

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

**Instrumentace a vyhodnocování rázových  
zkoušek na plynovodní oceli**

(Bakalářská práce)

Jan Falta



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta dopravní  
děkan**  
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

**K618 ..... Ústav mechaniky a materiálů**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Jan Falta**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – AUT – Automatizace a informatika**

Název tématu (česky): **Instrumentace a vyhodnocení rázových zkoušek na plynovodní oceli**

Název tématu (anglicky): Instrumentation and evaluation of impact tests on pipeline steel

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- vysvětlit důležitost studia houževnatosti a přechodové teploty pro materiály určené k potrubnímu transportu plynných a kapalných surovin
- provést rešerši moderních způsobů instrumentace rázové zkoušky
- stanovit podmínky na vzorkovací frekvenci a rozpětí měřených zrychlení pro popis dějů v okamžiku přeražení vzorku
- navrhnout a vytvořit počítačově podporovaný postup zpracování dat a vyhodnocení průběhu rázu
- demonstrovat funkčnost postupu na experimentálním provedení a následném vyhodnocení průběhů rázu pro sadu vzorků plynovodních ocelí v širokém rozpětí teplot

- Rozsah grafických prací: Dle pokynů vedoucího
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Wullaert, R. (1970). Applications of the instrumented Charpy impact test. In: Impact Testing of Metals, ASTM STP, 466, pp. 148–164.
- Server, A. (1985). Charpy Impact Testing. In: ASM Handbook, Vol. 8. American Society for Metals 261–268
- T. Atkins & M. Escudier (eds.), A Dictionary of Mechanical Engineering, Oxford University Press (2013)

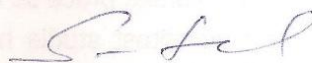
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Valach, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2014**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **24. srpna 2015**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu mechaniky a materiálů



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.



Jan Falta  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... **17. 10. 2014** .....

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb. (a jeho novel č. 81/2005 Sb. a 216/2006 Sb.) o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 24. srpna 2015

.....

Podpis

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kdo mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji Ing. Jaroslavu Valachovi, Ph.D za odborné vedení a konzultování bakalářské práce. Benu Wolfovi za sestavení měřicího zařízení a odbornou konzultaci. Dále také rozvojovému grantu 1051505F014 RPMT 2015 43e za poskytnutí technického vybavení. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

## **Abstrakt**

Cílem práce je ověření metodiky vyhodnocení zkoušky vrubové houževnatosti s využitím specializovaného zařízení pro záznam dynamiky pohybu kladiva za účelem poznání dějů v průběhu rázu a následně uplatnění této metodiky na sérii ocelových vzorků s velkým rozpětím mechanických vlastností. Metodika je porovnávána s vyhodnocením rázu pomocí optické metody využívající rychloběžnou kameru a digitální korelaci obrazu a vrubovou houževnatostí určenou standardním postupem.

Klíčová slova: Charpyho kladivo, instrumentovaná zkouška, zkouška vrubové houževnatosti, rychloběžná kamera, digitální korelace obrazu

## **Abstract**

The main aim of the work is to verify the methodology of evaluation of the notch toughness test, using specialized device to record the dynamics of motion of the hammer for the purpose of understanding the processes during impact, and then apply this methodology on a series of steel samples with a large span of mechanical properties. The methodology is compared with the evaluation of impact by an optical method utilizing high-speed camera, digital image correlation and impact strength determined by a standard procedure.

Key words: Charpy hammer, instrumented test, impact strength test, high-speed camera, digital image correlation

# Obsah

1	Úvod .....	8
	Seznam použitých zkratek .....	9
1	Úvod .....	8
2	Lomový proces .....	10
2.1	Houževnatost.....	10
2.2	Klasifikace lomů .....	11
2.2.1	Křehký lom .....	11
2.2.2	Transkrystalický štěpný lom.....	11
2.2.3	Interkrystalický štěpný lom .....	12
2.2.4	Houževnatý lom.....	12
2.3	Tranzitní lomové chování kovů .....	13
2.4	Vlastnosti ocelí plynovodní sítě.....	14
2.4.1	Požadavky na mechanické vlastnosti.....	14
2.4.2	Mez kluzu .....	15
2.4.3	Tažnost.....	15
2.4.4	Vrubová houževnatost .....	15
2.5	Materiály pro rozvodové soustavy .....	16
3	Zkoušky rázem.....	17
3.1	Rázová zkouška v ohybu.....	17
3.2	Zkouška rázem v ohybu dle Charpyho.....	17
3.3	Zkušební vzorky .....	19
3.4	Instrumentovaná zkouška rázem v ohybu .....	20
3.4.1	Vyjádření výsledků .....	20
3.5	Moderní provedení instrumentovaného Charpyho kladiva.....	22
3.5.1	Snímací metody a vyhodnocování .....	23

4	Experimentální část .....	25
4.1	Příprava vzorků .....	25
4.1.1	Ztráta hmotnosti vlivem oxidace .....	26
4.2	Měření pomocí piezoelektrického snímače.....	27
4.2.1	Interpretace dat .....	29
4.2.2	Zhodnocení metody .....	30
4.3	Měření válcovým piezoelektrickým krystalem.....	30
4.3.1	Interpretace dat .....	31
4.4	Měření tříosým tenzometrickým snímačem.....	31
4.4.1	Interpretace dat .....	32
4.5	Měření tenzometrem .....	33
4.6	Shrnutí zkušeností se záznamem dějů rázu pomocí elektrických veličin .....	34
4.7	Měření s vysokorychlostní kamerou .....	34
4.7.1	Instrumentace kamery .....	35
4.7.2	Digitální korelace obrazu.....	36
4.7.3	Naměřená data .....	37
4.7.4	Zhodnocení metody .....	41
4.8	Vyhodnocení vzhledu lomových ploch.....	42
4.9	Přehled naměřených tvrdostí.....	45
5	Závěr.....	46
5.1	Zhodnocení výsledků .....	46
5.2	Další vývoj .....	47
6	Literatura.....	48
7	Seznam obrázků.....	50
8	Seznam tabulek.....	52
9	Seznam Příloh.....	53



## Seznam použitých zkratek

BCC	krychlová prostorově středěná mřížka
KV	nárazová práce
KCV	vrubová houževnatost vzorku s V-vrubem
KCU	vrubová houževnatost vzorku s U-vrubem
DIC	digitální korelace obrazu
fps	rychlost snímání vyjádřená počtem pořízených snímků za sekundu

# 1 Úvod

Každý technický, tedy i kovový, materiál se vyznačuje základními mechanickými vlastnostmi, které určují jeho vhodnost pro použití v praxi. Ty přímo souvisí s užitnými vlastnostmi a provozní bezpečností většiny součástí a konstrukcí. Díky neustálému vývoji a inovacím se na trhu objevují stále nové typy kovových materiálů, u kterých je nutné přesně měřit jejich mechanické vlastnosti, aby bylo možné provést výběr optimálního výrobku. Samotné výrobky jsou pak vystaveny degradujícímu vlivu prostředí a namáhání, které mění jejich užitné vlastnosti v průběhu jejich užívání. Toto jsou dva příklady důvodů proč i mechanické zkoušky prochází neustálým vývojem a zpřesňováním měřicích postupů.

Navíc, když vybereme slitinu jediného konkrétního složení, lze její výsledné mechanické vlastnosti „ladit“ v širokém rozpětí vhodným použitím tepelného zpracování. Cílem zkoušení je proto ověření kvality materiálu a správnosti technologického postupu. Jeho výsledkem je zaručení spolehlivosti a životnosti koncových zařízení a konstrukcí a určení podmínek jejich bezpečného provozu. Za tímto účelem jsou vzorky materiálu vystavovány sérii zkoušek, které definují jejich základní mechanické vlastnosti, a to pružnost, pevnost a houževnatost.

Tato práce je zaměřena na rázovou zkoušku pomocí Charpyho kladiva, tedy na zjištění nárazové práce, vrubové houževnatosti a přechodové teploty od křehkého k houževnatému lomu. Oproti standardním zkouškám poskytujícím informaci o velikosti nárazové práce je instrumentovaná zkouška bohatším zdrojem poznatků o chování materiálu a procesech provázejících lom. Komerční instrumentace Charpyho kladiva je ovšem nákladná investice přesahující milion korun, a proto je zajímavým úkolem pokoušet se dosáhnout podobných výsledků jednoduššími zařízeními složenými z běžně dostupných komponent. Takové zařízení bylo vyvinuto nedávno a jedním z úkolů této práce je posoudit jeho možnosti pro případné nasazení na instrumentované zkoušky plynovodních ocelí. Jako alternativní forma instrumentace je současně prezentován způsob vyhodnocení zkoušky optickou metodou s využitím rychloběžné kamery. V obou

případech jde o vypracování metody jak analyzovat děj trvající jednotky milisekund a studovat jeho vnitřní strukturu.

Práce je organizována následujícím způsobem: Kapitola 2 rekapituluje hlavní pojmy fraktografie a lomu a také teplotní závislost houževnatosti materiálů, s přihlédnutím na speciální požadavky na oceli a materiály plynovodů, kapitola 3 popisuje metodiku provedení zkoušky rázem v ohybu a objasňuje problematiku zkušebních vzorků, včetně popisu instrumentovaného Charpyho kladiva, v kapitole 4 je shrnuta experimentální část této práce včetně přípravy vzorků a naměřených dat, a proto je stěžejní částí této práce. Kapitola 5 je pak závěrem celé práce shrnující výsledky měření a uvádějící směr, kterým se bude měření ubírat.

## 2 Lomový proces

Vznik lomu je proces jak časově, tak prostorově nehomogenní. Jako první dochází k iniciaci a vzniku trhlin v částicích, které se poruší vlivem vnějších sil. Následuje šíření trhliny materiálem za vzniku nových volných povrchů. Lomový proces může probíhat několikerým způsobem v závislosti na tom, zda má materiál k dispozici i jiné mechanismy disipace energie. V případě tvárného lomu hovoříme o vzniku dutin. Postupně se propojují jednotlivé necelistvosti a dochází k šíření trhliny rychlostí, která může dosáhnout až rychlosti šíření zvuku v daném materiálu. V případě křehkého lomu následně dochází ke snížení pevnosti a porušení meziatomových vazeb. U tvárného lomu hovoříme o kontrakci mřížky a propojování dutin. Proces je ukončen dosažením mezního stavu lomu a uvolněním elastické energie o takovém množství, které způsobí porušení součásti nestabilním lomem [1], [2].

### 2.1 Houževnatost

Houževnatost je jedna ze základních charakteristik materiálu a lze ji definovat jako odolnost materiálu vůči porušení lomem. Jedná se tedy o schopnost absorpce energie při iniciaci a šíření trhliny neboli schopnosti materiálu plasticky se deformovat. Na mikroskopické úrovni lze tuto vlastnost vysvětlit pohyblivostí a hustotou čarových poruch mřížky, dislokací. S klesající pohyblivostí dislokací klesá také schopnost materiálu plasticky se deformovat, a tedy i schopnost absorbovat energii. Důsledkem je pokles houževnatosti [2].

V technické praxi například u konstrukčních ocelí nám houževnatost určuje odolnost proti vzniku křehkého lomu, který je v technické praxi velice nežádoucí. Při procesech zpracování kovu je houževnatost také velice důležitým parametrem, určujícím měrný odpor kovu proti plastické deformaci. Což znamená, že materiály s vysokou houževnatostí se snadněji tváří, ohýbají, lisují a válcují [3].

Význam houževnatosti ukazuje i následující zobecňující úvaha: Ačkoliv je tuhost a pevnost keramických materiálů srovnatelná s těmito vlastnostmi u kovů, je to právě nízká houževnatost keramiky a vysoká houževnatost ocelí, která určuje, že v rozhodujících inženýrských aplikacích jsou používány právě kovy a nikoli keramika – to proto, že

poškození vlivem přetížení konstrukce je obvykle signalizováno předchozí plastickou deformací a samotné selhání je obvykle pomalý proces, zatímco u keramiky dojde k lomu a selhání náhle, bez předchozího „varování“.

## **2.2 Klasifikace lomů**

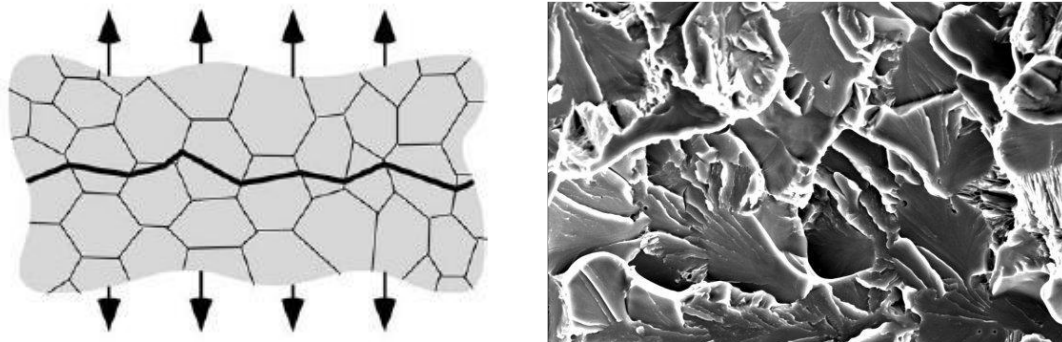
Jedním ze dvou základních hledisek při klasifikaci lomů je energetická náročnost lomu. V případě malého množství energie jde o lom křehký, v opačném případě o lom houževnatý. Druhým hlediskem při posuzování je mechanismus porušování, který je určen souborem mikrofraktografických znaků. Podle charakteru těchto znaků můžeme lomy rozdělit na štěpné a tvárné, případně na transkrystalické a interkrystalické.

### **2.2.1 Křehký lom**

Jedná se o nízkoenergetický lomový proces. Jakmile však dojde ke vzniku lomu v důsledku nakumulované energie, již není nutné dodávat další energii. Vzniklá trhlinka se šíří materiálem bez možnosti tento stav zvrátit. Nebezpečnou vlastností tohoto lomu je také fakt, že mu obvykle nepředchází žádná pozorovatelná deformace, která by upozornila na riziko lomu.

### **2.2.2 Transkrystalický štěpný lom**

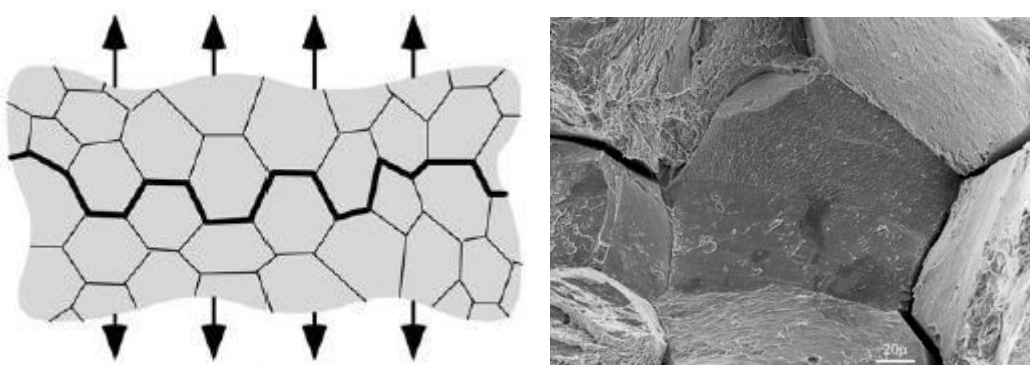
Při tomto lomu dochází k asynchronnímu porušování materiálu vlivem působení normálového takového napětí  $\sigma$  podél štěpných rovin zrn. Při tomto lomu můžeme pozorovat takzvané říčkování, které je způsobeno přechodem trhliny z jednoho zrna do druhého, přičemž dochází k interakci štěpné roviny s dislokacemi. Obecně lze průběh lomu rozdělit do tří fází, z nichž první je nukleace štěpných mikrotrhlin v důsledku mikroskopické deformace. Následuje šíření mikrotrhlin přes hranice strukturní jednotky neboli porušování meziatomových vazeb převážně podél krystalografických rovin. V závěru dojde k dosažení kritické velikosti napětí a dolomení. Výsledný lom je veden napříč jednotlivými zrny a jeví se hladký a rovinný [2],[5].



Obr. 1: Transkrystalický štěpný lom – odlišná orientace sousedních zrn / ukázka říčkování [2]

### 2.2.3 Interkrystalický štěpný lom

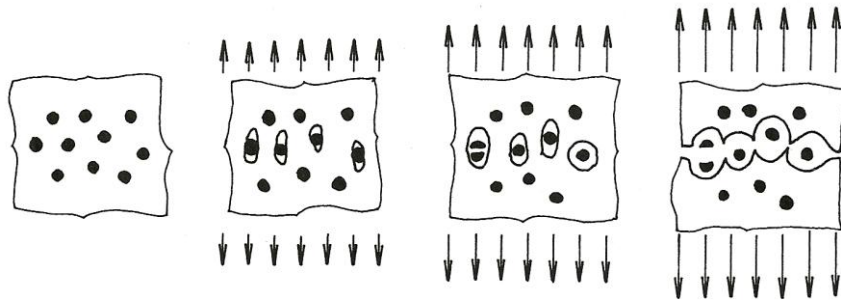
Hlavním aspektem tohoto lomu je vedení trhliny podél hranice zrn *obr. 2*. K porušení atomových vazeb dochází primárně na hranicích zrn, nikoli však uvnitř zrna.



Obr. 2: Interkrystalický štěpný lom – trhlina kopíruje hranice zrn / jednotlivá zrna [2]

### 2.2.4 Houževnatý lom

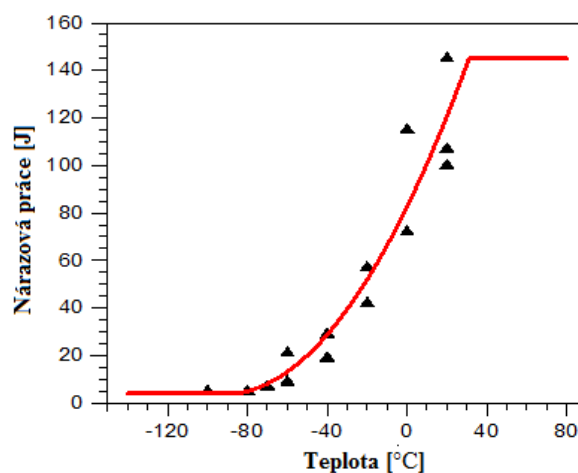
Houževnatý lom je definován jako asynchronní porušování materiálu v důsledku působení smykového napětí  $\tau$ . Průběh lomu lze demonstrovat na následujícím obrázku *obr. 3*, kde jsou znázorněny tři základní fáze lomu, a to nukleace dutin, růst dutin a následné propojování dutin a kontrakce můstků. Dutiny se při posuzování lomové plochy jeví jako důlky, proto se tvárnému lomu též někdy říká „důlkový“ [2],[5].



Obr. 3: Jednotlivé fáze tvárného lomu [2]

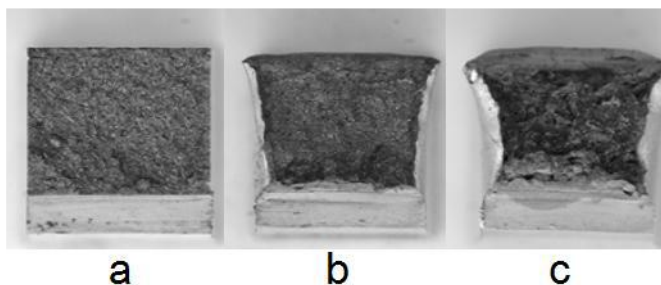
### 2.3 Tranzitní lomové chování kovů

Vlastností většiny kovových materiálů je závislost typu jejich lomu na podmínkách při namáhání. Této změně lomového chování říkáme tranzitní lomové chování, typické u mřížek BCC. S klesající teplotou a zvyšující se rychlostí deformace klesá počet skluzových systémů, neboli ubývá možností, kam se mohou dislokace pohybovat. To zapříčiňuje změnu lomového chování. Pro určitý interval teplot lze sledovat zastoupení obou výše zmiňovaných mechanismů. Toto chování lze snadno demonstrovat Charpyho zkouškou rázem v ohybu, provedenou na zkušebních hranolech s vrubem. Dostaneme tak závislost množství energie nutné k přeražení vzorku na teplotě. Této závislosti se říká tranzitní křivka *obr. 4* [2], [3].



