

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studium akustických projevů při deformačním zatěžování materiálů

Autor: **Lenka BENEŠOVÁ**

Vedoucí práce: **Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lenka BENEŠOVÁ**
Osobní číslo: **S19B0395P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Téma práce: **Studium akustických projevů při deformačním zatěžování materiálů**
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Akustické jevy v materiálech
2. Metoda akustické emise
3. Deformační mechanismy a jejich vliv na akustickou emisi
4. Experimentální program
5. Zhodnocení metody registrace akustické emise při deformačním zatěžování materiálů a konstrukcí pro použití v reálných aplikacích
6. Diskuze
7. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Elektronické informační zdroje a databáze vědeckých článků se zaměřením na NDT techniky a mechanické zkušebnictví

Shull, J., Peter, *Nondestructive Evaluation, Theory, Techniques, and Applications*, Marcel Dekker, 2002.

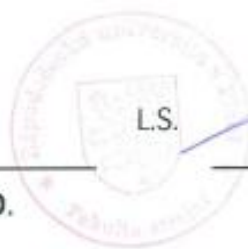
Moore, O., P., *Nondestructive Testing Handbook, Volume 6, Acoustic Emission Testing*, American Society for Nondestructive Testing, 2007.

Kopec, B., *Nedestrukční zkoušení materiálů a konstrukcí*, Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Hájek, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2019

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne: 23. 7. 2020



.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Benešová	Jméno Lenka		
STUDIJNÍ OBOR	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Studium akustických projevů při deformačním zatěžování materiálů			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	99	TEXTOVÁ ČÁST	62	GRAFICKÁ ČÁST	37
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

STRUČNÝ POPIS	<p>Bakalářská práce je rozdělena do 2 částí – teoretické a experimentální části. Teoretická část popisuje metodu akustické emise, šíření zvuku v pevných látkách a deformační mechanismy v materiálech při deformačním zatěžování. Experimentální část obsahuje popis a konfiguraci uskutečněných experimentů, zkoušené materiály, způsob vyhodnocování a hypotézy vysvětlující detekované akustické projevy.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	<p>akustická emise, tahová zkouška, ohybová zkouška, deformační zatěžování, oceli, litina, hliníkové slitiny</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Benešová	Name Lenka	
FIELD OF STUDY	Materials Engineering and Engineering Matallurgy		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Study of acoustic emission in materials as a result of deformation stress		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	99	TEXT PART	62	GRAPHICAL PART	37
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	<p>This Bachelor thesis is composed of two main parts – theoretical and experimental part. The theoretical part contains recherche of an experimental part. It describes method of Acoustic emission, spreads of an elastic waves and deformation mechanisms in materials. The experimental part contains description and configuration of a realized testing, tested materials, evaluation methods and hypothesis which describes detected acoustic emission.</p>
KEY WORDS	<p>acoustic emission, tensile testing, bend testing, deformation stress , steel, cast iron, aluminium alloys</p>

Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu této bakalářské práce panu Ing. Petru Benešovi PhD., za poskytnuté rady, vstřícnost a trpělivost při řešení této bakalářské práce.

