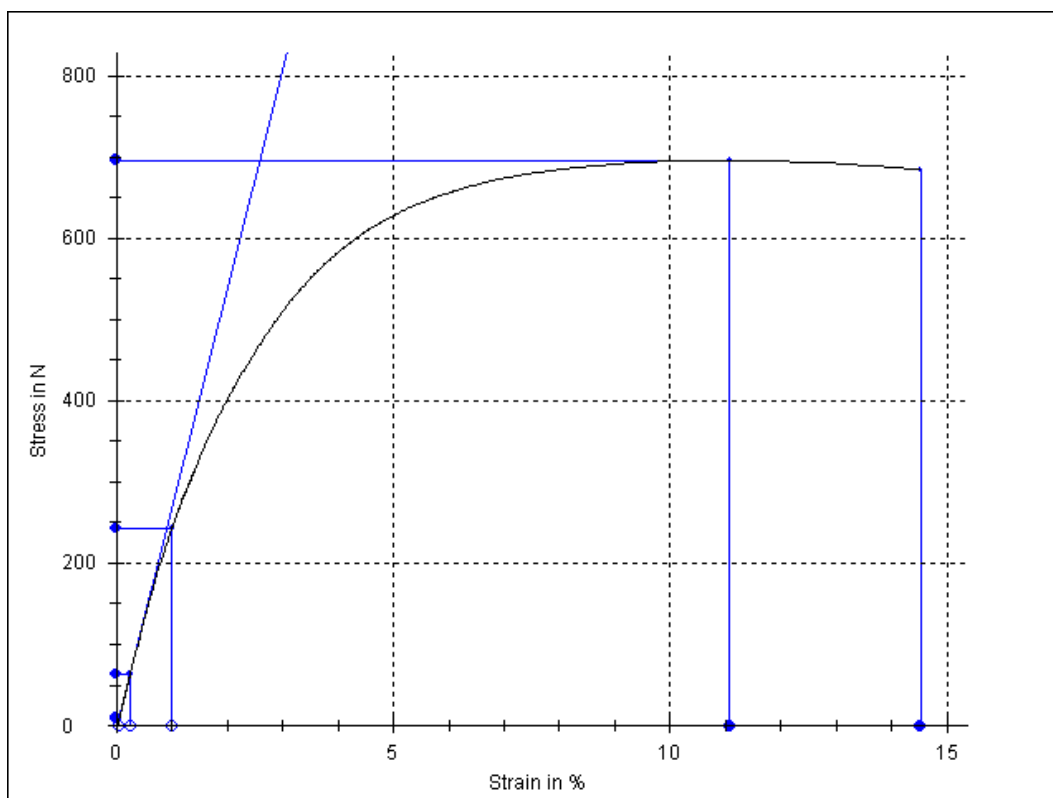
P 43: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-4 (bez působení horkého dieselu)



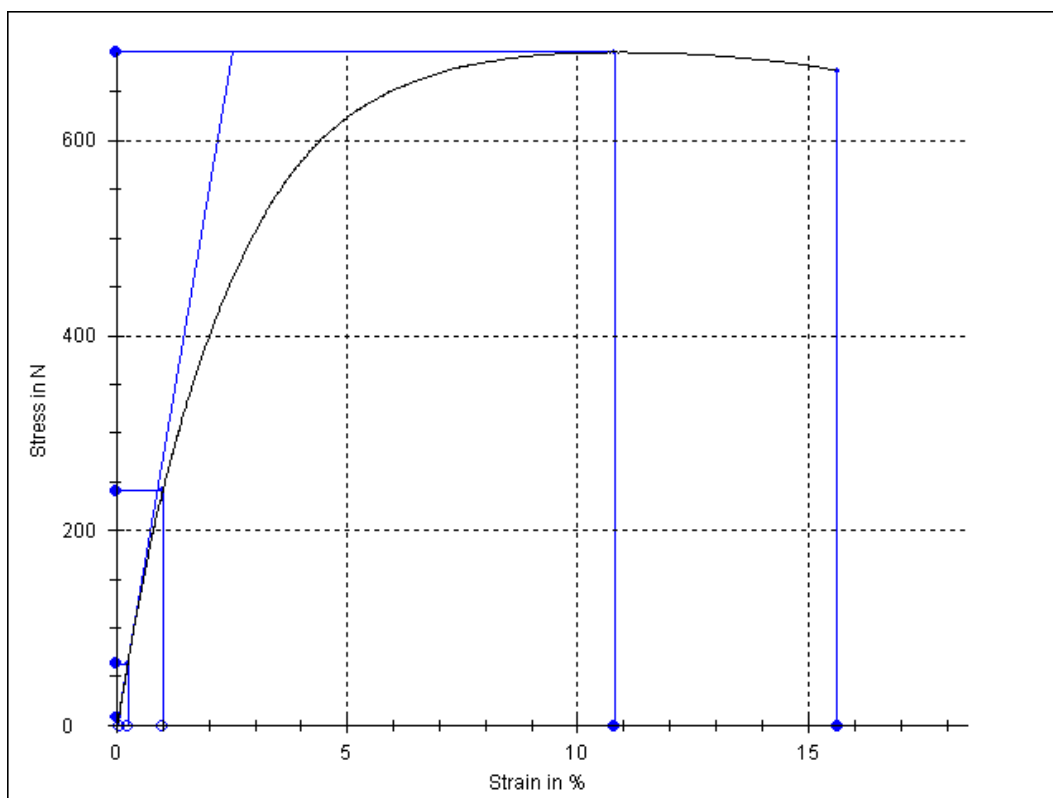
P 44: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-5 (bez působení horkého dieselu)