Obr. 4: Tranzitní křivka [2]

Tuto změnu lomového chování lze také pozorovat na struktuře lomové plochy *obr. 5*. Zde je vidět zásadní rozdíl mezi štěpným lomem na *obr. 5a*, kde je obrys lomové plochy identický s původním průřezem vzorku, a tvárně porušenými vzorky *obr. 9b* a *obr. 9c* kde lze díky plastické deformaci pozorovat výraznou změnu tvaru lomové plochy.



Obr. 5: Vzhled lomových ploch [2]

## 2.4 Vlastnosti ocelí plynovodní sítě

Zvyšující se nároky na množství přepravovaného plynu v hlavních přívodních, případně tranzitních, plynovodech vedou ke zvyšování průměru plynovodu a přepravního tlaku. Tyto změny vyžadují vyšší nároky na pevnost potrubí a na pevnostní vlastnosti potrubních ocelí. Nutné je také počítat s poklesem teploty pod 0 °C v případě nadzemního potrubí, což s sebou nese odpovídající změny mechanických vlastností. V důsledku proměnného odběru plynu dochází také ke kolísání tlaku plynu, a to až 10 000 krát za životnost plynovodu. K těmto aspektům se ještě připojují stále vyšší nároky na spolehlivost a bezpečnost plynovodů. Je tedy zřejmé, že měření vlastností plynovodních ocelí je věnována vysoká pozornost [4].

### 2.4.1 Požadavky na mechanické vlastnosti

K základním požadavkům u ocelových plynovodních trubek patří minimální hodnota meze kluzu  $R_e$ , meze pevnosti  $R_m$ , maximální přípustná hodnota poměru  $R_e/R_m$  a minimální hodnota tažnosti  $A$ . U svařovaných trubek je také požadována ohybová zkouška přes svár. Požaduje se záruka vrubové houževnatosti KCV [ $J/cm^2$ ] nebo nárazové práce KV [J] při teplotě 0 °C v obvodovém nebo podélném směru vzhledem k průměru trubky [4].



### 2.4.2 Mez kluzu

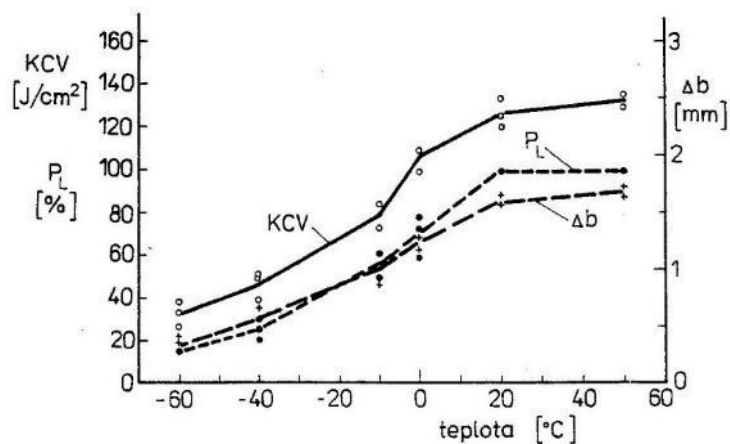
Tato nejvýznamnější hodnota pro projektování plynovodů je v našich směrnících [18, 19] stanovena na minimální hodnotu 215 MPa pro vysokotlaké plynovody ( $p = 0,3$  až 4 MPa) a 340 MPa pro velmi vysokotlaké plynovody ( $p > 4$  MPa). V zahraničních normách vč. euronormy [20] je obvykle udávána hodnota  $R_t0,5$  odpovídající celkové deformaci na měřené délce tyče 0,5%.

### 2.4.3 Tažnost

Související hodnota tažnosti  $A$  [%] se stanovuje na plochých tyčích délky  $l = 5,65(F_0)^{0,5}$ , kde  $F_0$  je průřez tyče. Poměr  $R_t0,5/R_m$  určuje deformační schopnost oceli a garantuje přetvárnou schopnost nezbytnou při deformačním přizpůsobování trubky během tlakové zkoušky případně při napěťové zkoušce [4].

### 2.4.4 Vrubová houževnatost

Z hlediska porušování potrubních ocelí nám dává vrubová houževnatost velice důležité informace, a patří tak mezi nejdůležitější charakteristiky oceli. Přispívá k tomu také skutečnost, že mnohé práce prokázaly přijatelnost korelačních vztahů mezi faktorem intenzity napětí  $K_I$  a jejich přechodové teploty  $t_{50}$  a hodnotami rázové houževnatosti (KV, KCV), včetně jejich závislosti na teplotě viz např. [21]. Rozhodující jsou v tomto případě nejnižší hodnoty nárazové práce KV [J], nebo vrubové houževnatosti KCV [ $J/cm^2$ ], při teplotě 0 °C na vzorcích s V-vrubem. Obvykle je jako závazná brána střední hodnota ze tří vzorků a minimální hodnota jednotlivá. Rovnání zkušebních vzorků není povoleno, jelikož by mohlo dojít k výraznému ovlivnění výsledků zkoušky. Ze zkoušek vrubové houževnatosti lze získat i další rozšiřující informace charakterizující porušování oceli a doplňují hodnoty KCV – obr. 6. Jedná se o plastické rozšíření vzorků  $\Delta b$  a podíl tvárného lomu na přeražených vzorcích  $P_L$ , který je jedním z doplňkových přijímacích kritérií pro trubky podle API [16], ASME [15] aj. [4].



Obr. 6: Přechodové závislosti vrubové houževnatosti KCV (t) a  $P_L(t)$ ,  $\Delta b(t)$  oceli L415 [4]

Závislost vrubové houževnatosti na teplotě KCV(t) obr. 6 by měla být součástí každé materiálové dokumentace pro úseky potrubí, které jsou vystaveny atmosférickým teplotám. [4]

## 2.5 Materiály pro rozvodové soustavy

Od materiálů určených pro přepravu plynu a dalších látek se očekává dodržení několika zásadních nároků na jejich vlastnosti a to nejen z důvodu bezpečnosti provozu potrubí ale také z cenové náročnosti případných oprav. Obecně lze tyto kritéria rozdělit do 4 základních kategorií:

- Vhodné vlastnosti - za všech předvídatelných provozních podmínek musí materiál vykazovat dostatečnou tažnost a houževnatost a předejít tak vzniku křehkého lomu.
- Chemická odolnost – během celé plánované životnosti nesmí dojít k výrazné změně chemických a fyzikálních vlastností potrubí vlivem přenášeného média.
- Životnost – během plánovaného provozu nesmí dojít k výrazné změně vlastností vlivem času.
- Technologicky kompatibilní – materiál musí být vhodný pro předpokládané technologické postupy, a to včetně vzájemného spojování různých materiálů, bez vzniku nežádoucích účinků.

K dosažení těchto kritérií se používá kromě oceli také litina, laminát, plast a speciální materiály. Většinou z důvodu snížení hmotnosti potrubí a vyšší chemické odolnosti [12].

### **3 Zkoušky rázem**

Při běžném nasazení v provozu je součást často vystavena cyklicky se měnícím silám. Síly rázového charakteru jsou velice nebezpečné, jelikož mohou iniciovat destrukci materiálu silou, která by při statickém zatížení součást nepoškodila. Pro zjištění chování materiálu při prudkých změnách zatížení se využívá zkoušky rázem.

#### **3.1 Rázová zkouška v ohybu**

Princip použití kyvadlového kladiva pro přeražení vzorku a odečtení spotřebované energie sahá do roku 1901. V tomto roce na sjezdu Mezinárodního svazu pro technické zkoušení materiálu v Budapešti, přednášel Francouz G. Charpy o stanovení houževnatosti přerážením prismatických tyčí opatřených vrubem. O osm let později bylo na kongresu v Kodani doporučeno normování Charpyho zkoušky, a díky tomu došlo k jejímu rozšíření po celé Evropě [3].

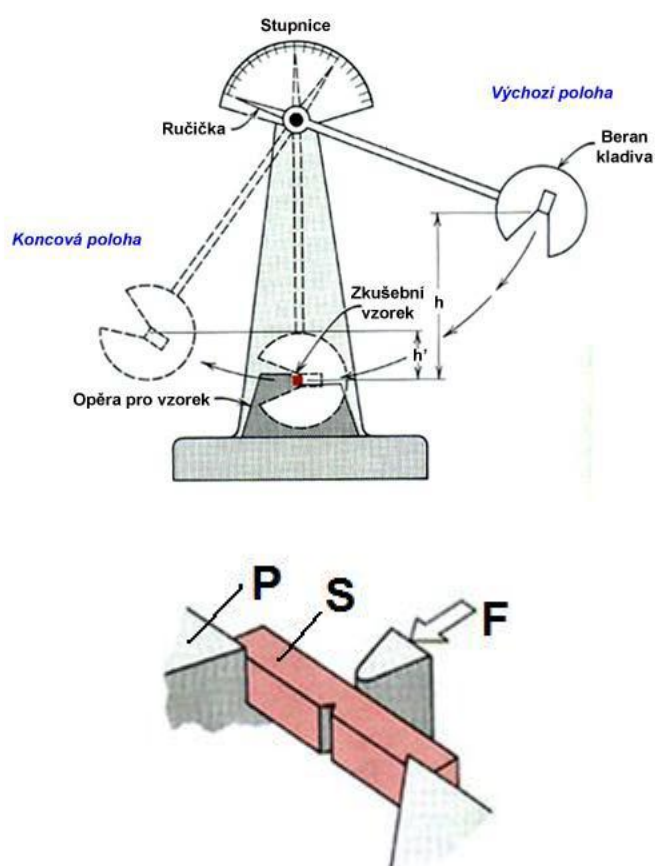
#### **3.2 Zkouška rázem v ohybu dle Charpyho**

Jak již bylo zmiňováno, cílem Charpyho zkoušky je zjistit hodnotu nárazové práce, která je potřeba k přeražení zkušebního vzorku. Zkouška musí proběhnout za určitých stanovených podmínek, které čítají:

- Teplotu zkušebního tělesa,
- způsob namáhání (trojbodový symetrický ohyb),
- rychlost namáhání,
- geometrii a tvar zkušebního tělesa (obvykle čtyřhran s rozměry 10x10x55 mm),
- tvar, hloubku a ostrost vrubu (vrub tvaru U nebo V).

Přesnou specifikací zkoušky se zabývá norma ČSN EN 10 045-1. Samotná zkouška probíhá následujícím způsobem *obr. 7*. Nejprve je kladivo zajištěno ve výchozí poloze, jejíž potenciální energie bude rovna kinetické při přerážení vzorku. Poté je mezi zarážky umístěn vzorek vrubem ve směru pohybu kladiva a co nejpřesněji v ose kladiva. V této

fázi je nutné vynulovat ukazatel nárazové práce a případně spustit další snímače, pokud jsou k dispozici. Kladivo je dále uvolněno z výchozí polohy a dochází k přeražení vzorku. K zastavení kladiva slouží povětšinou manuální brzda. Z teoretického hlediska zjistíme množství spotřebované energie z rozdílu potenciální energie kladiva ve výchozí poloze dle vztahu  $W_p = m \cdot g \cdot h$  kde  $h$  je výška umístění kladiva před zkouškou. Po přeražení dosáhne kladivo určité výšky rovné potenciální energii na začátku, snížené o energii spotřebovanou na přeražení vzorku. Tuto energii po přeražení odečteme většinou na ručičkovém ukazateli [3].










Obr. 7: Princip zkoušky zjištění nárazové práce a) schéma Charpyho Kyvadlové kladiva b) ustavení zkušební vzorku [3]

Další hodnotou, kterou lze z takto pořízených dat získat je vrubová houževnatost [1]. Tato materiálová charakteristika je definována jako podíl nárazové práce a plochy příčného průřezu v místě vrubu. Tato hodnota se označuje jako KCV, KCU2 nebo KCU3 s tím, že třetí písmeno určuje typ vrubu a číslice hloubku vrubu [3].

$$R = \frac{L_r}{S_0} \quad (\text{J cm}^{-2}) \quad (1)$$

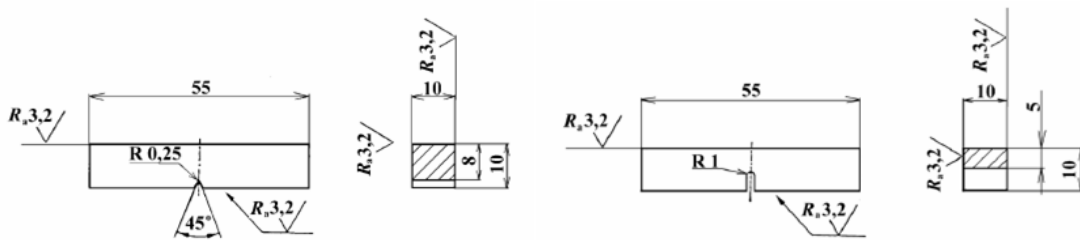
### 3.3 Zkušební vzorky

Základní typ vzorku je dlouhý 55 mm, má čtvercový průřez s délkou strany 10 mm a je opatřen vrubem v polovině jeho délky. Základní typy vrubů jsou U a V. V-vrub se používá pro materiály vykazující tranzitní lomové chování. U-vrub pak převážně na legované oceli, perlitické oceli apod. Volba vrubu má také velký vliv na výsledné hodnoty vrubové houževnatosti jak vyplývá z *obr. 8*, kde je provedena zkouška na stejné měkké oceli s rozdílnými vruby.

Vzorek	Úhel vrubu	Vrubová houževnatost [J.cm <sup>-2</sup> ]
		61
	30°	67
	60°	64
	90°	71
	120°	115
	150°	183
	180°	174

Obr. 8: Vliv tvaru vrubu na hodnoty vrubové houževnatosti měkké oceli [16]

Vliv ostrosti vrubu postupně klesá s rostoucí houževnatostí. Vrubovou houževnatost ovlivňují také další faktory jako jakost povrchu, velikost zrn kovu, orientace vrubu ke směru tváření. V případě že hloubka vrubu překročí 20% tloušťky zkušebního tělesa, rapidně klesá vliv na houževnatost. V České republice, je k základní normě ČSN EN 10045-1, vydána příloha obsahující informaci, o možném provedení zkoušky rázem, na vzorku s U-vrubem s jinou hloubkou vrubu než 5 mm (např. 2 mm a 3 mm). Také upravuje možnost použití jiné tloušťky vzorků než 10 mm (např. 7,5 mm a 5 mm), viz materiálové listy např. 416220, 417254, 417346. Tyto vzorky speciálních rozměrů včetně pojmu vrubové houževnatosti, jak byla definována výše, nejsou v souladu s platnou normou ČSN EN 10045-1. Výroba zkušebních tyčí by měla probíhat tak, aby nedošlo k ovlivnění materiálu např. ohřevem nebo tvářením za studena. Při zhotovování vrubu je důležité zamezit vzniku viditelných rýh rovnoběžných s kořenem vrubu [1], [3], [16].



Obr. 9: Zkušební tyče s a) V-vrubem b) U-vrubem [16]

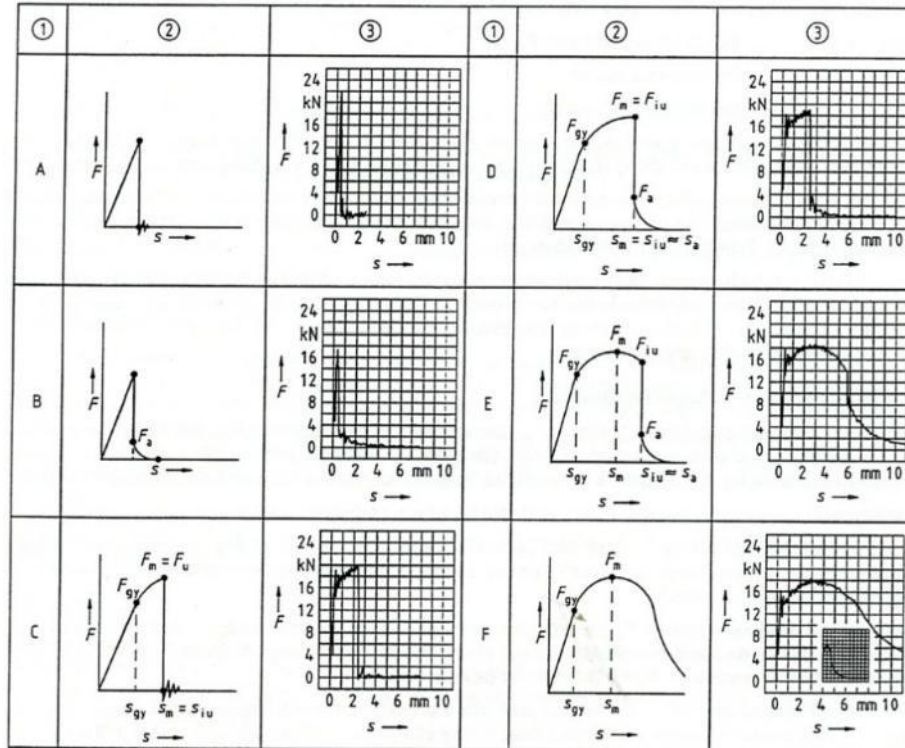
### 3.4 Instrumentovaná zkouška rázem v ohybu

Princip zkoušky spočívá v osazení kladiva senzorem, který dokáže s dostatečnou frekvencí snímat velikost nárazové síly v závislosti na čase nebo průhybu tělesa během samotného přerážení vzorku. Plocha pod takto získanou křivkou nám určuje práci spotřebovanou při lomu zkušebního vzorku. Hlavním přínosem této metody je fakt, že takto získané závislosti se mohou pro jednotlivé materiály a teploty vzorků výrazně lišit, přestože plocha pod křivkou, a tedy i nárazová práce, je stejná. Z průběhu jednotlivých částí křivky pak můžeme odvodit důležité informace o chování zkušebního vzorku. V praxi je nutné použít kyvadlové rázové kladivo podle CSN ISO 148-2 v instrumentovaném provedení s výjimkami danými CSN EN ISO 14556/A1. Používá se zkušební těleso s V-vrubem a musí být v souladu s CSN ISO 148-1 [6], [7].

#### 3.4.1 Vyjádření výsledků

Obecně můžeme naměřená data rozdělit podle průběhu křivky na několik základních typů, a tím tak usnadnit interpretaci naměřených hodnot. Tyto základní typy křivek jsou znázorněny na *obr. 10* a jejich uspořádání přibližně odpovídá vztahu k teplotní závislosti a nárazové práci.