Dále bych ráda poděkovala panu Hynkovi Gilíkovi za školení o použitém softwaru akustické emise.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	4
Úvod.....	5
1 Nedestruktivní testování (1) (2)	6
1.1 Základní metody NDT.....	6
1.1.1 Vizuální metoda	7
1.1.2 Prozařovací zkoušky	7
1.1.3 Zkoušky zvukem a ultrazvukem	8
1.1.4 Magnetické prášková metoda.....	8
1.1.5 Indukční zkoušky	8
1.1.6 Kapilární zkoušky	9
2 Akustické jevy v materiálech (7) (8).....	10
2.1 Definice zvuku (9) (7)	10
2.1.1 Porovnání rychlostí zvuku podle prostředí šíření.....	10
2.2 Princip šíření zvuku (7) (13).....	10
2.2.1 Podélné vlnění	11
2.2.2 Příčné vlnění.....	11
2.2.3 Ohybové a torsní vlnění	12
2.3 Šíření zvuku v tekutinách (16).....	12
2.3.1 Rychlost zvuku v tekutinách	12
2.4 Šíření zvuku v pevných látkách.....	13
2.4.1 Rychlost zvuku v pevných látkách.....	13
2.5 Fyzikální veličiny popisující zvuk.....	13
2.5.1 Frekvence	13
2.5.2 Intenzita zvuku (19)	14
2.5.3 Hladina akustické intenzity	14
2.5.4 Akustický tlak	14
3 Akustická emise (20) (21) (22) (23) (24) (25)	14
3.1 Fyzikální jev akustické emise.....	15
3.1.1 Elastické napěťové vlny	15
3.2 Detekce veličin při AE	16
3.2.1 Snímače AE.....	18
3.2.2 Veličiny AE.....	19
3.3 Jevy ovlivňující vznik AE	20
3.3.1 Kaiserův jev.....	20
3.3.2 Akustická emise doznívající po přerušení zatěžování (29).....	20

3.3.3	Felicity jev	20
3.3.4	AE u cyklicky namáhaných součástí.....	21
4	Deformace a akustická emise (30) (31) (20) (24) (23) (21) (22) (32).....	22
4.1	Krystalická mřížka v pevných látkách.....	22
4.1.1	Krystalické mřížky	22
4.2	Poruchy krystalické mřížky	24
4.2.1	Bodové poruchy	24
4.2.2	Čárové poruchy	25
4.2.3	Plošné poruchy	26
4.2.4	Objemové poruchy	26
4.3	Vliv pohybu dislokací na AE.....	26
5	Praktické možnosti využití AE (31).....	27
5.1	Testování tlakových nádob a potrubí.....	27
5.2	Testování infrastruktury	27
5.3	Testování parních nebo plynových turbín	28
5.4	Akustická emise v letectví.....	28
6	Experimentální část.....	29
6.1	Použité měřicí přístroje.....	29
6.2	Použité materiály	31
6.2.1	EN AW 6063 (40) (41).....	31
6.2.2	EN AW 2024 (43)	31
6.2.3	EN AW 7075 (46)	32
6.2.4	HX340 (47)	32
6.2.5	DC-01 a DC-05 (49).....	32
6.2.6	S235 (51).....	33
6.2.7	C45 (52).....	33
6.2.8	EN GJL 250 (54).....	33
6.3	Tahová zkouška	34
6.3.1	Spojitosť mezi průběhem AE a průběhem tahové zkoušky.....	35
6.3.2	AE při namáhání tahem u hliníkových slitin.....	37
6.3.3	AE ocelí při tahovém zatěžování	40
6.3.4	AE při namáhání tahem u litin	43
6.4	Ohybová zkouška	45
6.4.1	AE při namáhání ohybem u hliníkových materiálů	46
6.4.2	AE při namáhání ohybem u oceli a litiny.....	51
6.5	Diskuze výsledků.....	53
	Závěr.....	54

7	Citovaná literatura	55
8	Seznam příloh.....	58
9	Přílohy	59

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Jednotky	Význam
AE		Akustické emise
NDT		Nedestruktivní testování
RTG-zářen		Rentgenové záření
c_K	m/s	Rychlost zvuku v kapalině
c_P	m/s	Rychlost vlnění u plynů
ρ	kg/m ³	Hustota
k	Pa	Modul pružnosti kapaliny
γ	Pa ⁻¹	Součinitel objemové roztažnosti
X	-	Poissonova konstanta
p	Pa	Tlak/akustický tlak
c_l	m/s	Rychlost šíření podélného vlnění
E	Pa	Modul pružnosti v tahu
c_t	m/s	Rychlost šíření příčného vlnění
G	Pa	Modul pružnosti ve smyku
f	Hz	Frekvence
T	s	Perioda
c	m/s	Rychlost světla
λ	m	Vlnová délka
I	W/m ²	Intenzita zvuku
P	W	Akustický výkon
S	m ²	Plocha
C1	-	Count 1
C2	-	Count 2
RMS	mV	Energie elastických vln