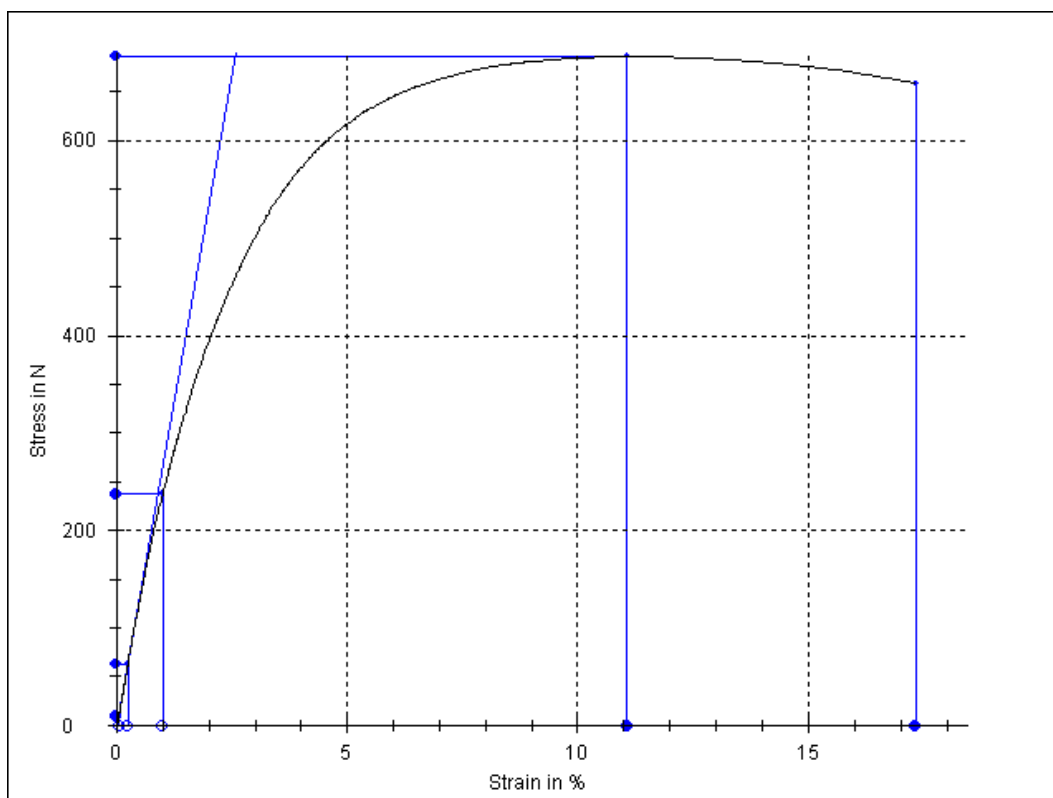
P 45: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-1 (působení horkého dieselu)



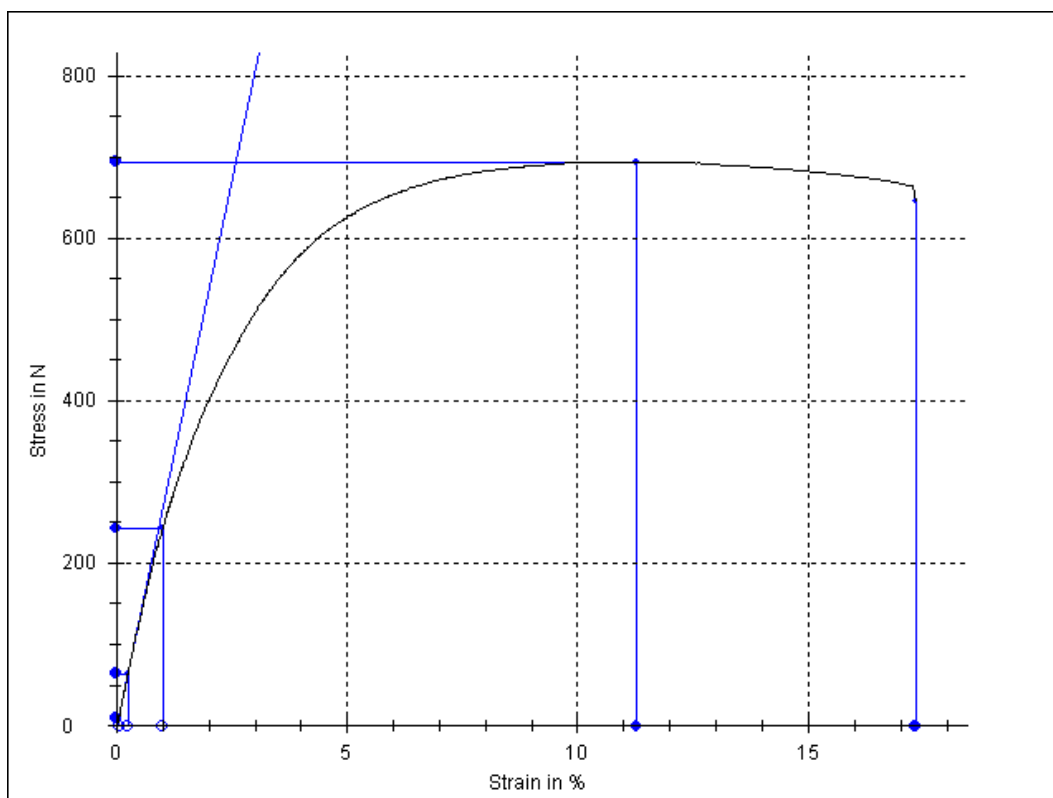
P 46: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-2 (působení horkého dieselu)