- Typ A a B Spodní prahové hodnoty
- Typ C, D a E Přechodová oblast
- Typ F Horní prahové hodnoty



Legenda

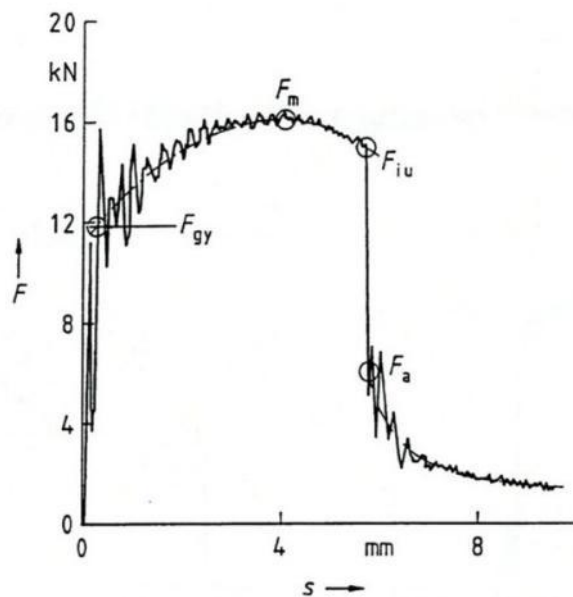
- 1 – Typ křivky
- 2 – Schématické znázornění
- 3 – Skutečná záznam

Obr. 10: Jednotlivé typy křivek síla/průhyb [7]

Křivka A ukazuje na nestabilní šíření trhliny. Křivky B, C, D a E popisují oblast jak stabilního, tak nestabilního šíření trhliny, v závislosti na rozsahu. Křivka F pak ukazuje na stabilní šíření trhliny ve vzorku. Další významné hodnoty se zjistí proložení jednotlivých úseků křivky *obr. 11* a určí se následující hodnoty:

- Charakteristická síla  $F_{gy}$  je dána průsečíkem strmé rostoucí části s křivkou, která je proložena oscilacemi po počátku kluzu.
- Maximální síla  $F_m$  je dána maximální hodnotou na křivce proložené oscilacemi.
- Velikost síly při iniciaci trhliny  $F_{iu}$  je dána průsečíkem křivky proložené oscilacemi s křivkou proloženou prudce klesající částí. U křivek C a D je  $F_{iu} = F_m$ .

- Velikost síly při zastavení trhliny  $F_a$  je dána průsečíkem křivky procházející prudce klesající částí s křivkou proloženou konečnými oscilacemi.
- Charakteristické hodnoty deformace odpovídají hodnotám na ose x pro dané síly určené dle jmenovaných zásad.
- Plocha pod křivkou v intervalu  $S = 0$  do  $S = S_m$  určuje práci odpovídající maximální síle.
- Plocha pod křivkou v intervalu  $S = 0$  do  $S = S_{iu}$  určuje práci do okamžiku iniciace trhliny.
- Plocha pod křivkou v intervalu  $S = 0$  do  $S = S_a$  určuje práci do okamžiku zastavení trhliny.
- V případě prudkého poklesu síly může činit podíl tvárného lomu v lomové ploše 100% [6], [7].



Obr. 11: Určení charakteristických hodnot z křivky síla/průhyb [7]

### 3.5 Moderní provedení instrumentovaného Charpyho kladiva

Na trhu se dnes vyskytuje řada firem zabývajících se výrobou speciálních měřicích přístrojů včetně instrumentovaného rázového kladiva použitelného nejen pro Charpyho zkoušku. Společným znakem těchto přístrojů je vysoká kvalita provedení a dodržení všech bezpečnostních norem. Všechna tato zařízení jsou vybavena ochranným krytem, bez



jehož uzavření nedojde ke spuštění zkoušky. Jedním ze zástupců těchto měřicích přístrojů je Kyvadlové rázové kladivo RKP 450 *obr. 12*.



**Obr. 12: Kyvadlové rázové kladivo RKP 450 [13]**

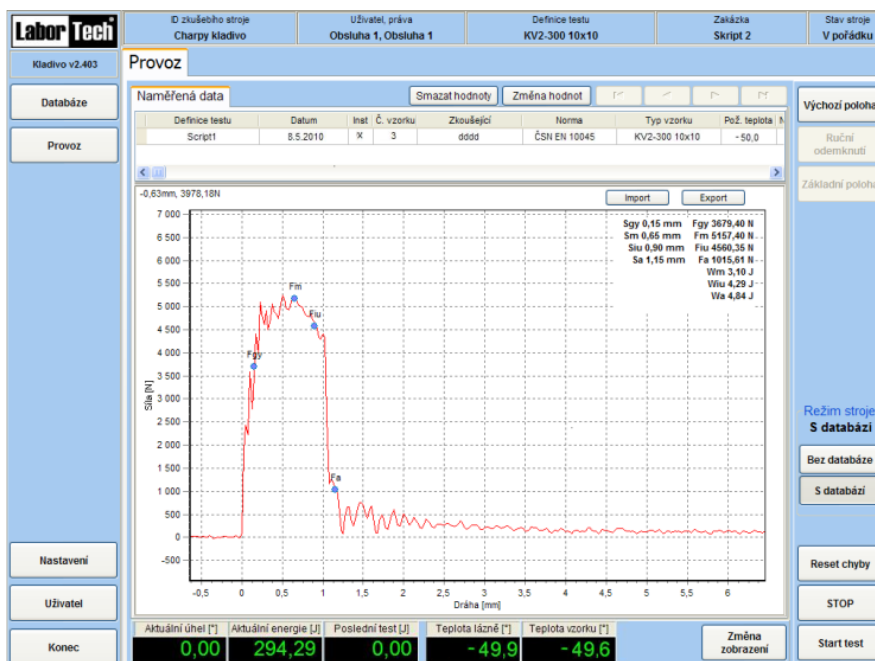
Na tomto přístroji lze provádět kromě rázové ohybové zkoušky na kovových materiálech (Charpy, Izod) také zkoušky dynamické lomové houževnatosti, instrumentovanou zkouškou rázem v ohybu, zkoušky metodou Brugger pro měření charakteristik ozubených kol, zkoušky Wedge-Impact pro hodnocení pevnostních charakteristik lepených spojů a dynamické zkoušky tahem na plochých a válcových zkušebních tělesech pro měření mechanických vlastností při dynamickém zatěžování. Kromě standardního příslušenství pro provedení výše zmiňovaných zkoušek je také možnost dokoupit PC s vhodným SW pro záznam a vyhodnocování zkoušek, případně teplotní komory, a další příslušenství. Stejně jako ostatní zařízení tohoto druhu musí splňovat bezpečnostní požadavky standardu EN 945-1, kategorie 3. Ten vyžaduje, aby selhání kterékoli z komponent bezpečnostního okruhu nezpůsobilo jakékoli riziko pro obsluhu. Což je vzhledem k dříve používaným Charpyho kladivům zásadní změna k lepšímu [13].

### **3.5.1 Snímací metody a vyhodnocování**

Pro měření průběhu sil během zatěžování je většinou použita kombinace piezoelektrického a tenzometrického snímače. Využití jednoho či druhého závisí na

konkrétním případě. Piezoelektrický snímač generuje elektrický náboj při změně zatížení, díky deformaci krystalů uvnitř snímače a neměří tedy statické zatížení. Tenzometrické snímače fungují na principu proměnného odporu vodiče v závislosti na jeho délce. Snímač je tvořen velice tenkým vodičem a musí být pevně spojen s měřeným tělesem. Měří tedy i statické výchylky na rozdíl od snímače piezoelektrického. O zpracování dat se stará velice sofistikovaný software jak je tomu například u produktů firmy LaborTech, jejich software obsahuje, profesionálně navrženou knihovnu testovacích metod, automatické vyhodnocení instrumentované zkoušky, přizpůsobení pro dotykové LCD monitory, automatické ukládání průběhů instrumentace, databáze výsledků, statistické funkce a další.

Kromě standardních součástí je také možné dokoupit řadu příslušenství, které usnadňují práci případně umožňují provedení rozšiřujících testů. Mezi tyto doplňky patří interaktivní ovládací panel, výměnné břity a podpěry, teplotní a chladičí komory od 400 °C do -196 °C, zásobníky na vzorky dle ČSN EN ISO 148-1, robotická centra s automatickým zakládáním vzorků, vysokorychlostní kamery, automatizace zkoušení, optická kontrola vzorků (vrubů), možnosti nastavení různého výchozího úhlu a rychlosti kladiva v rozsahu 3,7 až 5,5 m/s, vyměnitelné kladiva 150 J, 300 J, 450 J, vrubovačka vzorků a teploměr.[14]



Obr. 13: Charpyho kladiva série CHKI- Instrumentace [14]

## 4 Experimentální část

Cílem experimentu bylo naměřit průběh nárazové síly v čase na sadě vzorků rozdílných materiálových vlastností a demonstrovat tak možnost provedení instrumentované Charpyho zkoušky s využitím základního Charpyho kladiva osazeného piezoelektrickým snímačem. Za tímto účelem bylo na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky sestrojeno zařízení pro vysokorychlostní záznam z piezoelektrického snímače a byl napsán příslušný software pro ovládání zařízení a ukládání dat. Jako testovací vzorky byly zvoleny kvádry z oceli 12 050, viz příloha B, o rozměrech 55x10x10 mm s V-vrubem vytvořeným frézováním. Celé měření proběhlo na Charpyho kladivu s nárazovou energií 150 J při vypouštění z metrové výše. obr. 14. Hmotnost kladiva je 18,75 kg s ramenem o délce 825 mm.



Obr. 14: Charpyho kladivo na ÚTAM AV ČR

### 4.1 Příprava vzorků

Jednotlivé vzorky byly označeny důlčičkem na obou stranách tak, aby bylo možné rozlišit jednotlivé části i po přeražení. Následně byla provedena tepelná úprava na vybraných vzorcích zakalením při 850 °C a následným popuštěním při 100, 200 a 300 °C. U takto připravených vzorků byla provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse a změřena hloubka vrubu.



Obr. 15: Tepelná úprava vzorků v laboratorní peci

#### 4.1.1 Ztráta hmotnosti vlivem oxidace

Během ohřevu pro zakalení vzorku byl pozorován vznik velkého množství okují, které v okamžiku rychlého zchlazení vzorku ve vodní lázni ztratily veškerou soudržnost se vzorkem a došlo k jejich oddělení. Vzorek tedy přišel o část své hmotnosti a zmenšil se jeho průřez, což by mohlo vést k úvahám, do jaké míry je vzorek touto úpravou změněn. Ke zjištění velikosti tohoto úbytku bylo provedeno následující měření. Před vložením vzorku do pece byl zvážen na digitální váze s přesností  $10^{-4}$  g včetně žihacího kelímku, ve kterém byl uložen. Po vyžhání proběhlo zvážení vzorku kvůli nárůstu hmotnosti vlivem navázání vzdušného kyslíku, poté byly separovány okuje do žihacího kelímku a ten opětovně zvážen. Naměřené hodnoty byly následující: hmotnost vzorku  $m_v = 42,2609$  g, hmotnost vzorku po žihání  $m_{v+} = 42,3284$  g, hmotnost okují  $m_o = 0,2737$  g a plocha vzorku  $23,4808$  cm<sup>2</sup>. Ze vztahu [2] dostaneme hmotnost oxidů železa, které tvoří hmotnostní přírůstek vzorku. Následně ze vztahu [3] dostaneme hmotnost Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, který tvoří zoxidovanou část vzorku.

$$m_{FeO} = m_{v+} - m_v \quad (2)$$

$$m_{FeO} = 42,3284 - 42,2609 = 0,0675g$$

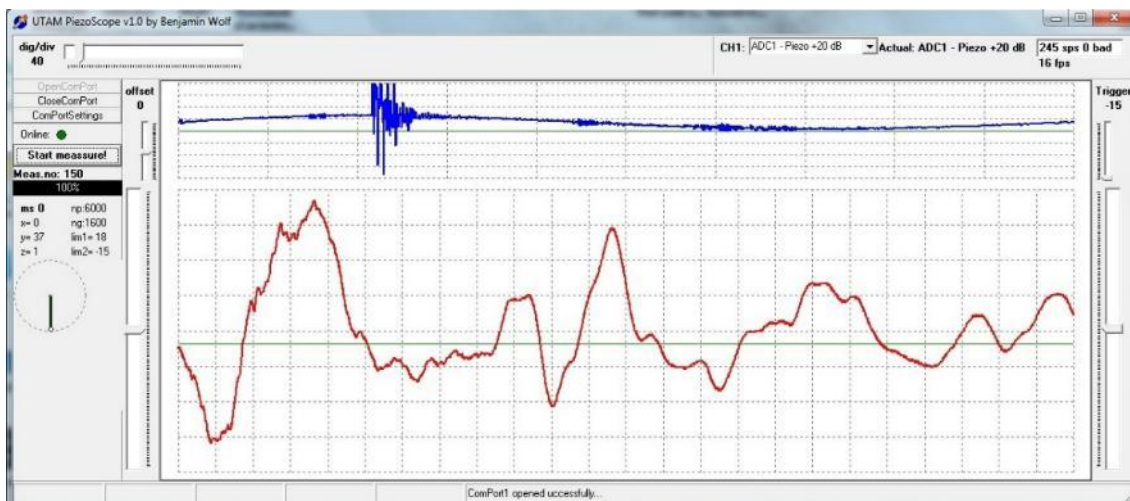
$$m_{Fe_2O_3} = m_O - m_{FeO} \quad (3)$$

$$m_{Fe_2O_3} = 0,2737 - 0,0675 = 0,2062g$$

Poměr mezi oxidy železe  $N(FeO) / N(Fe_2O_3)$  je tedy 1/3. Vezmeme-li v úvahu že vzorek přišel o hmotnost rovnou  $m_{Fe_2O_3}$ , při hustotě oceli  $7,86 \text{ g/cm}^3$  dostaneme úbytek tloušťky vzorku o  $11,2 \text{ } \mu\text{m}$ . Vliv ztráty hmotnosti vlivem žíhání je tedy v našem případě zanedbatelný a nebude mít vliv na výsledky měření.

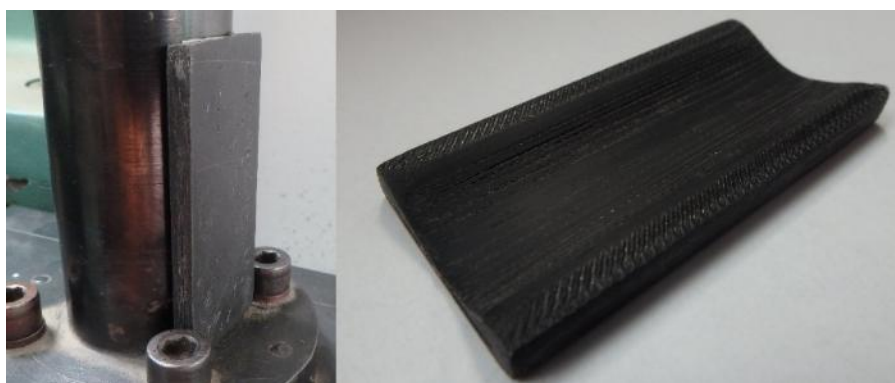
## 4.2 Měření pomocí piezoelektrického snímače

Pro toto měření byl použit piezo měnič bez vlastního generátoru o průměru  $27 \text{ mm}$  s rezonanční frekvencí  $4 \text{ kHz}$ . Zařízení pro čtení z tohoto snímače pracuje na frekvenci  $1,1 \text{ MHz}$ , což je pro tento typ měření více než dostačující. Vyčítání dat je spuštěno překročením oboustranně omezeného intervalu, který lze nastavit posuvníkem označeným "Trigger". V samotném obvodu uloženém na nosné tyči Charpyho kladiva, je také integrován tří směrový akcelerometr monitorující polohu kladiva, který pracuje na frekvenci  $1,6 \text{ kHz}$ . Z tohoto snímače lze také díky poklesu dostředivé síly určit nárazovou energii avšak pouze s přesností  $\pm 3 \text{ J}$ , což není dostačující. Získaná data jsou nejdříve uložena do mezipaměti a po přeražení vzorku odeslána přes bluetooth rozhraní do PC. Ihned po přeražení vzorku je v PC díky přehlednému SW *obr. 16*, vykreslen průběh hodnot z obou snímačů. SW rozhraní také disponuje možností nastavení citlivosti a velikosti zesílení piezoelektrického snímače.

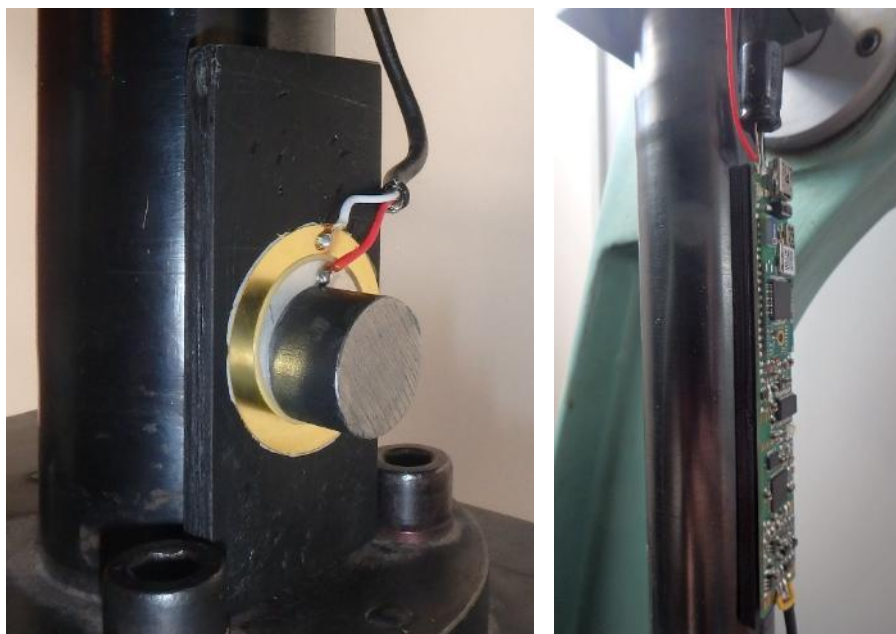


Obr. 16: SW zobrazující průběh naměřených hodnot

Samotné zařízení je umístěno na nosné tyči díky plastové podkladu vytištěnému na 3D tiskárně *obr. 17*. Napájení zajišťují dvě AA baterie a je situováno ke středu závěsné osy kladiva, tak aby nedošlo ke změně vlastností způsobené vahou baterií. Samotný piezo snímač je pak umístěn co nejbliže k čepeli kladiva a to z jeho zadní strany *obr. 18*.



Obr. 17: Podklad pro piezo snímač

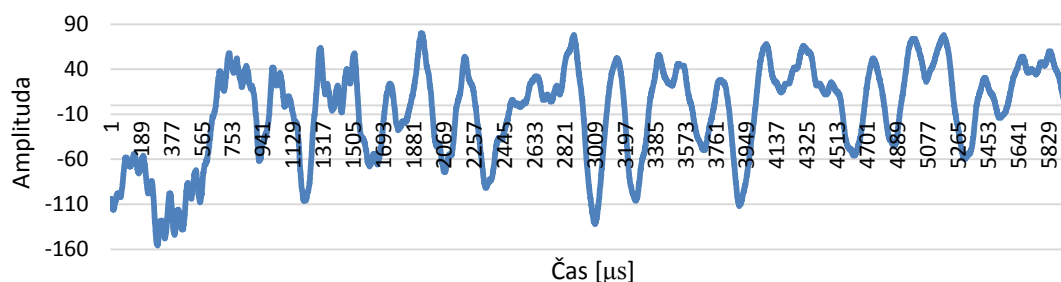


**Obr. 18:** v levo - umístění piezo snímače se závažím, v pravo – uchycení snímací elektroniky

Pro zvýšení citlivosti je snímač zatížen ocelovým válečkem *obr. 18*. Toto osazení bylo výsledkem desítek testů s různým umístěním snímače, rozdílným zatížením, a řadou pokusů pro odstranění vibrací vznikajících při přeražení vzorku. V průběhu několika měsíců testování, byl také upravován SW za účelem odstranění šumu a dalších nežádoucích vlivů.

#### **4.2.1 Interpretace dat**

I přes nespočet provedených testů s osazením kladiva a úpravou SW, vykazovaly měřená data oscilační charakter *obr. 19*. V naměřeném průběhu byly detekovány rušivé frekvence okolo 4 kHz odpovídající rezonanční frekvenci snímače, které však nebyly jediným zdrojem zašumění signálu, jelikož po jejich odstranění, průběh stále neodpovídal předpokladům. Jednou z příčin může být samotná konstrukce piezoelektrického snímače, který svými parametry nevyhovuje danému typu měření.



Obr. 19: Charakter dat měřených pomocí piezoelektrického snímače

Kromě vysokého rozkmitu výstupního signálu, má piezoelektrický snímač ještě jednu nevhodnou vlastnost plynoucí ze samotné fyzikální podstaty snímače. Jelikož je napětí generováno stlačováním krystalu, snímač nedetekuje statické zatížení a při ustálení zatížení dochází k postupnému poklesu napětí k nule. Tento jev byl u některých měření detekován a na základě těchto dat určen jako minoritní zdroj rušení.