Úvod

Akustická emise je v současnosti stále se vyvíjející metoda řadící se mezi nedestruktivní testování, i když k samotnému vzniku akustické emise je potřeba buzení, které ve struktuře materiálu vyvolá dynamické procesy. Tato metoda má široké pole využití, ale těžko se s její pomocí dosahuje jednoznačných a přesných výsledků.

Pro zkoumání akustické emise jsou využívány různé typy zařízení, např. osciloskopy a různá specifická laboratorní zařízení. Pro účely této bakalářské práce bylo použito laboratorního zařízení na bázi piezoelektrických snímačů.

V teoretické části jsou uvedeny základní metody nedestruktivního testování a jejich využití. Dále pak struktury pevných látek a jejich deformační mechanismy, specifikace zvuku, a šíření elastických vln ve strukturách pevných látek. S tímto úzce souvisí jevy, které ovlivňují a limitují vznik akustické emise. Tyto rešeršní podklady poté slouží jako základ pro samotnou experimentální část.

Cílem experimentální části této bakalářské práce je přinést základní náhled na testování pomocí akustické emise a podat záznamy o dynamických procesech ve strukturách materiálů, které se, mimo jiné, projevují i akustickou emisí. Nejpodstatnější částí této práce je správně interpretovat akustické projevy v důsledku deformačního zatěžování a na jejich základě dospět k podloženým hypotézám, které vysvětlují tyto akustické projevy jako přímý důsledek dynamických dějů ve struktuře.

Na základě těchto hypotéz spolu s dalším experimentováním v různých oblastech bude možné zajistit využitelnost akustické emise jako samostatné metody pro hodnocení destruktivních i nedestruktivních dějů v důsledku deformačního zatěžování.

1 Nedestruktivní testování (1) (2)

Využívá se pro zkoušení materiálu, nebo výrobku bez toho, aby bylo zkouškou narušeno jeho další použití. Při NDT zjišťujeme vady a necelistvosti produktu, ne jeho funkčnost nebo odolnost vůči namáhání.

V prvopočátcích bylo nedestruktivní testování považováno pouze za laboratorní zajímavost, která nemá v praxi příliš velké uplatnění. Ovšem už ve 20. letech 20. století se toto testování vyvinulo v základní způsob zkoumání produktů, jelikož vizuální kontrola už nebyla dostačující, vzhledem k stoupajícím nárokům na výrobu a pokrokům v průmyslové výrobě.

NDT je nepostradatelnou součástí pro podniky v zajištění jejich konkurenceschopnosti a ekonomického rozvoje. Díky zjišťování vad u konkrétních produktů pomocí NDT mimo jiné zajišťujeme spolehlivost výrobků a z toho plynoucí bezpečnost, spokojenost zákazníků, kvalitu a snížení výrobních nákladů.

1.1 Základní metody NDT

Při klasifikaci nedestruktivního testování se používá označení metody a techniky. Metody se sdružují do skupin technik NDT, které jsou charakterizovány na základě pěti základních činitelů.