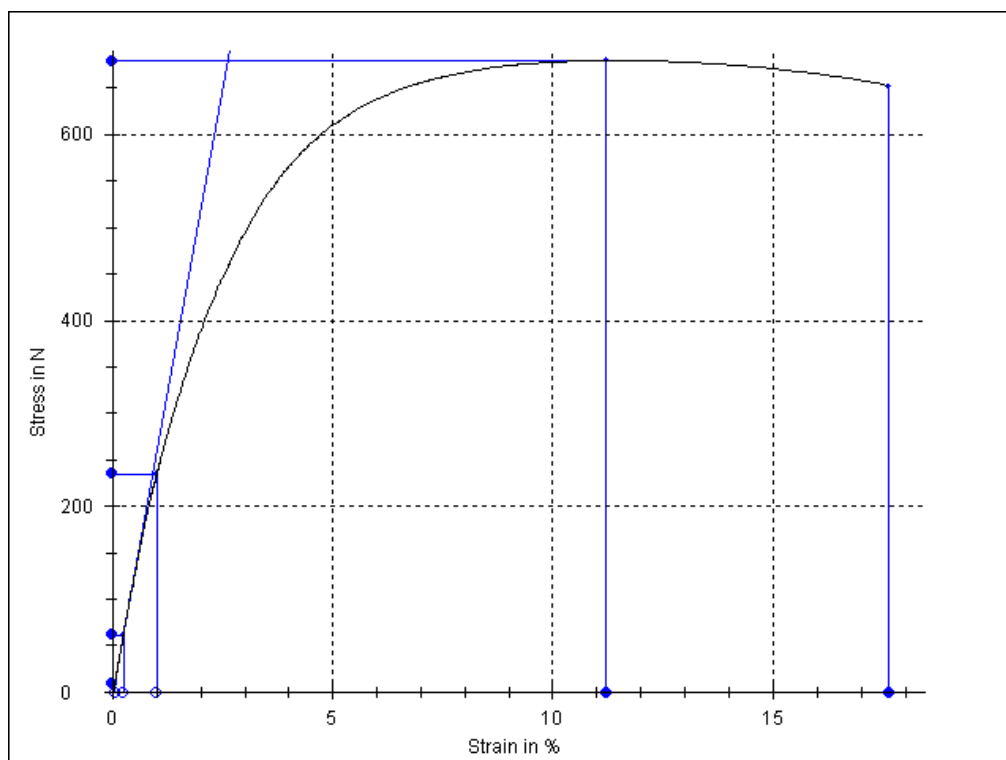
P 47: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-3 (působení horkého dieselu)



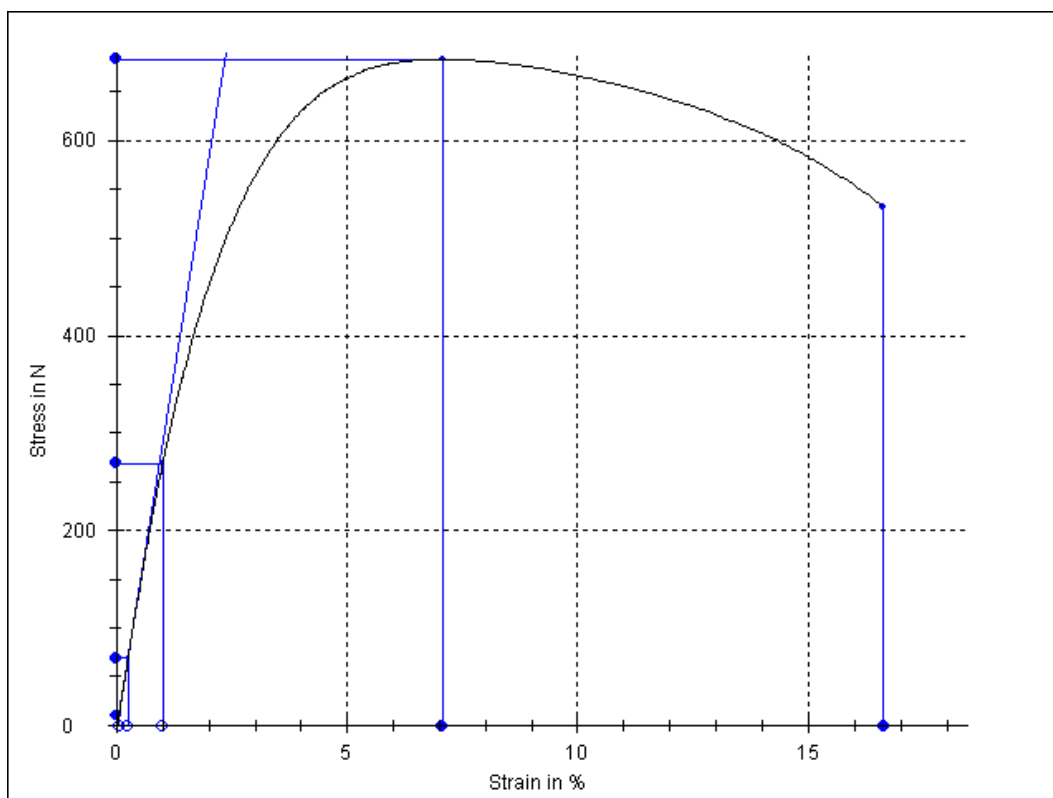
P 48: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-4 (působení horkého dieselu)