#### 4.2.2 Zhodnocení metody

V případě použití zmiňovaného typu piezoelektrického snímače je tato metoda v praxi nepoužitelná. Chyba na straně elektroniky byla s velkou jistotou vyloučena díky řadě testů provedených mimo Charpyho kladivo. Možné řešení nabízí použití jiného typu snímače o vyhovujících parametrech. K realizaci tohoto řešení dojde nejspíše v následujícím akademickém roce.

### 4.3 Měření válcovým piezoelektrickým krystalem

Možným řešením nevhodné konstrukce plochého piezoelektrického snímače se jeví jeho nahrazení krystalem používaným v klasických zapalovačích. Jeho výhodou je válcový tvar generující napětí převážně při kolmém zatížení a není na rozdíl od plochého článku citlivý na průhyby v ostatních směrech. Po testech v laboratoři a úpravě SW byl snímač umístěn na zadní stranu břitu kladiva *obr. 20* a podroben zkouškám.

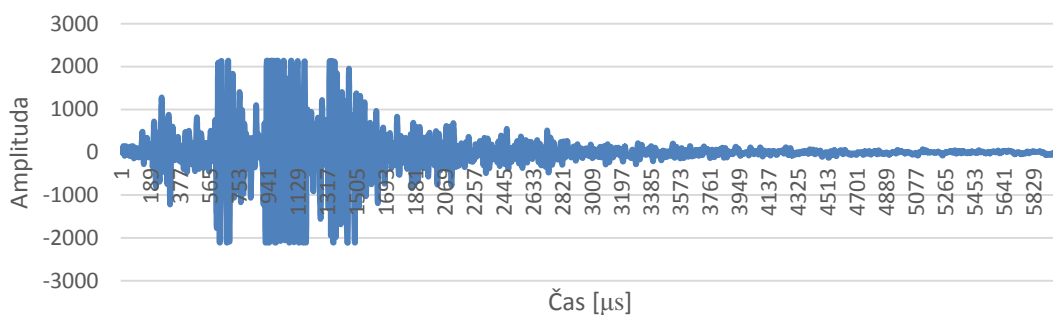




Obr. 20: Umístění piezoelektrického snímače

#### 4.3.1 Interpretace dat

Toto zapojení generovalo příliš vysoké fluktuace signálu, díky kterým nebylo možné pomýšlet na jakékoli separování použitelných dat ze signálu, viz *obr. 21*.



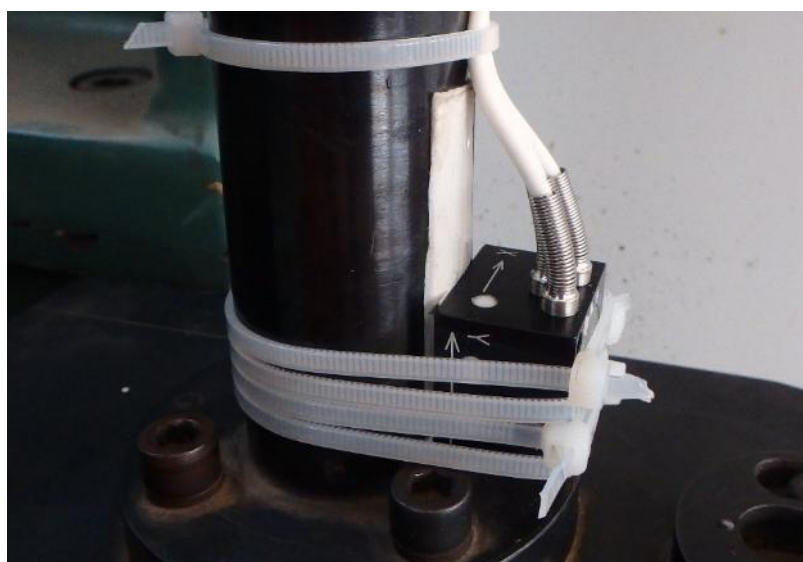
Obr. 21: Charakter naměřených dat pomocí piezo snímače

Jelikož v dalších testech nedošlo ke zdatelnému zlepšení, nepodařilo se z průběhů napětí zjistit příčinu deformace signálu a tato metoda byla shledána nevyhovující.

#### 4.4 Měření tříosým tenzometrickým snímačem

Vzhledem k předchozím nezdarům při použití v principu jednoduchých a neprofesionálních snímačů byl jako další vyzkoušen tenzometrický snímač EGCS3-D

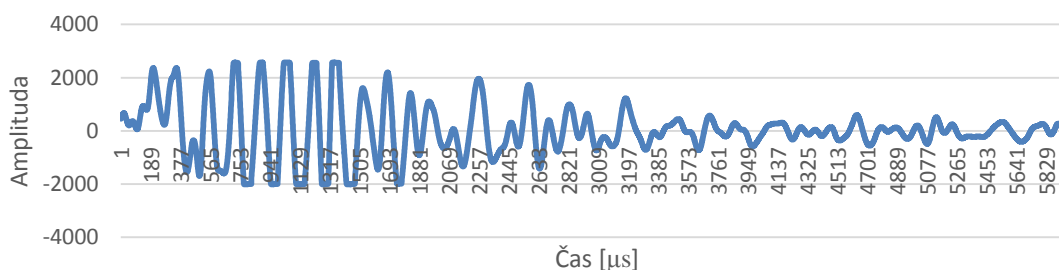
Triaxial Accelerometer, který měří v rozsahu 5 g až 50 000 g s vlastní frekvencí 8 kHz. Pro tento snímač bylo nutné zajistit samostatné napájení realizované laboratorním zdrojem a provedení razantnějších úprav měřicí elektroniky. Snímač byl umístěn na zadní straně nosné tyče kladiva, v místě již demontovaného plochého pieza. Pevné uchycení snímače zajišťovaly stahovací pásy *obr. 22*.



**Obr. 22: Umístění akcelerometru**

#### 4.4.1 Interpretace dat

Neočekávaným problémem se v tomto případě stala citlivost snímače, která se pohybovala na hranici elektrického šumu. Vzhledem ke konstrukci vyčítacího zařízení nebylo možné tento problém odstranit. Spolu s faktem, že se cena snímače pohybuje okolo 100 000 Kč a pro toto měření byl pouze zapůjčen, ukončili jsme testování a přistoupili k použití jednoduchého tenzometru.



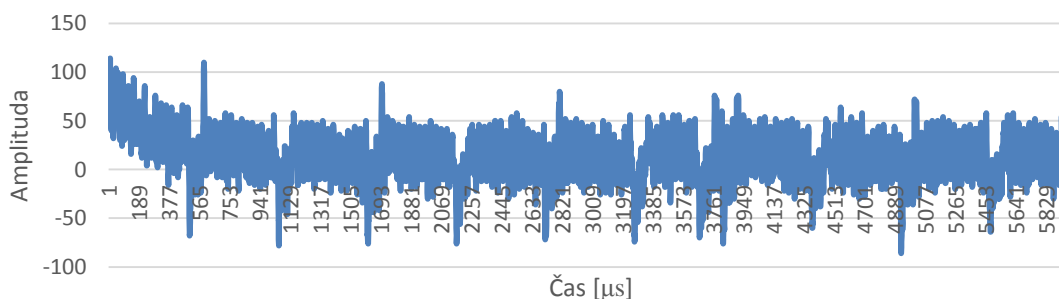
**Obr. 23: Charakter naměřených dat pomocí tenzometrického snímače**

## 4.5 Měření tenzometrem

Na profesionálních instrumentovaných Charpyho kladivech je právě tenzometr umístěn na přerážecím břitu hlavním zdrojem hodnotných informací o průběhu sil během testu. Díky tomu byla na tuto metodu kladena velká očekávání. Na spodní část nárazového břitu byl nalepen tenzometr o rozměrech 4x5,5 mm a přes pájecí propojku připojen k měřicímu obvodu *obr. 24*. Úskalím tohoto měření je velká citlivost zapojeného tenzometru na veškerá elektrická rušení způsobená napájením měřicího obvodu, případně připojením notebooku a dalšími vlivy. Jedná se o řešitelný problém, který však vyžaduje implementaci elektronických obvodů eliminujících tato rušení. Z časového hlediska již nebylo možné tyto úpravy provést, jsou však plánovány na začátek následujícího akademického roku a věřím, že přinesou požadované výsledky.




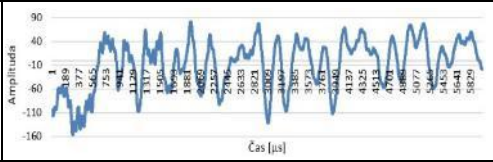

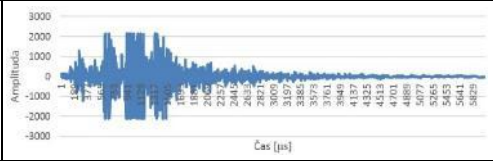

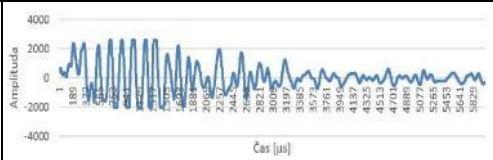

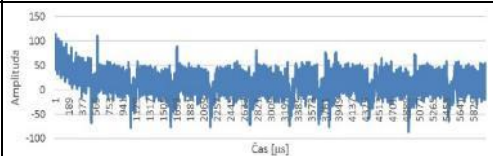
Obr. 24: Umístění tenzometru na spodní straně břitu



Obr. 25: Charakter naměřených dat pomocí tenzometru

## 4.6 Shrnutí zkušeností se záznamem dějů rázu pomocí elektrických veličin

Zařízení, které jsme pro výše popsanou experimentální část používali, vzniklo adaptací obvodů a elektroniky vyvinutých za účelem sledování otřesů předmětů během transportu. Ukazuje se, že charakter vibrací spojených s rázem provedeným Charpyho kladivem se odlišuje od otřesů a jim podobných dějů, zejména přítomností mnoha módů vlastního kmitání kladiva po rázu, jež překrývají svou velikostí „užitečný signál“. Nepodařilo se najít elektrickou součástku vhodného principu, aby bylo možné mechanické děje „namapovat“ na generovaný elektrický signál, který byl zaznamenáván.

Snímač	Charakter naměřeného signálu	Příčina selhání
		Piezo snímač o nevyhovujících vlastnostech. Vysoká citlivost na rušivé frekvence.
		Velký rozkmit signálu a problematické uchycení krystalu.
		Nízká citlivost snímače na hranici šumu. Nevhodná vlastní frekvence 8 kHz.
		Vysoká citlivost snímače na elektrická rušení způsobená měřicí technikou.

+

Tab. 1: Přehled výsledků měření pomocí elektrických veličin

## 4.7 Měření s vysokorychlostní kamerou

Po úskalích s využitím piezoelektrických a tenzometrických snímačů byla jako poslední možnost použita vysokorychlostní kamera FASTCAM SA5 od firmy Photron. Tato kamera nabízí rozsah od 250 do 1 000 000 fps. S rostoucí snímkovací frekvencí však

klesá rozlišení a světelnost záznamu, a je tedy nutné zvolit optimální snímkovací frekvenci tak, aby bylo možné z následné digitální korelace obrazu (dále jen DIC z anglického digital image correlation) dostat požadovaná data. Tento typ kamery sice nespadá do cenově dostupné instrumentace Charpyho kladiva, ale je použit pro demonstraci další možnosti, jak měřit průběh sil během přerážení vzorku.

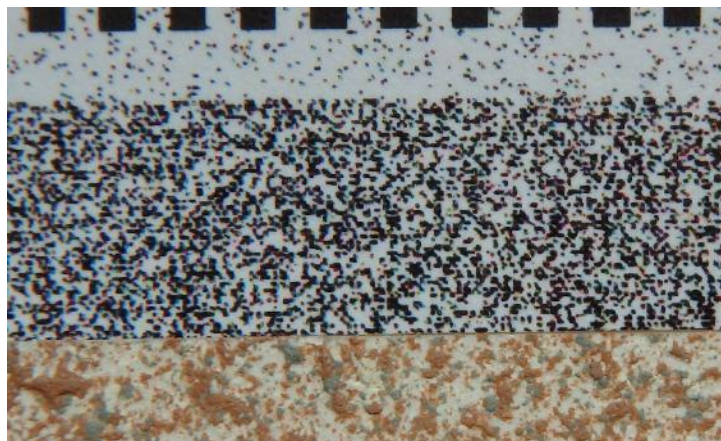
#### 4.7.1 Instrumentace kamery

Kamera byla zavěšena na stativu ve vzdálenosti 20 cm od boční stěny kladiva a osazena vhodným objektivem *obr. 26*. Nutnou součástí sestavy je také výkonné světlo s vysocesvitivými LED diodami umístěné co nejbližší snímané oblasti.



Obr. 26: Sestava pro měření optickou metodou

Snímaná oblast musí mít dostatečnou délku tak, aby bylo možné zachytit celý průběh přerážení odehrávající se na 2 až 10 mm, a také vhodný kontrastní stochastický skvrnitý vzor. Za tímto účelem byla boční stěna kladiva polepena třemi různými vzory o délce 40 mm *obr. 27*.



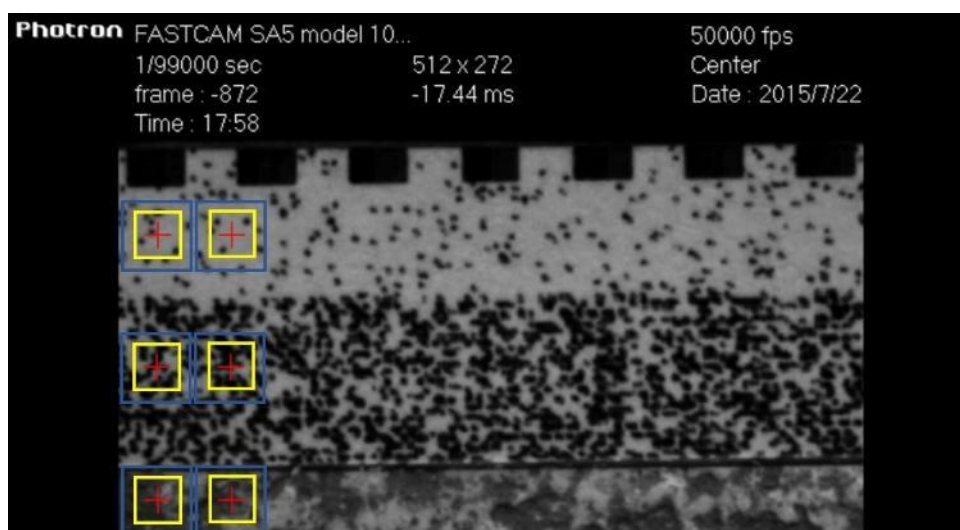
Obr. 27: Tři různé vzory pro snímání optickou metodou

Rozlišné vzory jsou použity pro následné určení nejvhodnějšího z nich, jelikož výsledek DIC je na snímaném vzoru přímo závislý. Snímkovací frekvence byla zvolena pouze na 50 000 fps při rozlišení 512 x 217 pixelů, vzhledem k omezené světlosti záběru a poměrně velké snímané oblasti. S tímto nastavením bylo provedeno 22 měření, jejich výsledky je možné vidět v příloze A.

#### 4.7.2 Digitální korelace obrazu

Principem této metody je rozlišení určité oblasti bodů v obrazu, jejich následná detekce v následujícím snímku a numerický výpočet jejich posunutí. V tomto případě se jedná o použití dvoudimenzionální DIC, kdy je nutné, aby osa snímacího zařízení tvořila normálu ke snímané ploše, a předešlo se tím jednak zkreslení výsledků, jednak změně zaostření značek v důsledku omezené hloubky ostrosti optického záznamu. Korelační proces začíná definováním polohy a rozměru korelační mřížky *obr. 28*, představující množinu pixelů, u nichž je vyhodnocováno posunutí. K nalezení konkrétních pixelů jsou použity tzv. subsety, což jsou čtvercová pole o rozměrech  $(2M + 1) \times (2M + 1)$  pixelů, se středem ve sledovaném pixelu. Takovéto pole je již na skvrnitěm povrchu nezaměnitelné, a lze tak určit přesnou polohu sledovaného pixelu. Z hlediska rychlosti výpočtu je také vhodné definovat oblast hledání, jež je určena jako okolí každého referenčního subsetu, ve kterém je subset na následujícím snímku hledán. V případě provedení korelace pouze na pixelové úrovni bychom za našich podmínek nedostali požadované výsledky, jelikož se rozdíl

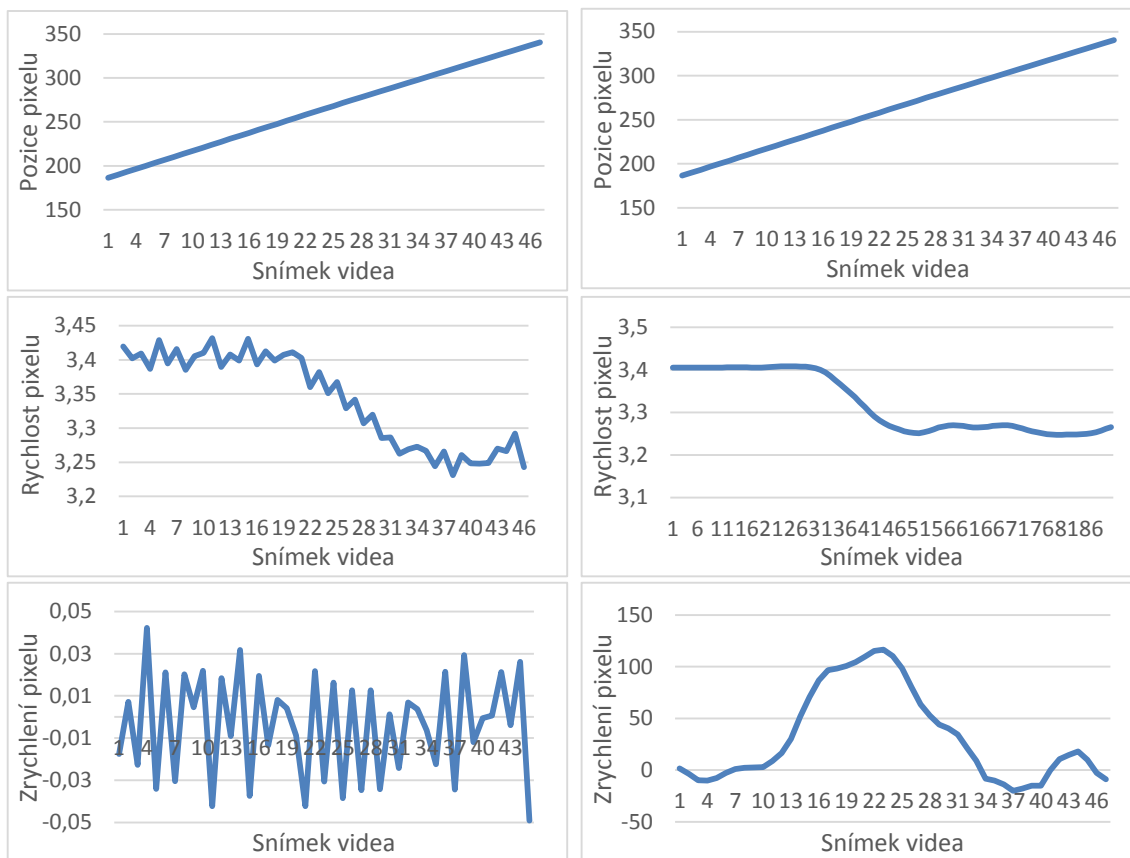
rychlostí kladiva před a po přeražení vzorku pohybuje okolo 0,3 m/s, což generuje rozdíl v posunutí mezi jednotlivými snímky max. 0,2 pixelu. V korelačním programu jsou však implementovány registrační algoritmy na tzv. sub-pixelové úrovni, založené na Newton-Raphsonově iteraci a gradientních metodách, s jejichž použitím lze dosáhnout přesnosti od 0,5 do 0,01 pixelu.[17]



Obr. 28: DIC – sledované pixely (červeně), subsety (žlutě), oblast hledání (modře).