„Americký výbor ustanovený ad hoc pro nedestruktivní zkoušení při Národním poradním orgánu pro materiály (NMAB – The National Materials Advisory Board – ad hoc Committee on Nondestructive Evaluation) vytvořil systém, který klasifikuje NDT pracovní do šesti hlavních metodických kategorií:

1. Vizuální
2. Pronikavé záření (radiace)
3. Magneticko-elektrické
4. Mechanické vibrace
5. Termální
6. Chemické/elektrochemické

Každá metoda je komplexně charakterizována v termínech pěti základních faktorů:

1. Zdroj energie neboli médium použité k sondování předmětů. (rentgenové paprsky, ultrazvukové vlny, termální záření)
2. Charakter signálů, zobrazení nebo předznamenání vyplývající ze vzájemného působení s předmětem (útlum rentgenových paprsků, útlum ultrazvukových vln, odraz ultrazvuku)
3. Prostředky k detekování nebo snímání výsledných signálů (fotoemulze, piezoelektrický krystal, indukční cívka)
4. Prostředky indikování nebo zaznamenávání signálů (měření odchylky, stopa na osciloskopu, radiograf)
5. Základna pro interpretaci výsledků (přímá nebo nepřímá indikace kvalitativní nebo kvantitativní přiměřené závislosti)“ (2)

Další dělení NDT se zaměřuje na lokalitu vady. Zda je zkoumáno umístění vady na povrchu, nebo tzv. vnitřní vady, které jsou umístěné uvnitř zkoumaného výrobku. Dělení podle umístění vady lze nalézt v tabulce 1.

Povrchové vady	Vnitřní vady
Vizuální metody	Ultrazvukové metody
Penetrační (kapilární) zkoušení	Prozařovací metody
Magneticko-elektrické metody	

Tab. 1 - Dělení NDT podle umístění vady.

1.1.1 Vizuální metoda

Jedná se o nejjednodušší a také jednu z nejpoužívanějších nedestruktivní metod testování, ale nemusí být dostatečně exaktní, z části proto, že vysokou mírou záleží na zrakových možnostech pracovníka.

Tuto metodu lze dále rozdělit na přímou metodu, kdy měření probíhá pouze okem nebo lupou a nepřímou metodu, kdy k měření využíváme endoskop nebo periskop a podobně.

1.1.2 Prozařovací zkoušky

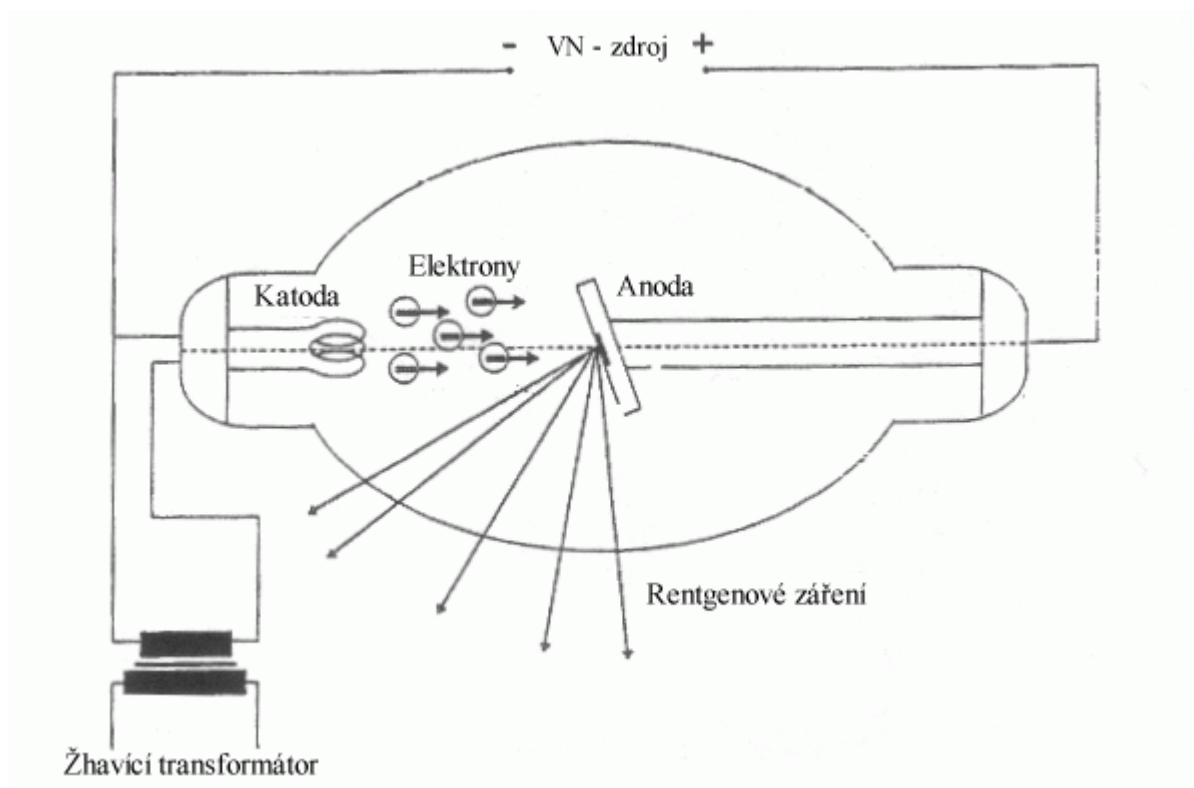
Jde o nejzásadnější metodu nedestruktivního testování, její principy byly objeveny již v roce 1895 W. C. Röntgenem. Díky této metodě došlo k přesunu nedestruktivního testování z laboratorního prostředí do reálné praxe a k rozvoji dalších NDT metod.