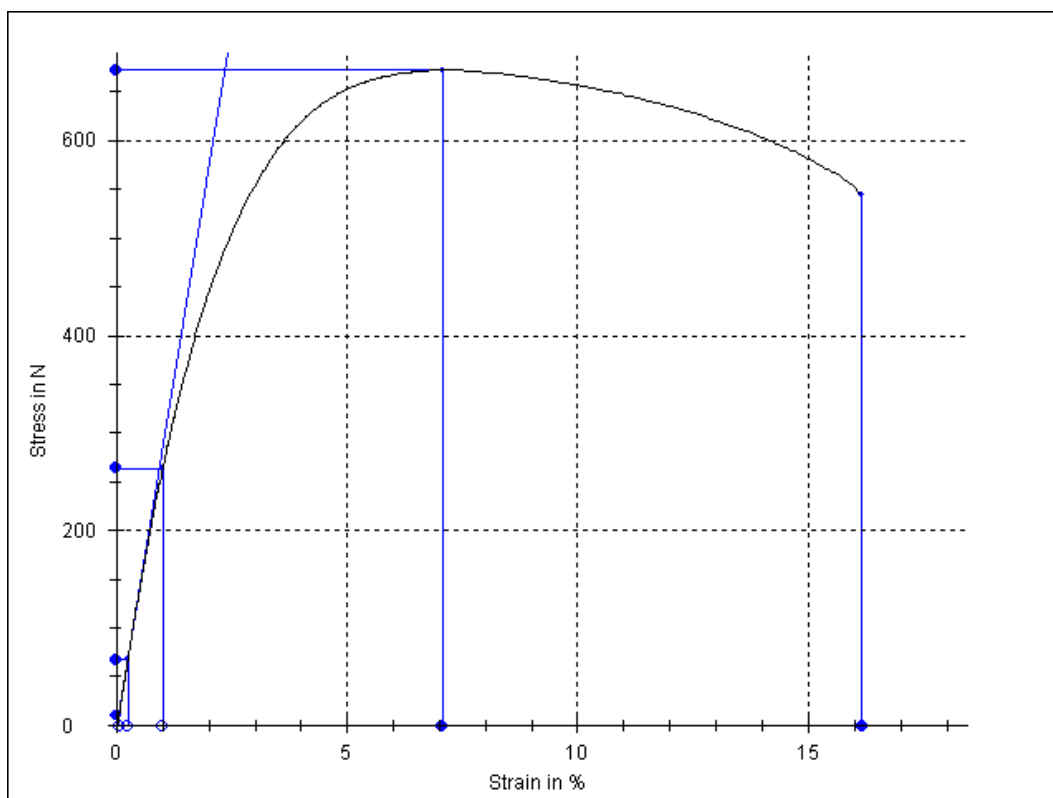
P 49: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska A-5 (působení horkého dieselu)



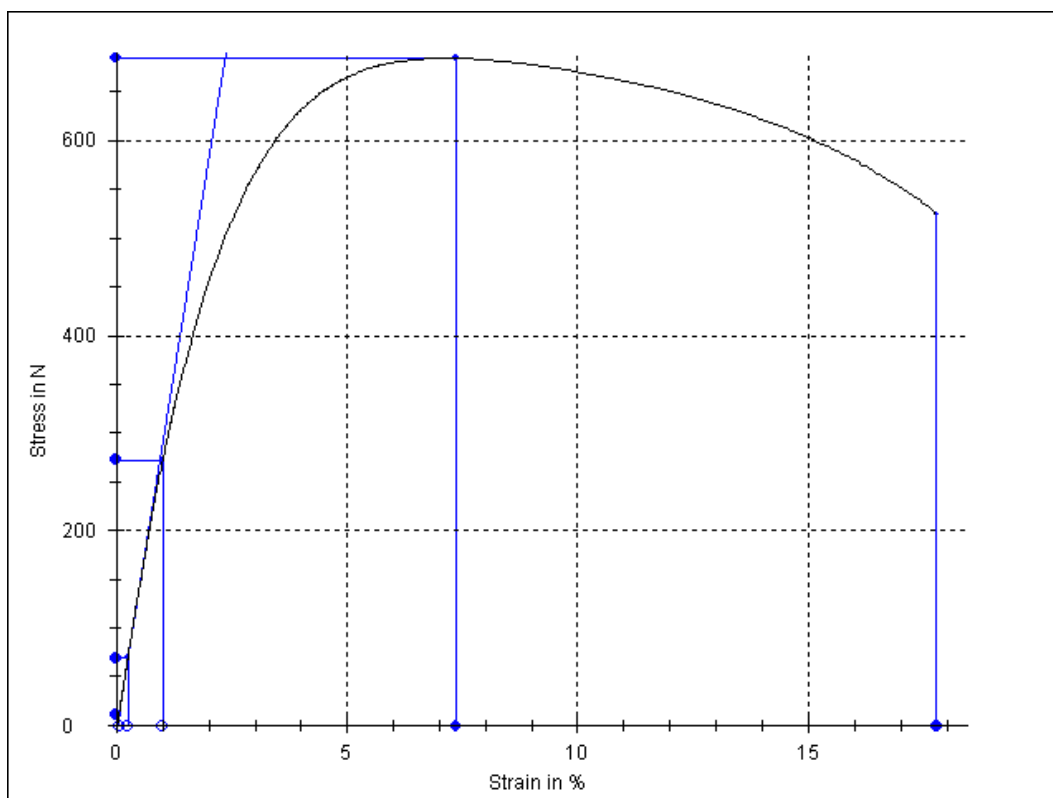
P 50: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-1 (bez působení horkého dieselu)