#### 4.7.3 Naměřená data

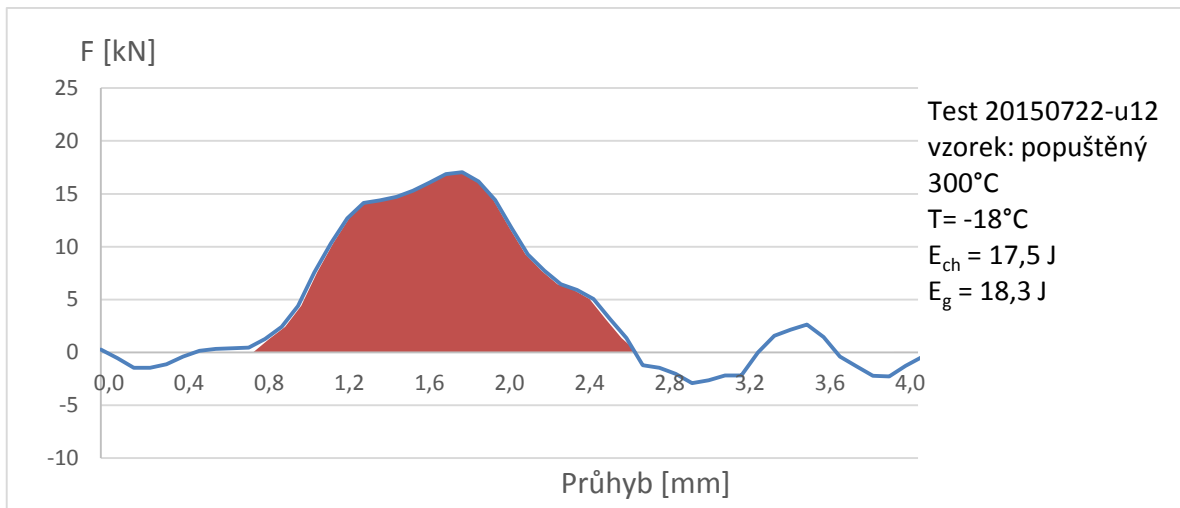
Přestože se díky DIC podařilo zjistit posunutí kladiva s přesností  $\pm 0,02$  pixelu, bylo nutné odstranit náhodné odchylky, jejichž velikost se zvětšuje operací derivování, použitím klouzavého průměru, který odstraní náhodné odchylky a současně zachová charakter průběhu veličin. Důležitost použití klouzavého průměru vystihuje *obr. 29*.



**Obr. 29:** Derivace naměřeného průběhu bez vyhlazení (vlevo) s vyhlazením (vpravo)

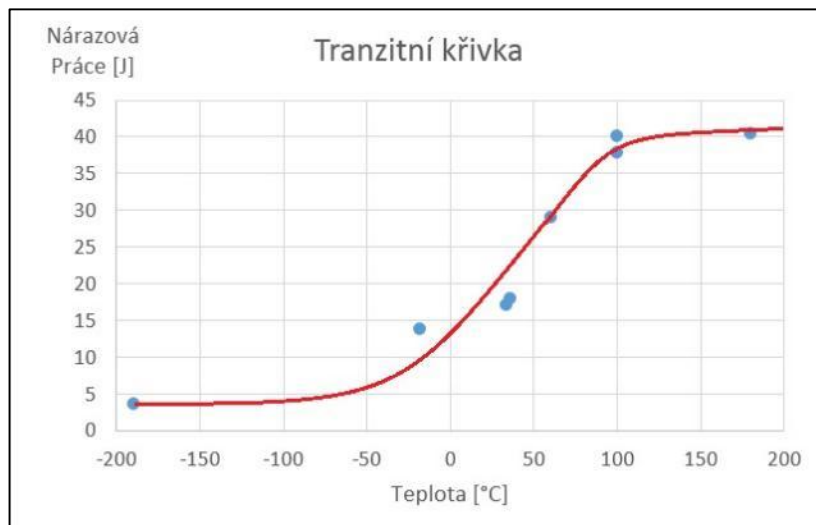
Pro převedení hodnot na vodorovné ose, vyjadřujících čas pořadovým číslem snímku, na vzdálenost v milimetrech bylo nejprve zjištěno, že 1 mm na snímaném vzoru má ve videu délku 35 pixelů. Při rychlosti 4 m/s kterou má kladivo před nárazem do vzorku odpovídá posun mezi jednotlivými snímky 2,8 pixelu. Z těchto hodnot lze již vypočítat vztah mezi jednotlivými snímky a uraženu vzdáleností, která je rovna 0,08 mm za jeden snímek. Hodnoty zrychlení na ose y byly přepočteny na sílu díky znalosti spotřebované energie odečtené z Charpyho kladiva, která je rovna ploše pod naměřenou křivkou, a skutečnosti, že vztah mezi silou a zrychlením je  $F = m \cdot a$ . Jelikož je hodnota hmotnosti kladiva pro všechna měření neměnná není třeba započítávat do převodu její konkrétní hodnotu. Tento přepočet byl proveden pro jedno nejvhodnější měření a vypočtená převodová konstanta mezi zrychlením a silou následně použita pro všechny ostatní průběhy. Výsledná závislost síly na průhybu je znázorněna na *obr. 30*.





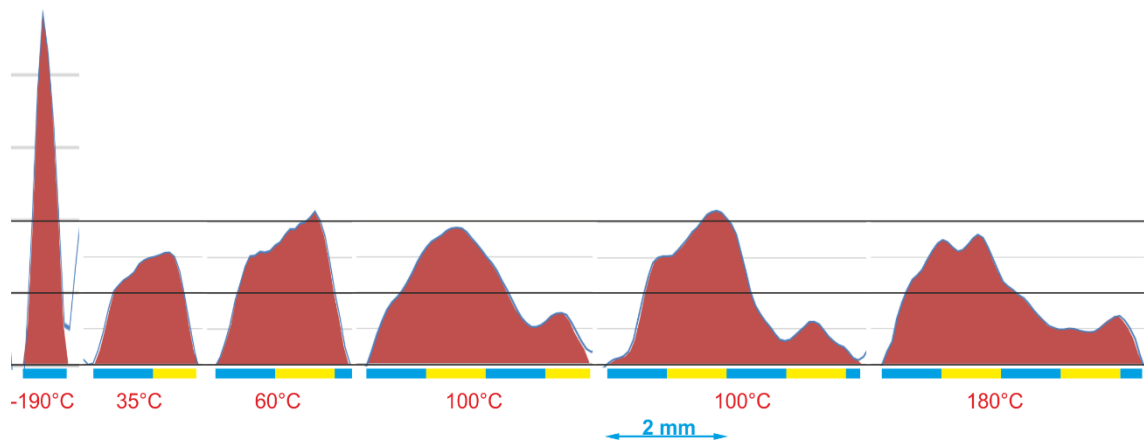
Obr. 30: Závislost síly na průhybu během přerážení vzorku

Překmitý průběh do záporných hodnot síly jsou způsobeny drobnými fluktuacemi signálu, které jsou následně umocňovány derivací signálu. Razantnější pokles síly do záporných hodnot po přerážení vzorku je způsoben nepatrným „odražením“ od více houževnatých vzorků. Z naměřených hodnot lze integrací vybarvené části průběhu zjistit hodnotu nárazové práce, označenou jako  $E_g$ , a porovnat ji s hodnotou odečtenou na Charpyho kladivu označenou  $E_{ch}$ . Přesnost této hodnoty roste s velikostí nárazové práce, pro energie okolo 20 J je stanovena s přesností  $\pm 0,5 \text{ J}$ . Pro určení dalších hodnot již není průběh dostatečně přesný, což je způsobeno zvolenou snímkovací frekvencí. Z naměřených dat byla také vytvořena tranzitní křivka *obr. 31*, kterou jsme naměřili pro tepelně neupravený vzorek. Křivka zobrazuje závislost nárazové práce na teplotě vzorku.

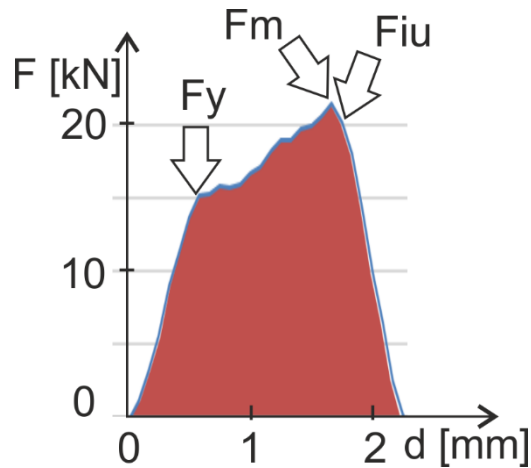


Obr. 31: Tranzitní křivka pro tepelně neupravené vzorky

Z naměřených dat lze také vysledovat změnu trendu průběhu zrychlení v čase, pro škálu teplot neupravených vzorků viz obr. 32. Pro teplotu kapalného dusíku  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$  byla naměřena značná výchylka od očekávaného průběhu, patrně v důsledku nahromadění chyb. Je také vidět, že elastický průhyb má přibližně stejný sklon u všech průběhů vyjímaje dusík. Dále se pak křivky liší průběhem za  $F_y$ , roste tedy schopnost podstoupit plastickou deformaci před lomem. Pro dva vzorky přeražené při teplotě  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , byly naměřeny velmi podobné průběhy, což je demonstrací věrohodnosti výsledků. Vodorovná stupnice pod grafy vyjadřuje milimetry posuvu a rovnoběžné černé čáry jsou po 10 kN. Na obr. 33 jsou zobrazeny důležité body na křivce. Elastický průhyb (do síly na mezi kluzu  $F_y$ ), plastická deformace k maximální síle ( $F_m$ ) a síly, za kterou začíná lom  $F_{iu}$ . Tyto hodnoty nám již neinstrumentovaná Charpyho zkouška poskytnout nedokáže.



Obr. 32: Tranzitní křivka pro tepelně neupravené vzorky



Obr. 33: Tranzitní křivka pro tepelně neupravené vzorky

#### 4.7.4 Zhodnocení metody

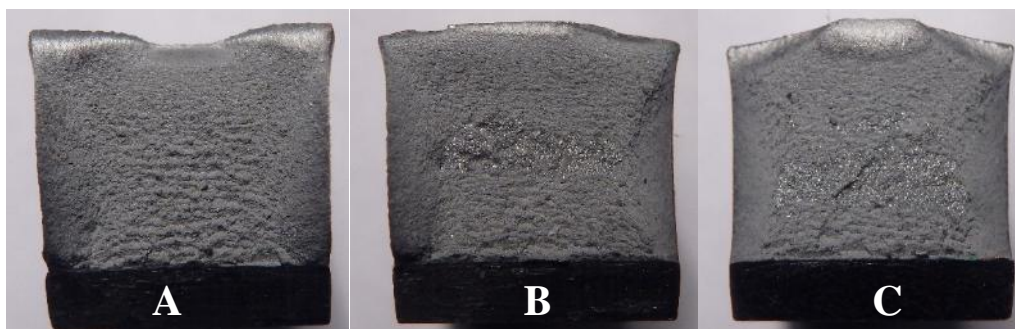
Tato metoda je vhodná pro vyšší nárazové práce a pro získání přesnějšího průběhu je nutné nastavit snímkovací frekvenci nad 100 000 fps, což vyžaduje vysoké nasvícení scény. Po této úpravě by bylo možné dostat vypovídající křivku pro určení charakteristických sil a typu šíření trhliny ve vzorku. V *tab. 1* můžeme vidět vyznačenou oblast nízkých odchylek naměřených nárazových energií, od hodnoty odečtené na Charpyho kladivu. Díky takto nízkým odchylkám lze předpokládat použitelnost metody při zmiňovaném zvýšení snímkovací frekvence. Pro tělesa s menší nárazovou prací by bylo také možné zvýšit citlivost zařízení snížením hmotnosti kladiva. Tento postup by ovšem znamenal nedodržení normami popsaného způsobu provedení zkoušky.

Test	Nárazová práce [J]		Odchylka [%]	Poznámka
	Mechanický odečet	Optická metoda		
20150722-u7	3,1	3,1	0	Nízká energie
20150722-u13	17,9	17,8	0,6	
20150722-u9	13,8	13,7	0,7	
20150722-u14	40	39,7	0,7	
20150722-u5	29	29,5	1,7	
201507-t58	40,5	39,2	3,2	
20150722-u4	12,5	13	3,8	
20150722-u12	17,5	18,3	4,4	
20150722-u1	17	18	5,6	
20150722-u17	3,1	2,7	12,9	Nízká energie
20150722-u10	20	23	13	
20150722-u3	24	28,5	15,8	
20150722-u15	3,5	2,9	17,1	Nízká energie
20150722-u16	3	2,4	20	Nízká energie
20150722-u19	3,1	2,4	22,6	Nízká energie
20150722-u8	2,6	2	23,1	Nízká energie
20150722-u2	2,5	1,9	24	Nízká energie
20150722-u18	3,7	2,7	27	Nízká energie
20150722-u6	27,5	39,2	29,8	Vadný vzorek
201507-d20	3,9	1,4	64,1	Dřevo
201507-t50	3,5	17,1	79,5	T = -190 °C

Tab. 2: Přehled odchylek jednotlivých naměřených hodnot nárazové práce

#### 4.8 Vyhodnocení vzhledu lomových ploch

Na *obr. 34* je možné vidět deformace průřezu vzorku spolu s matným zvrásněným povrchem, odpovídajícím houževnatému lomu. Jedná se o tepelně neupravené vzorky oceli 12 050 přerážené při teplotě 180, 100 a 60 °C o nárazové práci 41, 17 a 15 J.



**Obr. 34: Lomové plochy vzorků a)  $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , b)  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , c)  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$**

Na *obr. 35* jsou lomové plochy tepelně neupravených vzorků přeražených při teplotě  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , na kterých lze pozorovat přechod od houževnatého ke křehkému lomu. Na plochách jsou viditelné lesklejší plošky a deformace průřezu vzorku je menší než u čistě houževnatého lomu.



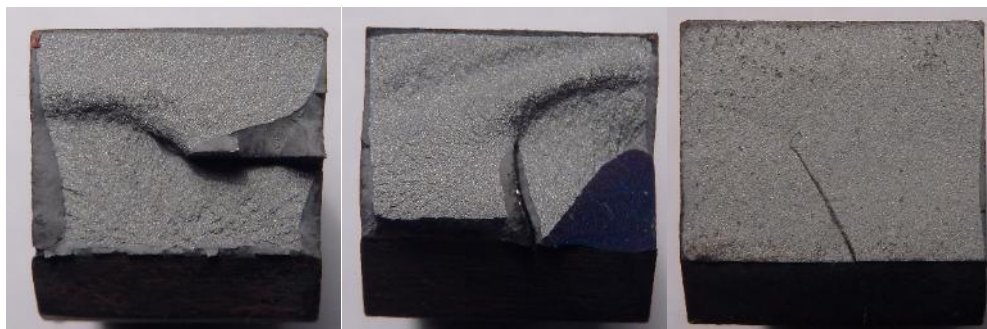
**Obr. 35: Lomové plochy vzorků při teplotě  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$**

Na *obr. 36* vidíme vzorové příklady křehkého lomu nevykazující žádnou deformaci průřezu vzorku. Lomové plochy mají velice rovný jemně zdrsňený povrch. Jedná se o vzorky zakalené při teplotě  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  bez následného popouštění a přeražené při teplotách  $90$ ,  $100$  a  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Obr. 36: Lomové plochy vzorků a)  $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , b)  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , c)  $T = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ .**

Na *obr. 37* vidíme příklady lomových ploch na vzorcích s vadou materiálu. Lom vykazuje nestandardní tvar a je od běžného lomu snadno rozlišitelný.



**Obr. 37: Lomové plochy vzorků s vadou**

*obr. 38* ukazuje vzhled lomových ploch tepelně neupravených vzorků přeražených při teplotě  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ , které bylo dosaženo ponořením vzorku do kapalného dusíku. Vzorky vykazují charakter křehkého lomu s lokální korozí způsobenou značným orosením vzorku způsobeném značným rozdílem teploty vzorku a okolního vzduchu.



**Obr. 38: Lomové plochy vzorků přeražených při teplotě  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$**

#### 4.9 Přehled naměřených tvrdostí

Následující tabulka ukazuje přehled naměřených tvrdostí pro různě tepelně upravené vzorky a je seřazena od nejměkčích po nejtvrďší vzorky. Se zvyšující se tvrdostí roste také křehkost vzorku, což ověřila i provedená měření.

Tepelná úprava vzorku	Tvrdost vzorku
neupravený vzorek	194
neupravený vzorek	202
neupravený vzorek	218
neupravený vzorek	224
neupravený vzorek	225
neupravený vzorek	233
neupravený vzorek	240
neupravený vzorek	242
neupravený vzorek	245
zakaleno při 850 °C následně popuštěno při 200 °C	530
zakaleno při 850 °C následně popuštěno při 300 °C	537
zakaleno při 850 °C následně popuštěno při 300 °C	598
zakaleno při 850 °C následně popuštěno při 200 °C	610
zakaleno při 850 °C následně popuštěno při 200 °C	618
zakaleno při 850 °C následně popuštěno při 300 °C	652
zakaleno při 850 °C následně popuštěno při 100 °C	671
zakaleno při 850 °C následně popuštěno při 100 °C	676
zakaleno při 850 °C následně popuštěno při 100 °C	700
zakaleno při 850 °C	782
zakaleno při 850 °C	794

Tab. 3: Přehled tvrdosti vzorků a jejich tepelné úpravy

## 5 Závěr

Tato práce měla za cíl zmapovat možnosti provedení instrumentované rázové zkoušky na Charpyho kladivu s využitím jednodušších a méně nákladných komponent. Vzhledem k experimentální povaze této práce, s využitím řady prototypů a novátorských řešení, není výsledkem návod na zhotovení instrumentace Charpyho kladiva, ale spíše přehled možných cest, jak k dané problematice přistupovat, a nalezení experimentálních podkladů pro vyloučení řešení, které fungují dobře v jiných situacích (analýza zrychlení těles během dopadu), ale pro studium dějů při rázu se nehodí.

Jako první byly testovány piezoelektrické snímače s různými parametry, které však nepřinesly požadované výsledky. Následně byly zkoušeny tenzometrické snímače, také s neuspokojivými výsledky. Použitelná data poskytla až měření s vysokorychlostní kamerou, za použití digitální korelace obrazu. Touto metodou pak byla proměřena sada dvaceti dvou vzorků, jejíž výsledky lze najít v příloze A.

Celé měření probíhalo na Charpyho kladivu, dimenzovaném na velice houževnaté vzorky, které jsme bohužel v našem případě nepoužívali. Z tohoto důvodu se naměřená data nacházela v první desetině rozsahu měřitelných hodnot. V případě použití Charpyho kladiva přiměřeného k houževnatosti vzorků bychom dosáhli mnohem vyšší citlivosti a lepší přesnosti výsledků.

### 5.1 Zhodnocení výsledků

Přestože použití piezoelektrických snímačů nepřineslo požadované výsledky, nelze tento způsob instrumentace zcela zavrhnout. Bylo by nutné otestovat řadu dalších typů snímačů, které mohou poskytnout zcela odlišné výsledky.

Jelikož jsou tenzometrické snímače na instrumentované Charpyho zkoušce běžně používány, je jen otázkou správné kalibrace a odstranění šumu měřicího obvodu, kdy bude tato metoda funkční. Z omezených časových možností na provedení všech těchto nezbytných úprav je další vývoj této metody odložen na začátek následujícího akademického roku.



Cíle bakalářské práce se podařilo dosáhnout rozvinutím metody založené na optickém záznamu pohybu kladiva v průběhu rázu pomocí rychloběžné kamery. Její kombinací s metodou korelace obrazu a analýzou obrazu bylo možné získat informace o průběhu rázu v detailu, který umožňuje rozpoznat charakter lomu a další informace o chování materiálu. Tyto informace z nelze z výsledků neinstrumentovaného kladiva získat.

Pro další zvýšení citlivosti metody je nezbytné získat kvalitnější makroobjektiv, se zorným polem o šířce přibližně jeden centimetr, a zvýšit rychlost záznamu.

## **5.2 Další vývoj**

Další výzkumná činnost bude vedena ve dvou směrech: jednak v aplikaci vypracované metody na další materiály a jednak ve vývoji metody samotné.

Z hlediska novosti je zajímavé využít metodu na kompozitní materiály, zejména na vlákny zpevněné lamináty s termosetickou matricí, které jsou stále hojněji využívány v leteckém průmyslu. Pro tyto materiály interakce matrice a vláken v průběhu lomu řídí jejich vrubovou houževnatost a instrumentace zkoušky je nezbytným předpokladem poznání povahy této interakce. Tímto typem materiálů se zabývá výzkum podporovaný SGS projektem na Ústavu mechaniky a materiálů FD.

V dalším vývoji budou mimo vylepšeného tenzometrického snímání použity magnetické snímače polohy, inspirované optickou metodou: v prezentovaných výsledcích se měřily elektrické veličiny spojené se zrychleními, s magnetickými snímači polohy bude proveden stejný postup od polohy k rychlosti a od rychlosti ke zrychlení jako jsme postupovali při vyhodnocení výsledků z rychloběžné kamery. Uspěje-li tento postup, obnoví se naděje na vytvoření nízkorozpočtového zařízení pro instrumentaci Charpyho zkoušky, protože rychloběžná kamera s pořizovací cenou překračující milion korun jistě není levný způsob instrumentace.

## 6 Literatura

- [1] ANDERSON, T. Fracture mechanics: fundamentals and applications. 3rd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2005, 621 p. ISBN 0849316561.
- [2] VÁCLAVÍK, M. Predikce teplotní závislosti lomové houževnatosti. Brno, 2015.
- [3] MICHALISKO, J. Houževnatost kovových materiálů a její zkoušení Brno, 2010.
- [4] GAJDOŠ, Ľ. Spolehlivost plynovodních potrubí. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 217 s. ISBN 80-01-02143-2.
- [5] KUNZ, J. Základy lomové mechaniky. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994, 172 s. ISBN 80-01-01215-8.
- [6] CSN ISO 148-1: Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda
- [7] CSN EN ISO 14556: Ocel – Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu Charpy s V-vrubem – Instrumentovaná zkušební metoda Část 1: Zkušební metoda
- [8] SHTERENLIKHT, A., HASHEMI, S. H., YATES, J. R., HOWARD, I. C., ANDREWS, R. M. Assessment of an instrumented Charpy impact machine. International Journal of Fracture. 2005, 132(1): 81-97. DOI: 10.1007/s10704-004-8144-1.
- [9] KOSEK, L. Lomová houževnatost kovových materiálů a její zkoušení Brno, 2011.
- [10] Gajdoš, Ľ., Šperl, M., Pařízek, P. Development of Plastic Deformations in Steel under Constant Load and Their Importance for Practice in the Gas Industry, 2013.
- [11] ŠTEGNEROVÁ, K. Aplikace zobecněné lineární elastické lomové mechaniky na odhad počátku šíření trhliny z ostrého V-vrubu Brno, 2013.

- [12] Materiály potrubí [online]. 2013 [cit. 2015-07-27]. Dostupné z: <http://www.ipotrubí.cz/clanky/7.-materialy-potrubí/>
- [13] Zwick Roell: Product Information for Pendulum Impact Tester RKP 450, 2015.
- [14] LABOR TECH : Informace o výrobku Instrumentované Charpyho kladivo LabTest ® CHK 150J-750J-I
- [15] Zwick Roell: Product information for HIT Pendulum Impact Testers from 5 to 50 Joule, 2015
- [16] Kříž, A. Podklady pro cvičení z Nauky o materiálu, Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni, 2009
- [17] PAN, B., K. QIAN, H. XIE a A. ASUNDI. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. Measurement Science and Technology. 2009, roč. 20, č. 6.
- [18] ČSN 38 6410: „Plynovody a přípojky s vysokým a velmi vysokým tlakem“, 1981
- [19] G 701 01: „Projektování a výstavba vvtl plynovodů s provedením napěťové zkoušky“, GAS s.r.o 1996
- [20] EN 208-2: „Stahlrohre für Fernleitungen für Brennbare Flüssigkeiten und Gase“, 1978
- [21] Kálna, K. K problematike vplyvu rozdielnych vlastností zvarového spoja na únosnosť konštrukcie, Zváranie – Svařování 47(1998), č. 12, str. 295-300

## 7 Seznam obrázků

Obr. 1: Transkrystalický štěpný lom – odlišná orientace sousedních zrn / ukázka říčkování [2].....	12
Obr. 2: Interkrystalický štěpný lom – trhlinka kopíruje hranice zrn / jednotlivá zrna [2]	12
Obr. 3: Jednotlivé fáze tvárného lomu [2] .....	13
Obr. 4: Tranzitní křivka [2].....	13
Obr. 5: Vzhled lomových ploch [2].....	14
Obr. 6: Přejímové závislosti vrubové houževnatosti KCV (t) a $P_L(t)$ , $\Delta b(t)$ oceli L415 [4].....	16
Obr. 7: Princip zkoušky zjištění nárazové práce a) schéma Charpyho Kyvadlové kladiva b) ustavení zkušební vzorku [3].....	18
Obr. 8: Vliv tvaru vrubu na hodnoty vrubové houževnatosti měkké oceli [16] .....	19
Obr. 9: Zkušební tyče s a) V-vrubem b) U-vrubem [16] .....	20
Obr. 10: Jednotlivé typy křivek síla/průhyb [7].....	21
Obr. 11: Určení charakteristických hodnot z křivky síla/průhyb [7] .....	22
Obr. 12: Kyvadlové rázové kladivo RKP 450 [13] .....	23
Obr. 13: Charpyho kladiva série CHKI- Instrumentace [14].....	24
Obr. 15: Tepelná úprava vzorků v laboratorní peci .....	26
Obr. 16: SW zobrazující průběh naměřených hodnot.....	28
Obr. 17: Podklad pro piezo snímač.....	28
Obr. 18: v levo - umístění piezo snímače se závažím, v pravo – uchycení snímací elektroniky .....	29
Obr. 19: Charakter dat měřených pomocí piezoelektrického snímače .....	30
Obr. 20: Umístění piezoelektrického snímače .....	31
Obr. 21: Charakter naměřených dat pomocí piezo snímače .....	31
Obr. 22: Umístění akcelerometru.....	32
Obr. 23: Charakter naměřených dat pomocí tenzometrického snímače .....	32
Obr. 24: Umístění tenzometru na spodní straně bříty .....	33
Obr. 25: Charakter naměřených dat pomocí tenzometru .....	33
Obr. 26: Sestava pro měření optickou metodou .....	35
Obr. 27: Tři různé vzory pro snímání optickou metodou .....	36
Obr. 28: DIC – sledované pixely (červeně), subsety (žlutě), oblast hledání (modře). ...	37

Obr. 29: Derivace naměřeného průběhu bez vyhlazení (vlevo) s vyhlazením (vpravo)	38
Obr. 30: Závislost síly na průhybu během přerážení vzorku .....	39
Obr. 31: Tranzitní křivka pro tepelně neupravené vzorky .....	40
Obr. 32: Tranzitní křivka pro tepelně neupravené vzorky .....	40
Obr. 33: Tranzitní křivka pro tepelně neupravené vzorky .....	41
Obr. 35: Lomové plochy vzorků při teplotě 30 °C .....	43
Obr. 36: Lomové plochy vzorků a) T = 90 °C, b) T = 100 °C, c) T = 135 °C. ....	43
Obr. 37: Lomové plochy vzorků s vadou .....	44

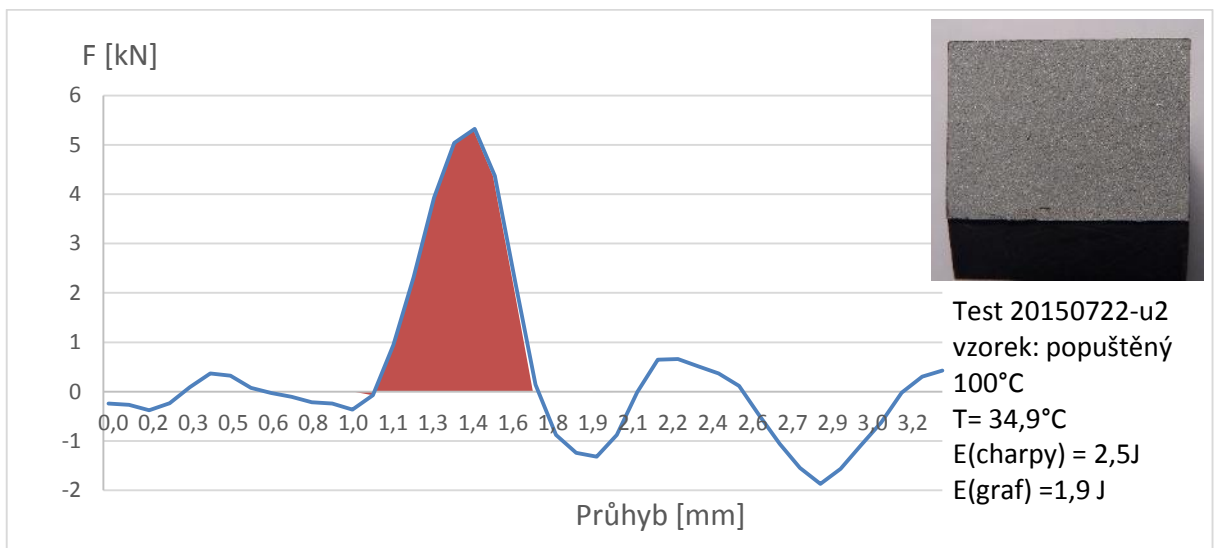
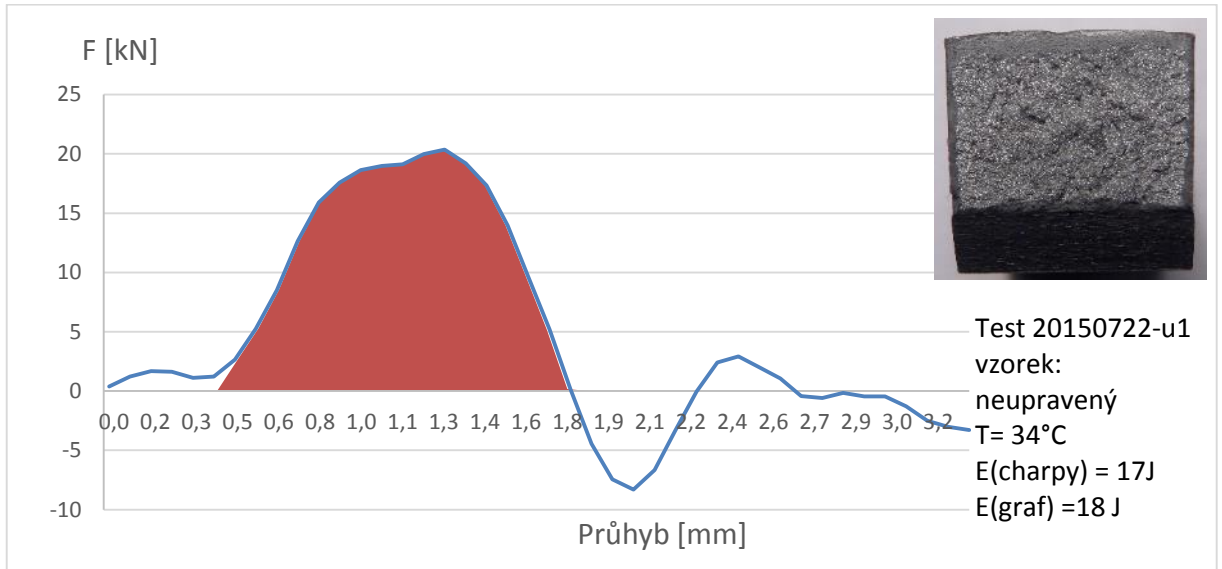
## **8 Seznam tabulek**

Tab. 1: Přehled výsledků měření pomocí elektrických veličin.....	34
Tab. 2: Přehled odchylek jednotlivých naměřených hodnot nárazové práce.....	42
Tab. 3: Přehled tvrdosti vzorků a jejich tepelné úpravy.....	45

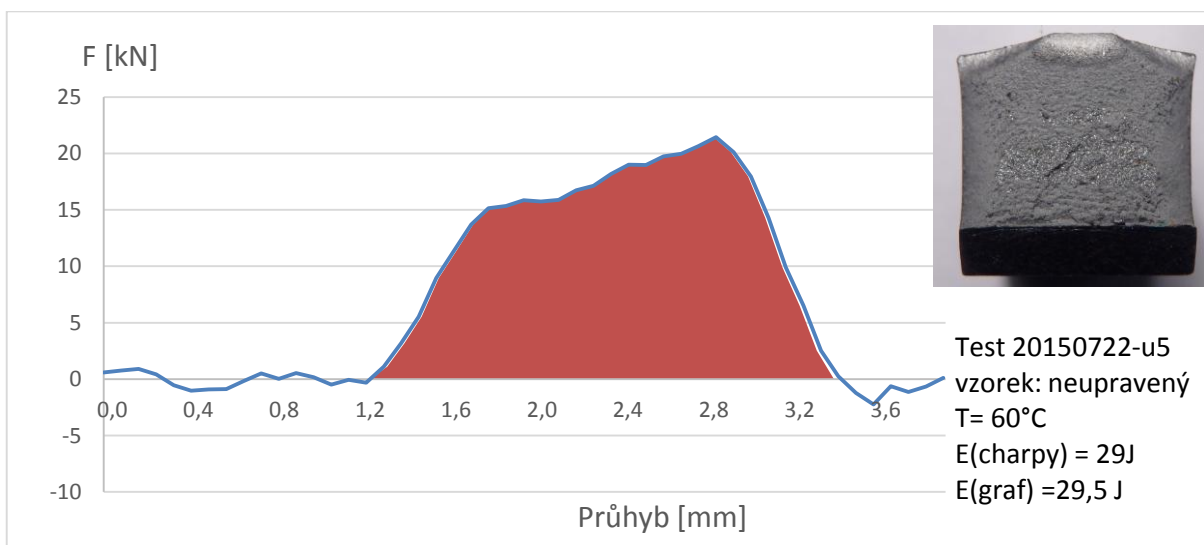
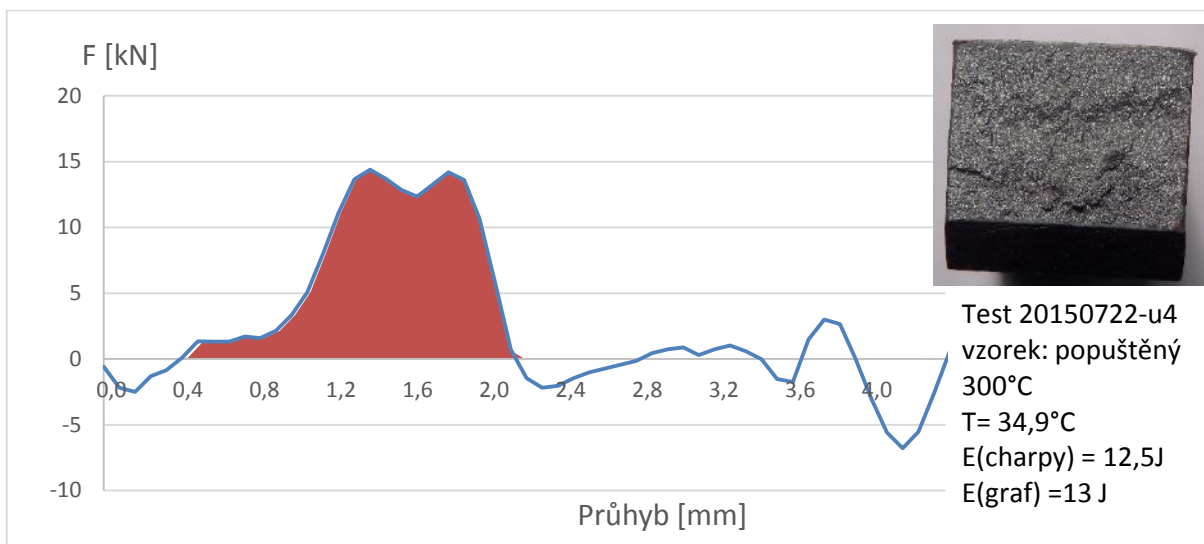
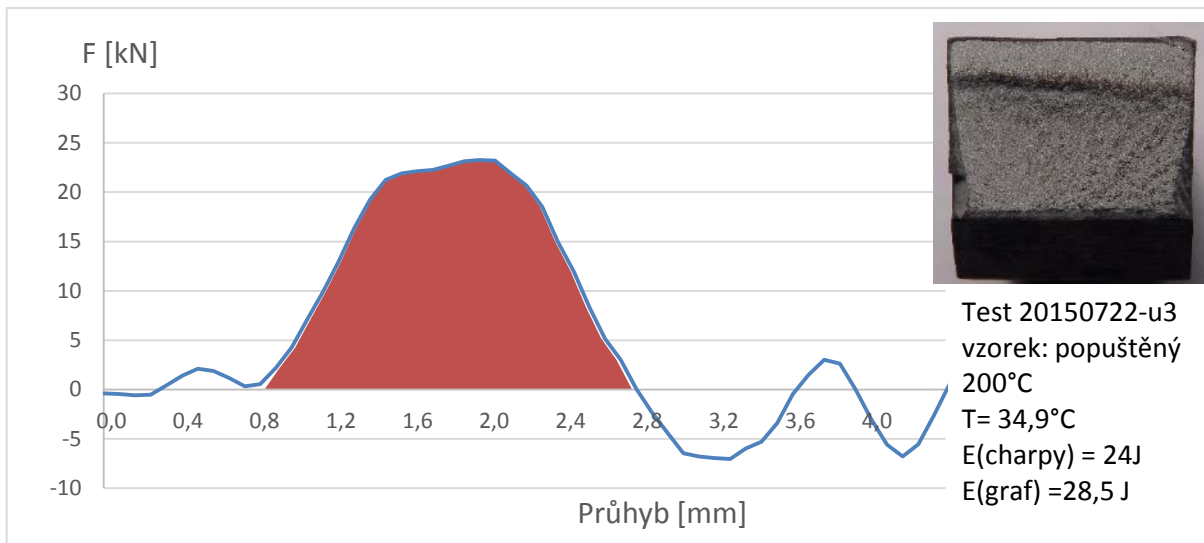
## **9 Seznam Příloh**