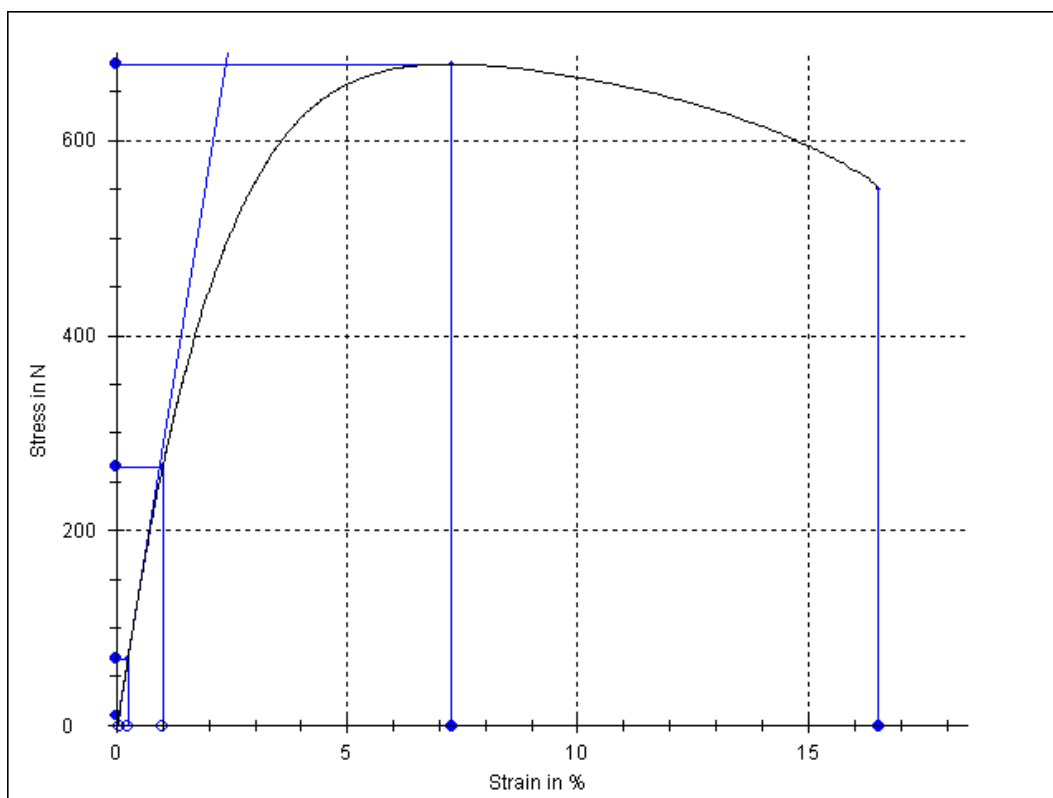
P 51: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-2 (bez působení horkého dieselu)



P 52: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-3 (bez působení horkého dieselu)