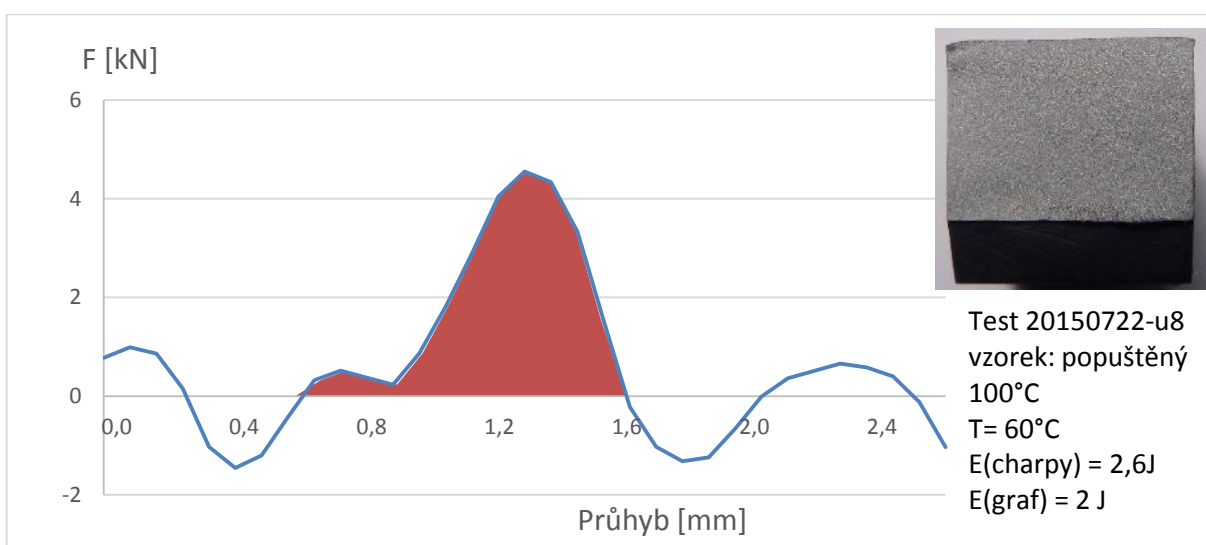
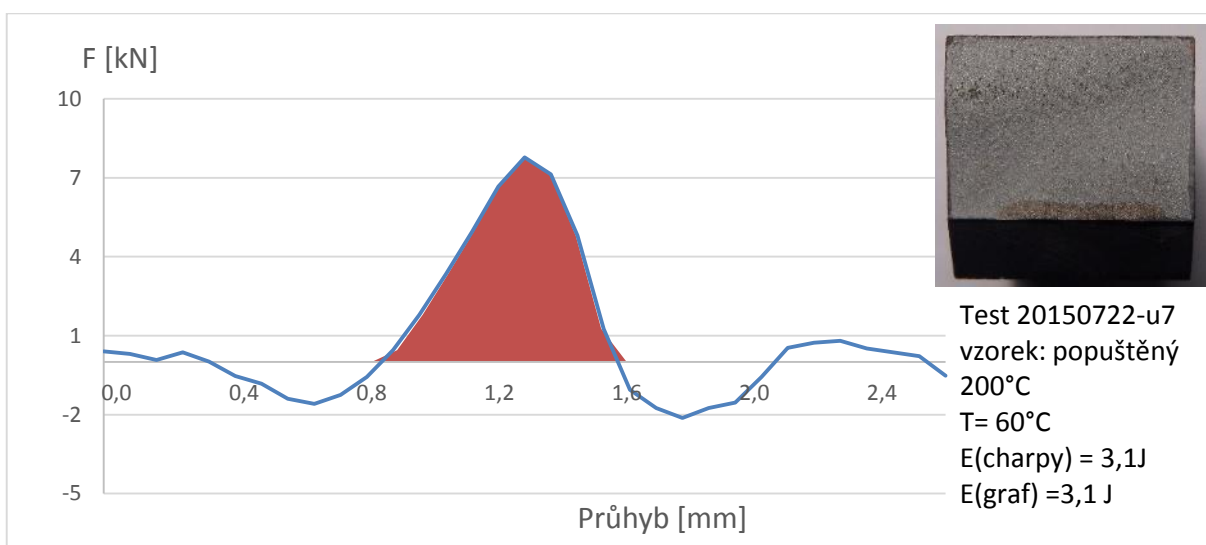
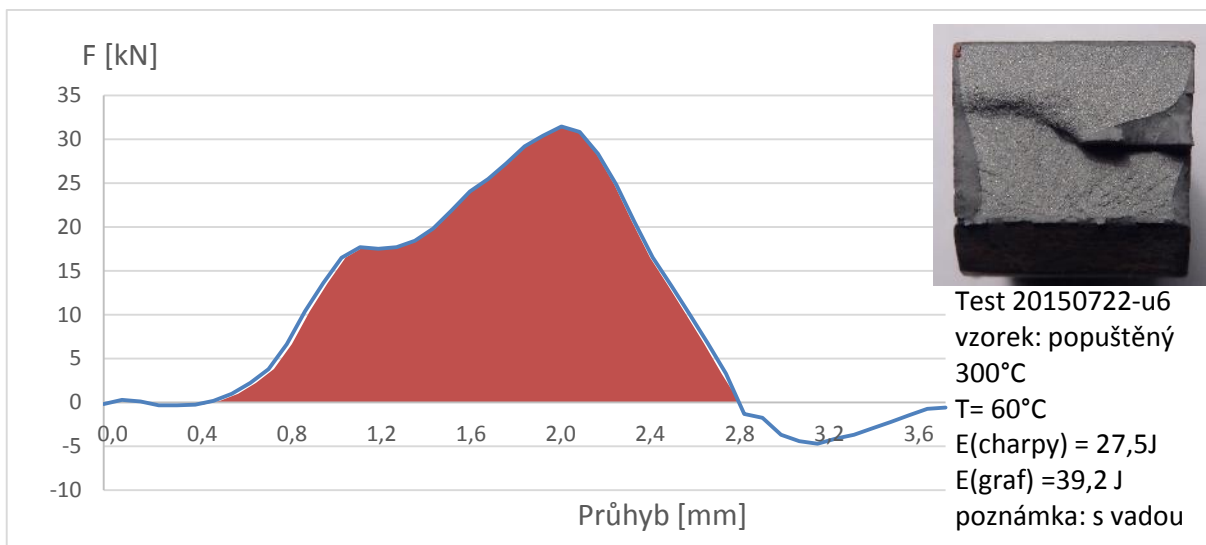
Příloha A	Průběhy jednotlivých testů z měření optickou metodou
Příloha B	Materiálový list oceli 12 050

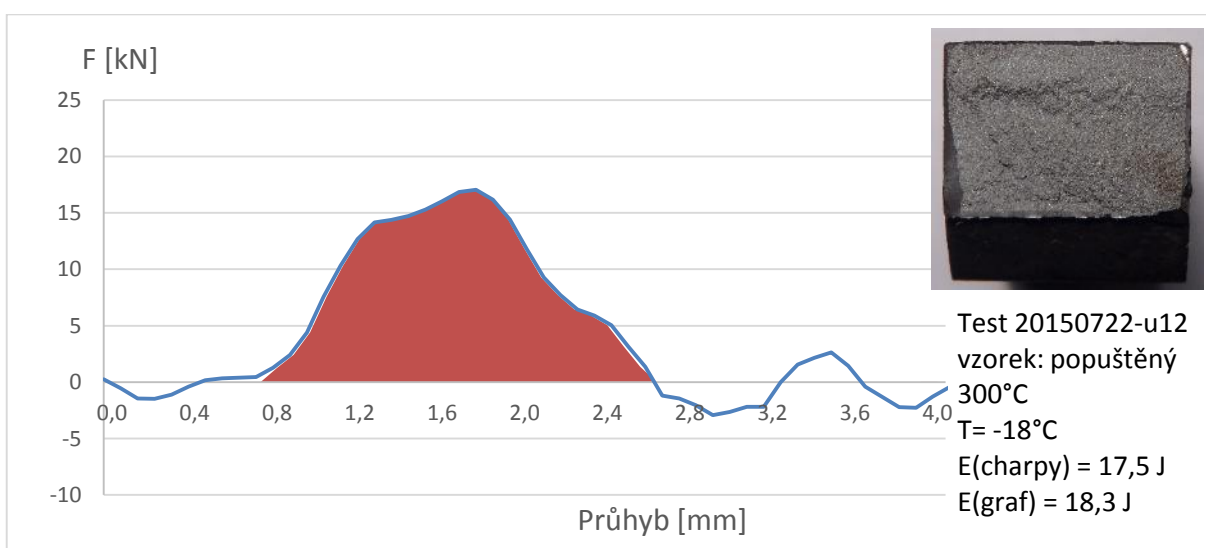
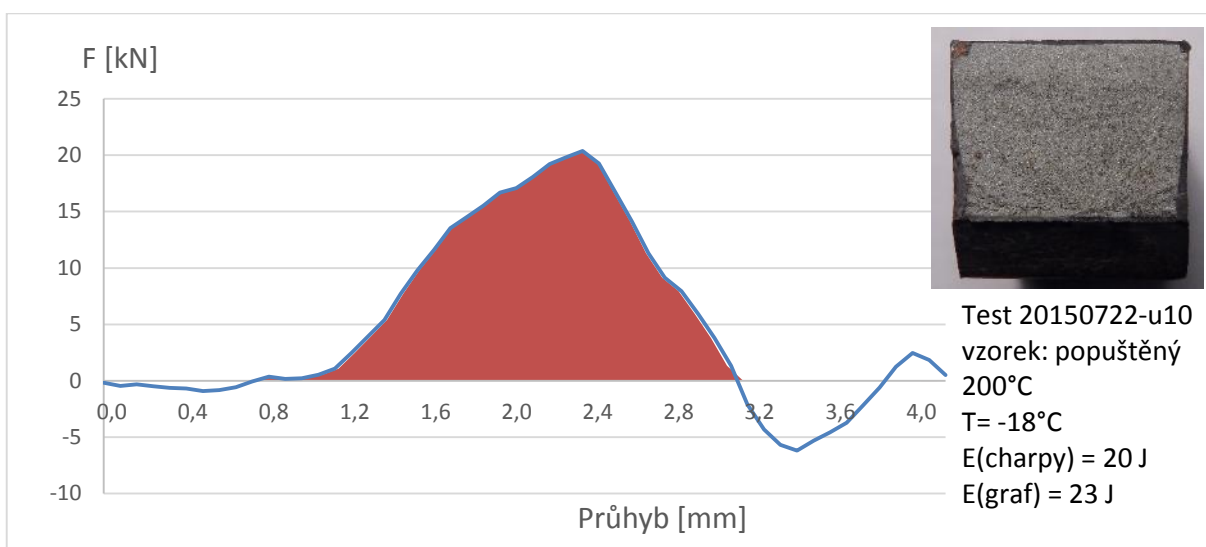
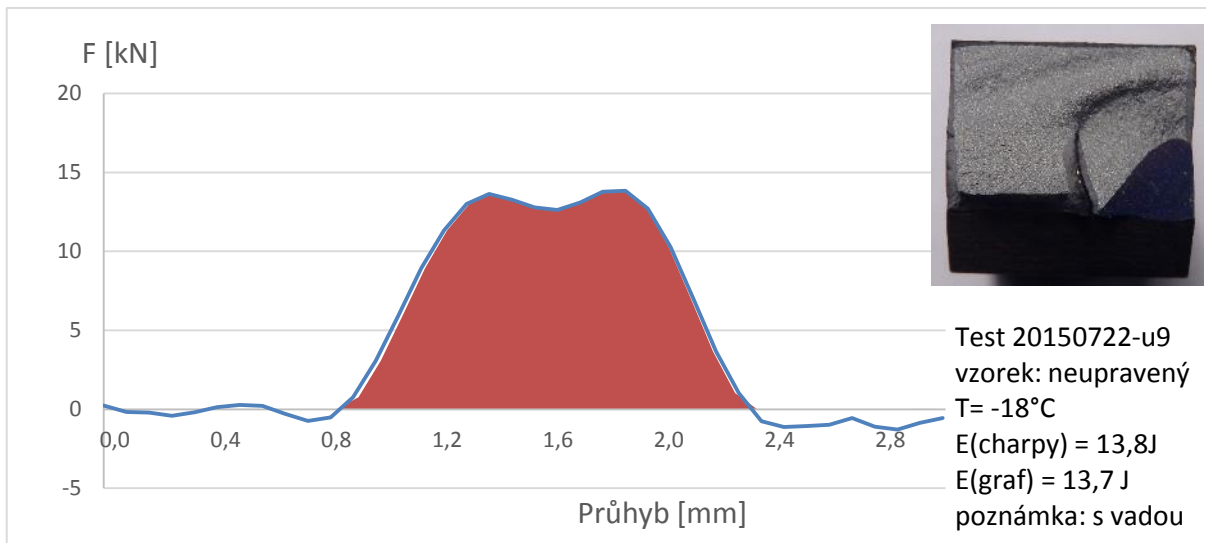
# Příloha A

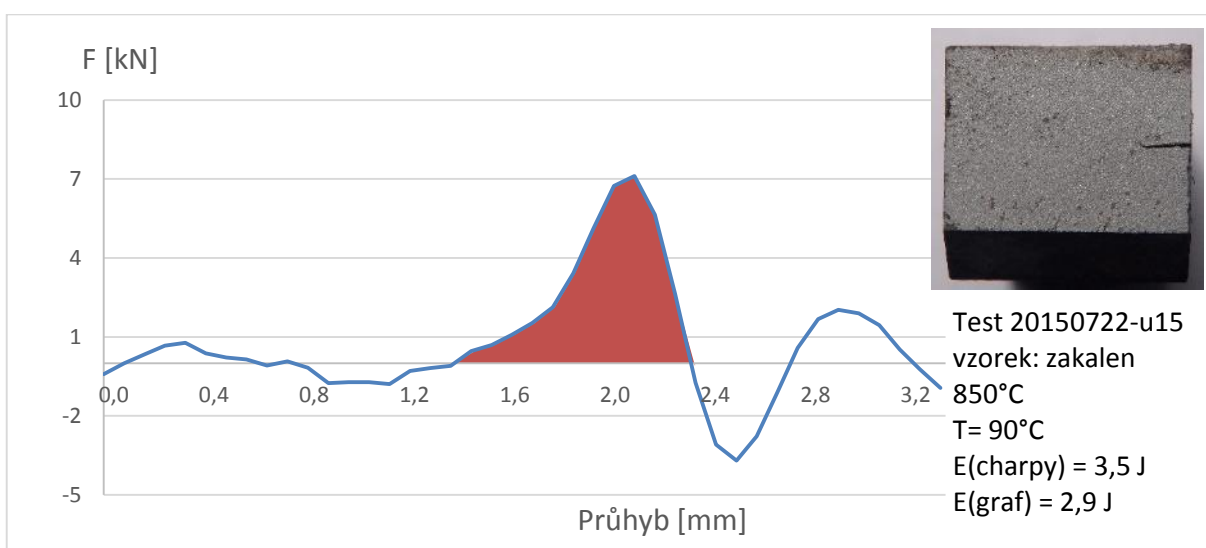
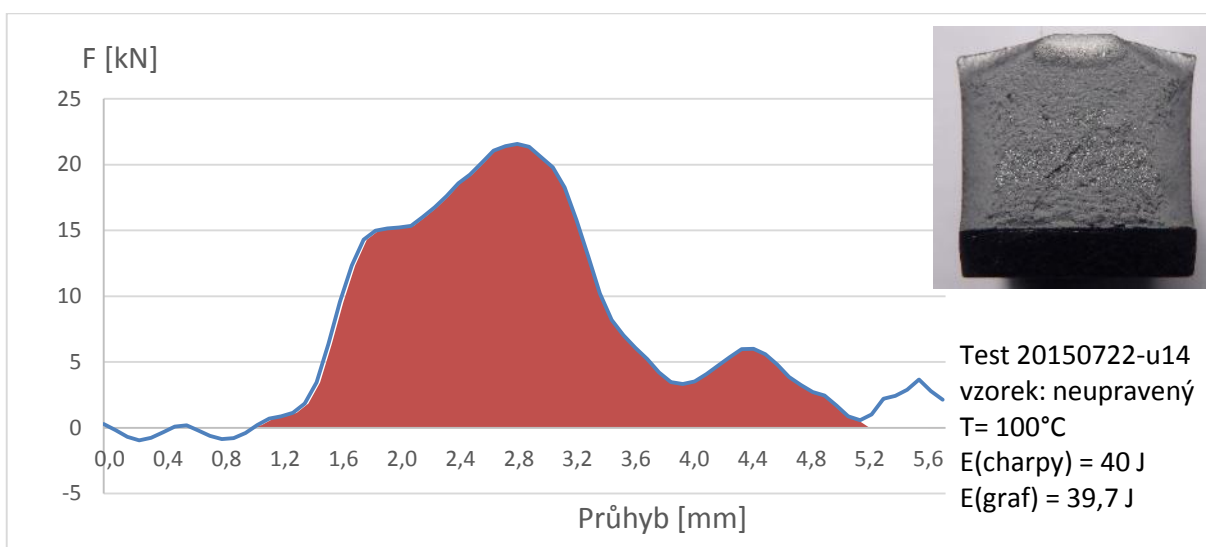
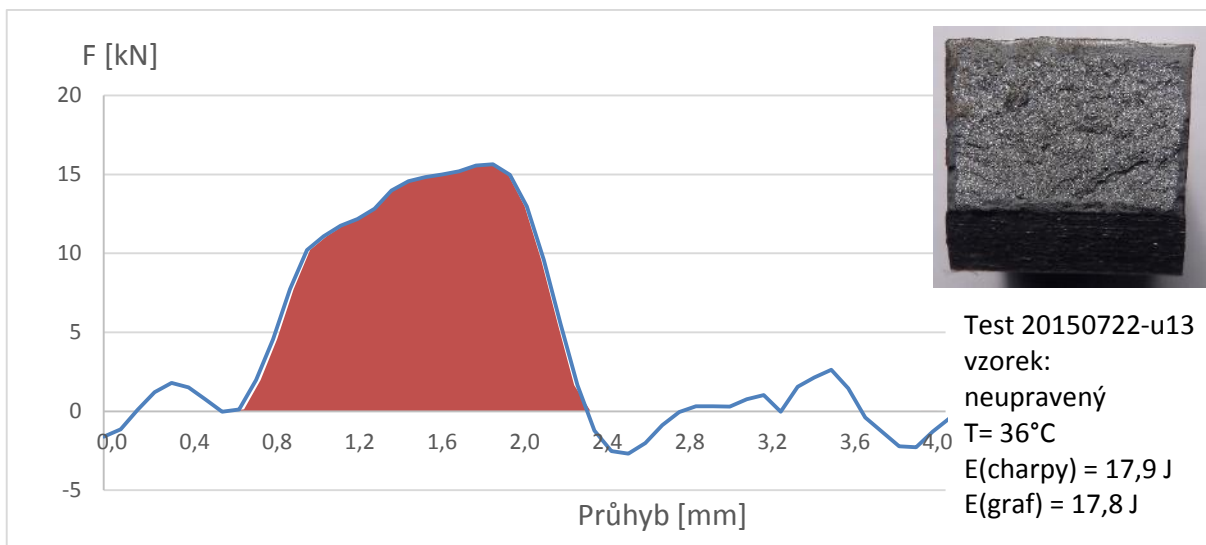


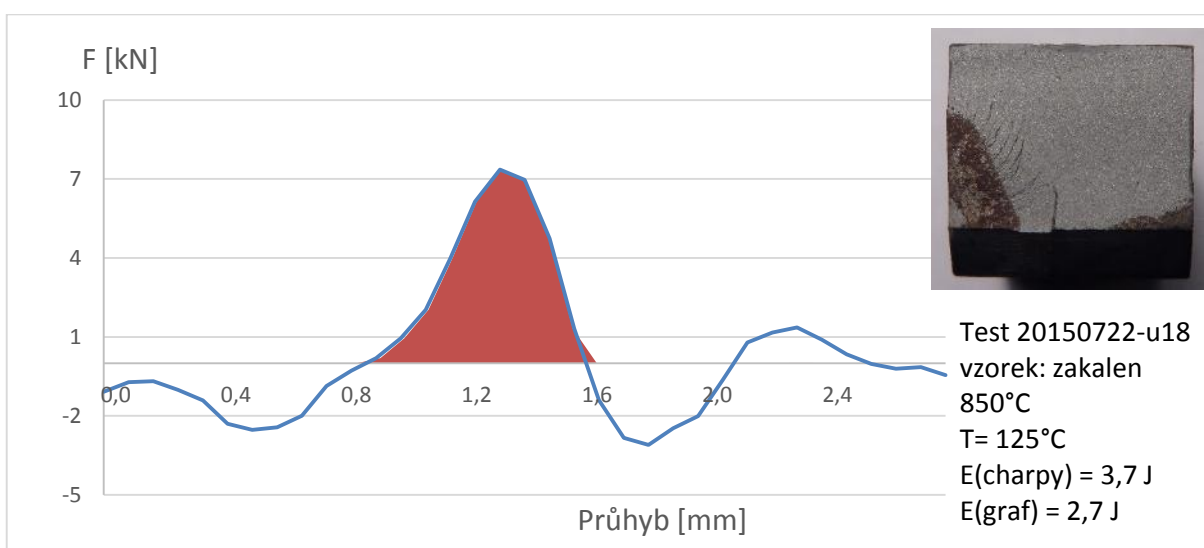
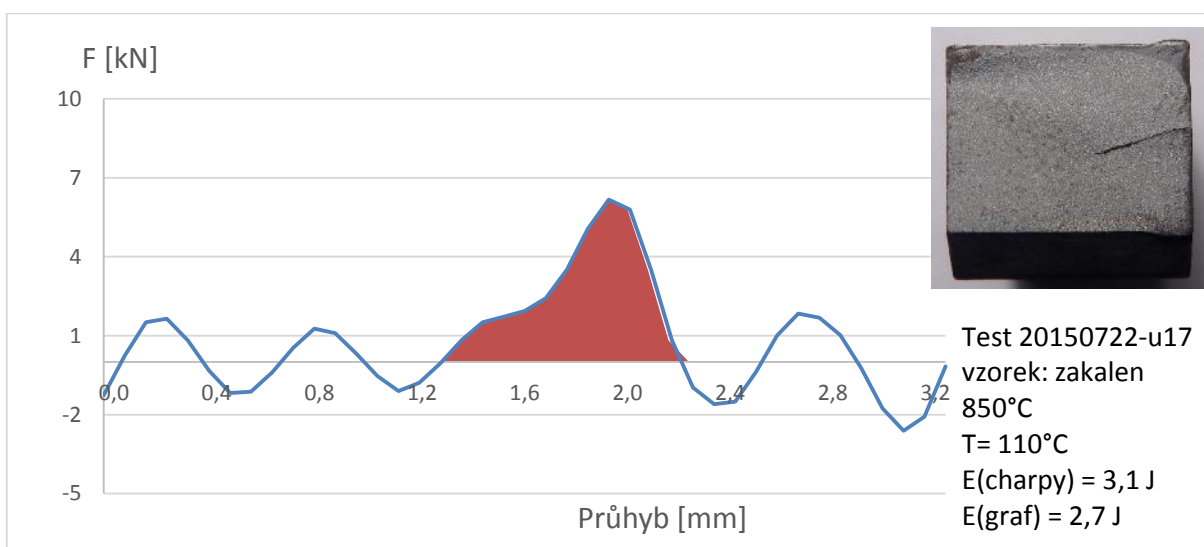
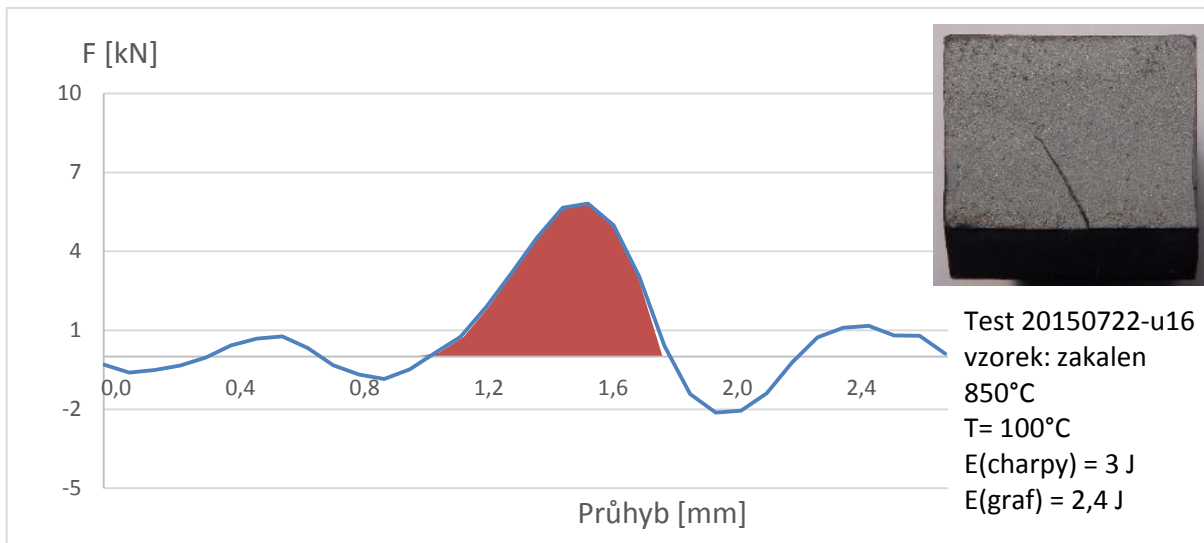


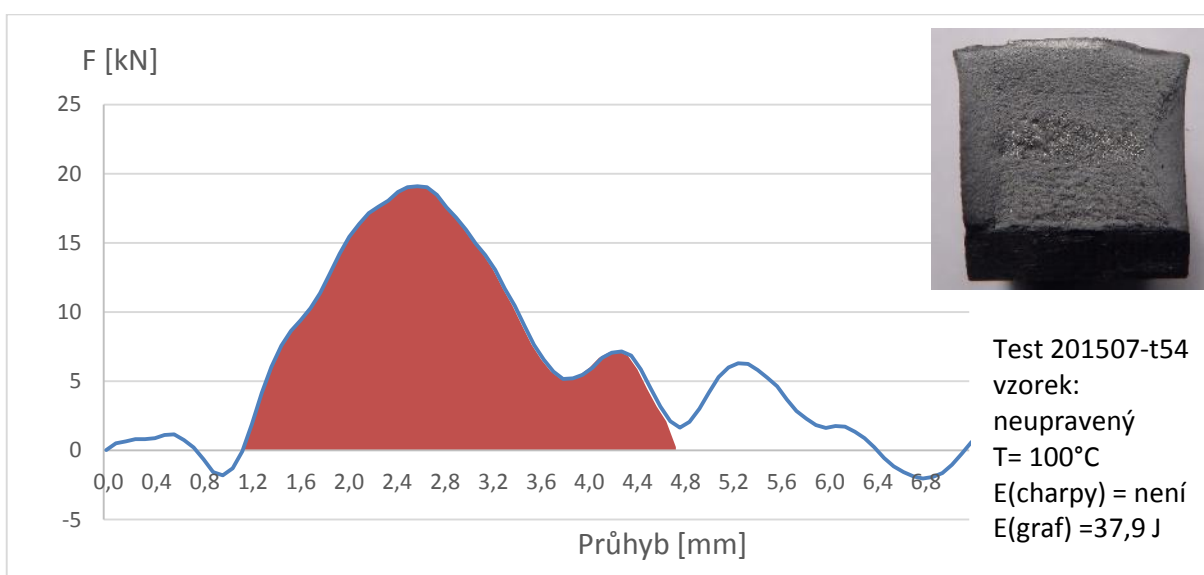
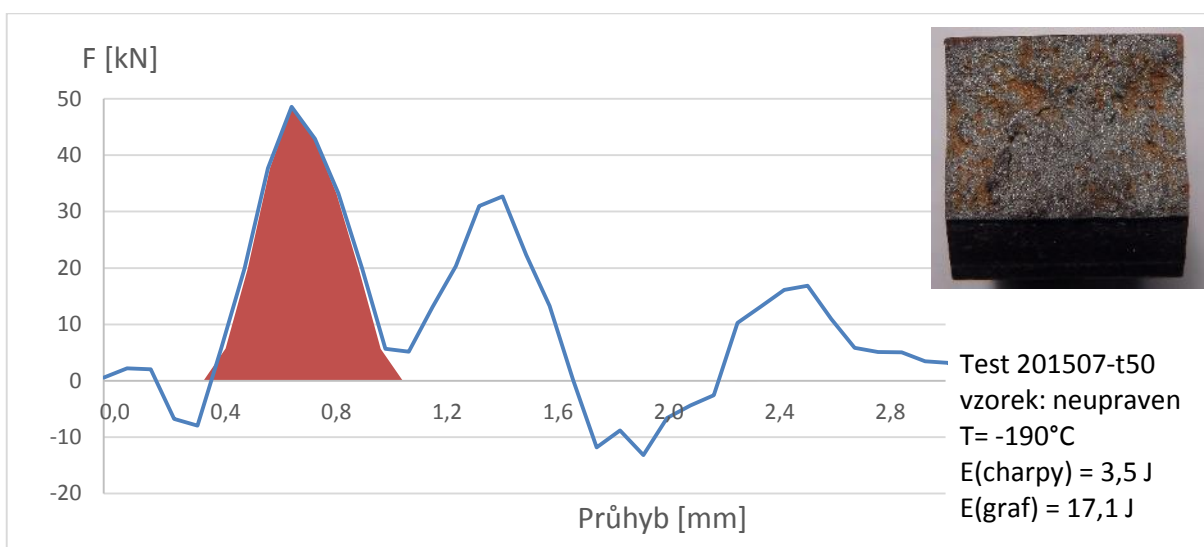
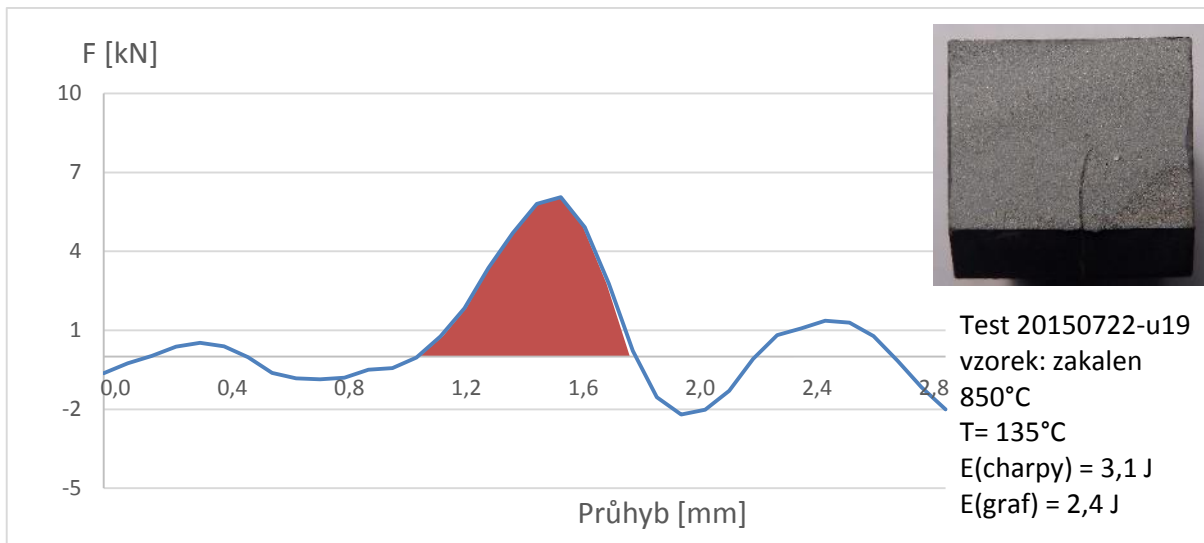


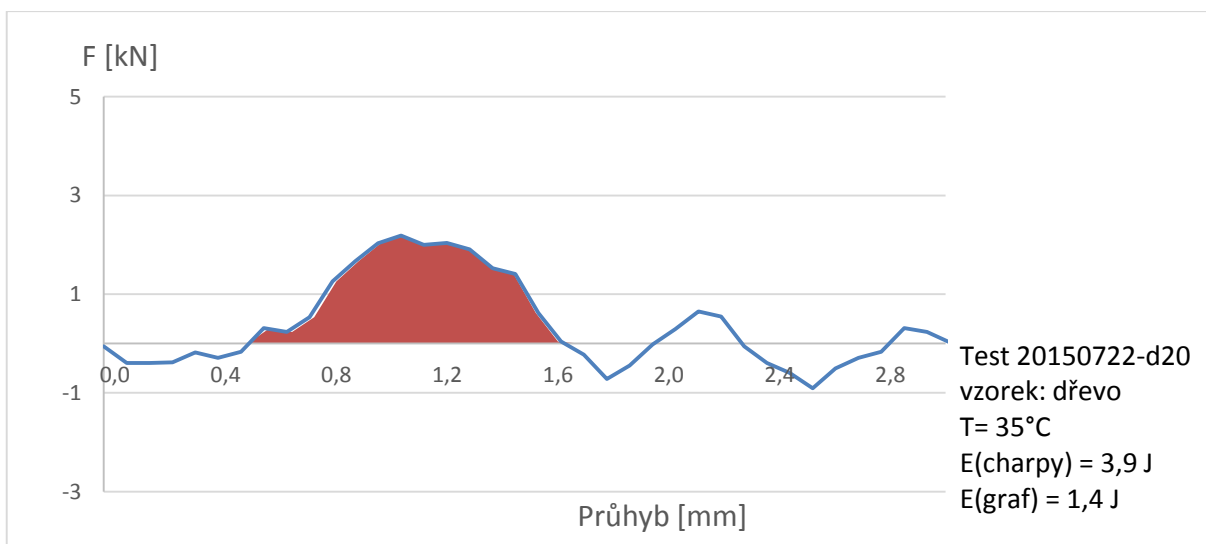
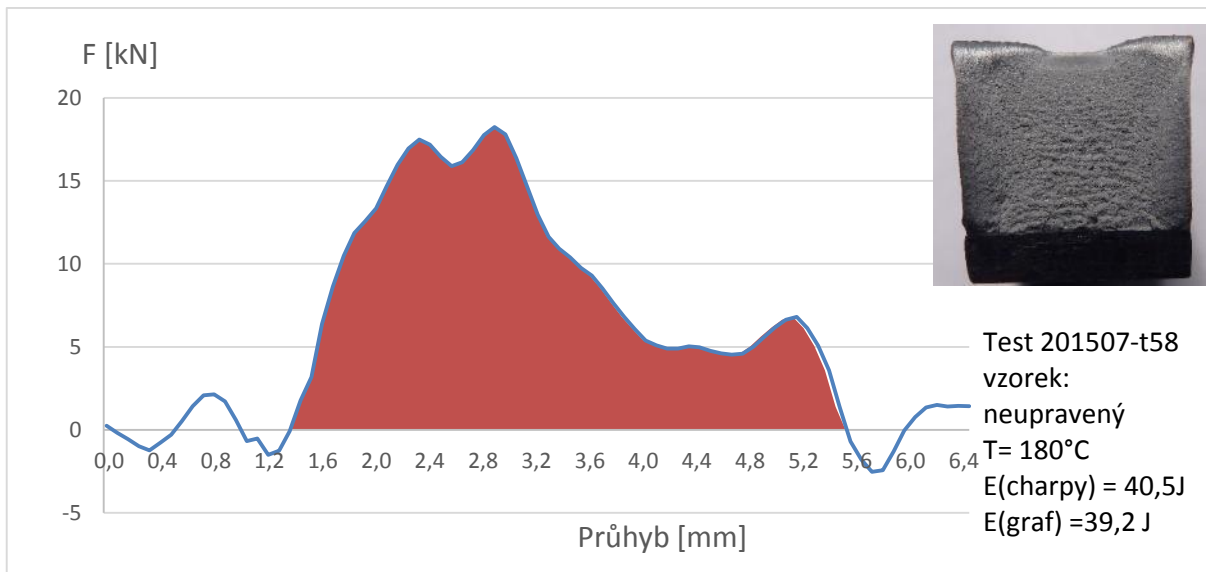












# Příloha B

## Ocel 12 050

Materiál : Uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení

Označení : ČSN 41 2050 (dále jen ocel 12 050)

Zahraniční ekvivalenty -označení

ISO	C60E4	ISO 683-1-87
EURO	C45	EN 10083-2-91
Ně mecko	C45	DIN 17200-84 ( 1.1191)
Velká Británie	C45	BS EN 100083-2-91
USA	Gr.1043	ASTM A510

Polotovár: Tyč válcovaná za tepla  $\phi$  14 mm Chemické složení v %:

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
dle ČSN	0,42 0,50	0,50 0,80	0,17 0,37	max 0,25	max. 0,30	max 0,30	max 0,040	max. 0,040
aktuální stav	0,51	0,69	0,25	0,15	0,00	0,12	0,023	0,017

Výchozí stav : 12 050.1 - normalizačně žíhaný

Mechanické vlastnosti dle ČSN 41 20 50 <sup>1)</sup>

			12 050.1
Mez kluzu	<b>R<sub>p0,2</sub></b>	MPa	min. 325
Mez pevnosti	<b>R<sub>m</sub></b>	MPa	min. 540
Tažnost	<b>A<sub>5</sub></b>	%	min 17
Tvrđost		HB	max 225
Kontrakce	<b>Z</b>	%	
Modul pružnosti v tahu	<b>E</b>	GPa	211
Modul pružnosti ve smyku	<b>G</b>	GPa	79

Poznámky: <sup>1)</sup> Lexikon technických materiálů

Aktuální stav: 12 050.3 - měkce žíhaný

Mechanické vlastnosti ( zkušební tyče dle ČSN 42 03 15)

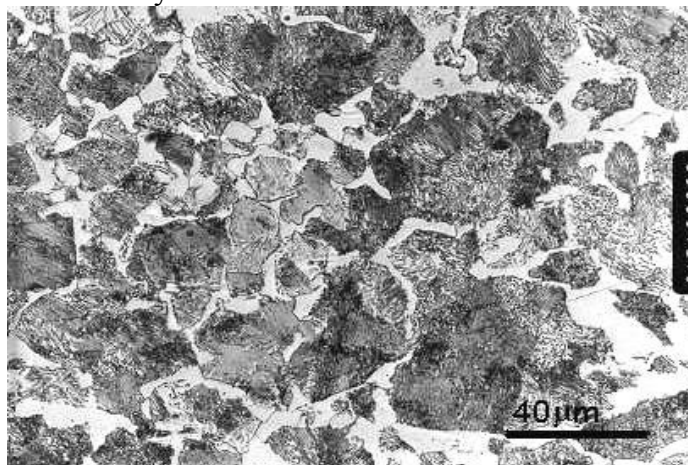


			12 050.3 700°C 24 hod
Mez kluzu	<b>Rp0,2</b>	MPa	281
Mez pevnosti	<b>Rm</b>	MPa	606
Tažnost	<b>A5</b>	%	29
Tvrдост		HV <sub>10</sub>	166
Kontrakce	<b>Z</b>	%	50 , 3
Modul pružnosti v tahu	<b>E</b>	GPa	204

Hollomonova aproximace tahové zkoušky

$$\sigma = k \cdot (\varphi)^n \quad k = 1217 \text{ Mpa} \quad n = 0,26$$

Výchozí struktura oceli 12 050.1

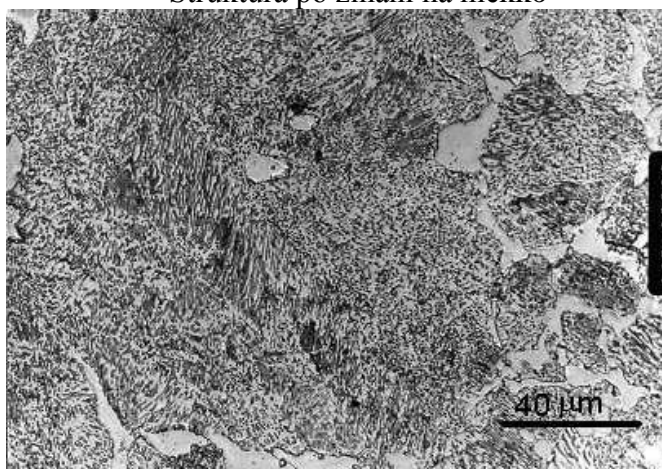


Nital

500 x

Struktura oceli po normalizaci vykazuje lamelární perlit a feritické sít'ové po hranicích zrn .Střední tvrdost HV<sub>10</sub>=196

Struktura po žihání na měkko



Nital

500 x