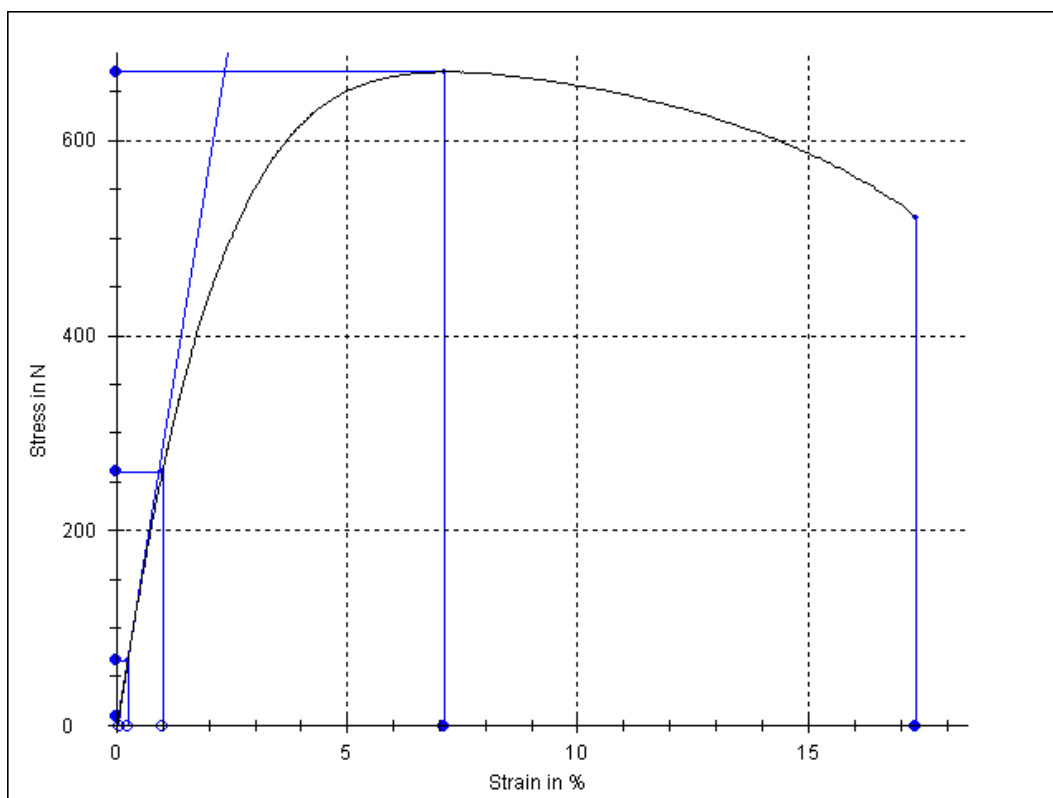


P 53: Tahová křivka nenormalizovaného tělíčka F-4 (bez působení horkého dieselu)

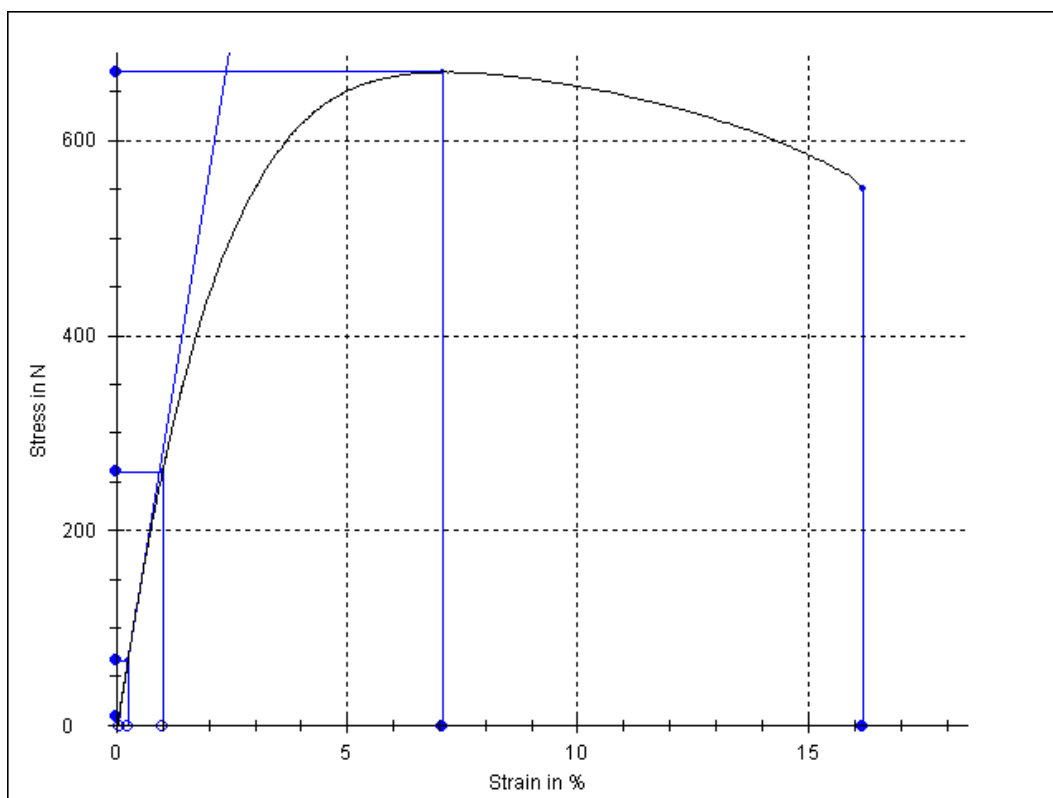


P 54: Tahová křivka nenormalizovaného tělíčka F-5 (bez působení horkého dieselu)

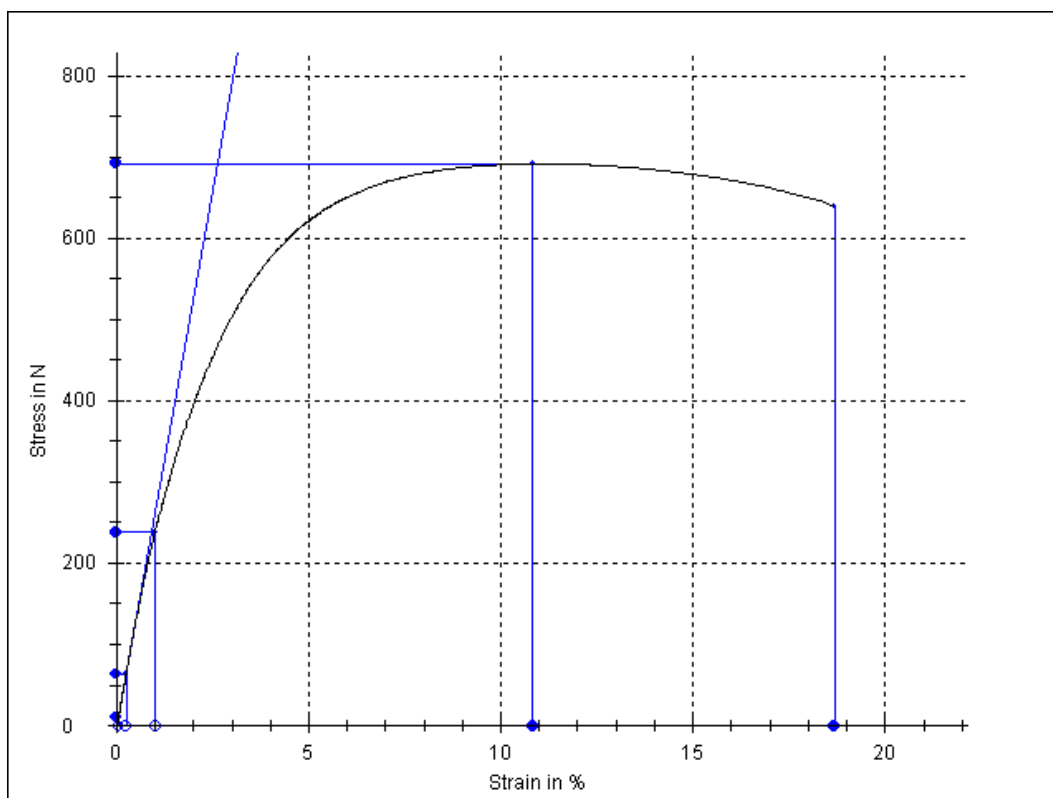




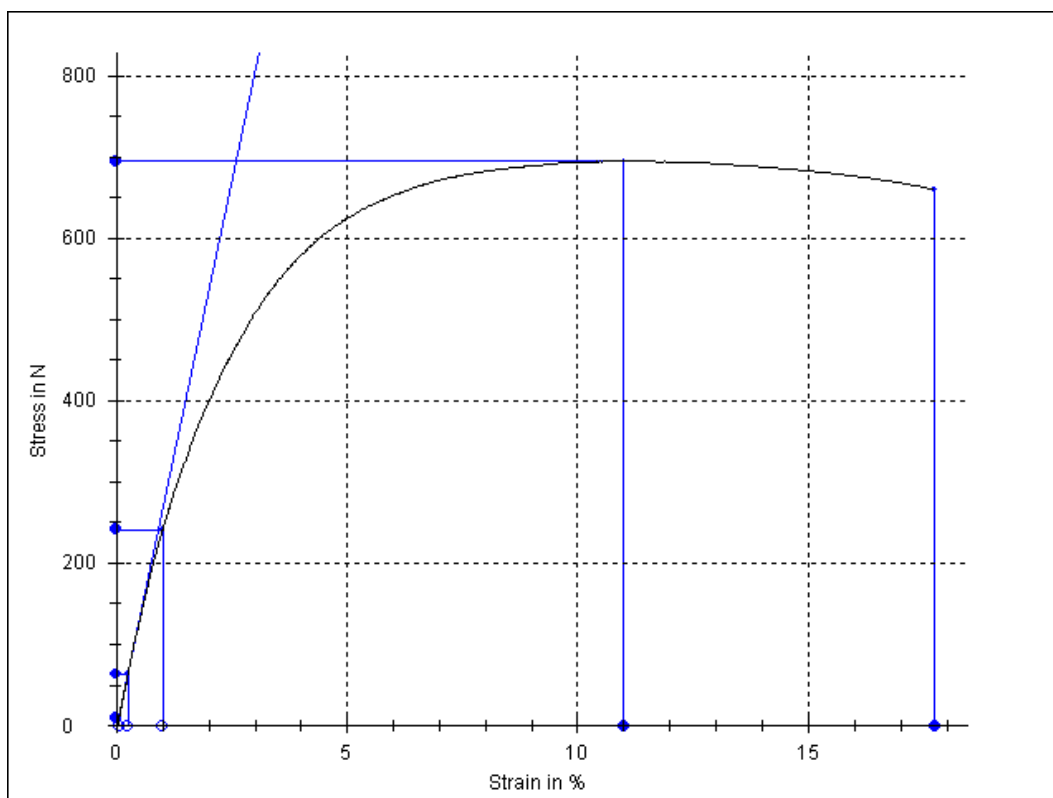
P 55: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-6 (bez působení horkého dieselu)



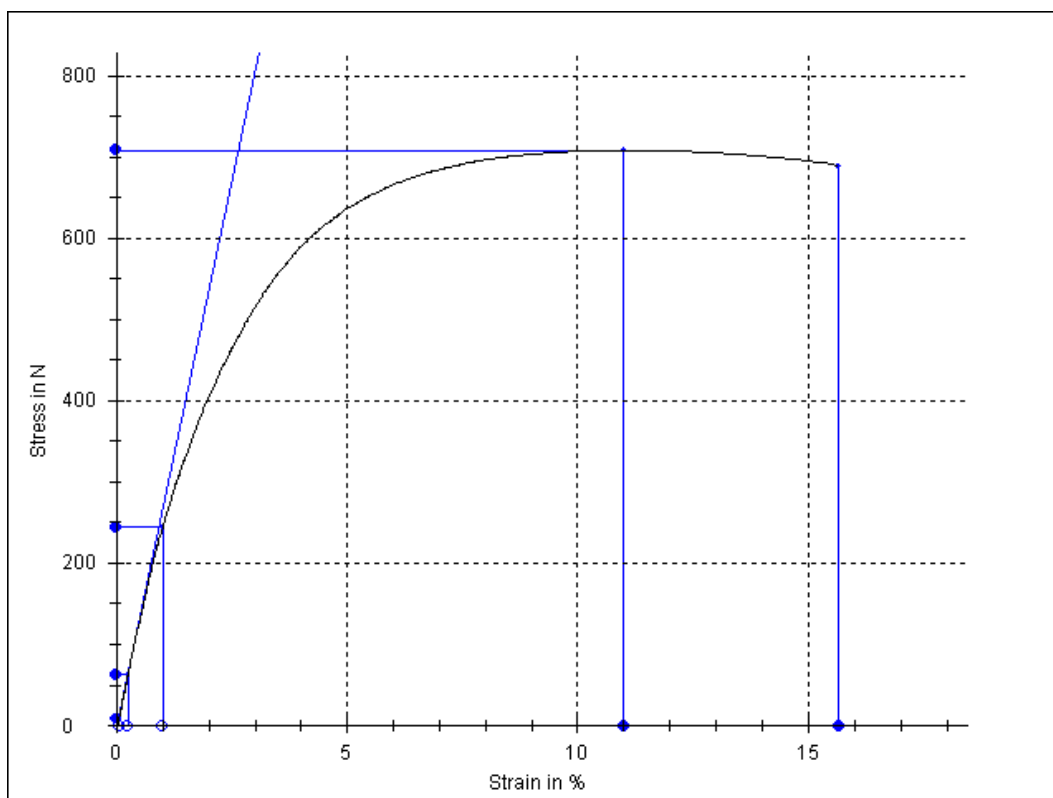
P 56: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-1 (působení horkého dieselu)



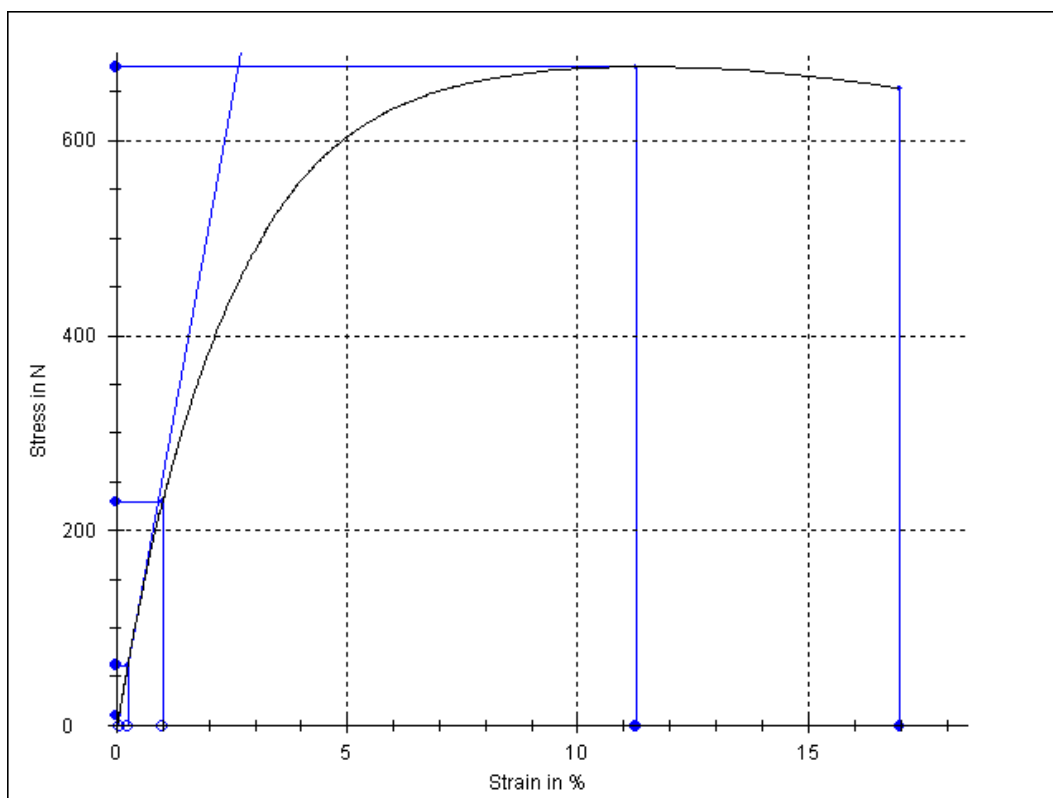
P 57: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-2 (působení horkého dieselu)



P 58: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-3 (působení horkého dieselu)



P 59: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-4 (působení horkého dieselu)



P 60: Tahová křivka nenormalizovaného tělíska F-5 (působení horkého dieselu)