Nejrozšířenější je použití této metody při zkoušení svarů, odlitků, konstrukcí apod.

Nejčastěji se jako médium prozařování používá RTG-záření nebo gama záření. V obou případech se jedná o elektromagnetické vlnění s velmi krátkou vlnovou délkou, které je schopné prozařovat předměty z pevných látek. RTG-záření je emitováno rentgenkou přes zkoušený předmět na rentgenový film, nebo v dnešní době na digitální detektor. Pokud jsou v průřezu materiálu přítomné vady, projde záření s větší intenzitou a na filmu se obraz dutiny zobrazí jako tmavší místo.

1.1.2.1 Princip rentgenky

Při emisi rychle letících elektronů vyzařovaných rozžhavenou katodou, jsou tyto elektrony urychlovány potenciálním rozdílem mezi anodou a katodou. Dopadem na anodu jsou elektrony zabrzděny a tím vzniká RTG záření.



Obr. 1 – Rentgenka. (3)

1.1.3 Zkoušky zvukem a ultrazvukem

Používají se zejména pro výrobky s rovně opracovaným povrchem, slouží i k odhalení vad ve velké hloubce. Sonda vyzařuje ultrazvukové vlny, pomocí osciloskopu vyhodnocujeme odraz, lom nebo útlum ultrazvukových vln o vysoké frekvenci (od 1 do 10Mhz). Tento odraz vzniká, pokud se v trajektorii vln nachází fázové rozhraní (například dutina).

Ultrazvukové metody se dělí na průchodové a odrazové, tzv. plus/echo. Odrazové sondy mohou být přímé, dvojité a úhlové. Přímé a dvojité sondy mají využití pro detekci vad rovnoběžných s povrchem, úhlová sonda odhalí vady orientované šikmo, nebo svisle k povrchu.

1.1.4 Magnetické prášková metoda

Slouží k detekci povrchových i podpovrchových vad feromagnetických materiálů za pomoci feromagnetického prášku. Při zmagnetování součásti dojde k vychýlení siločar magnetického toku v místě vady. V těchto místech tedy dojde k hromadění magnetického prášku. Podle indikace vad se magnetické práškové metody dělí na:

Polévací – pomocí suspenze feromagnetického prášku

Naprašovací – součást se poprašuje suchým práškem

Magneticko-fluorescenční – využívá se magnetický fluorescenční prášek



Obr. 2 - Magnetická prášková metoda. (4)

1.1.5 Indukční zkoušky

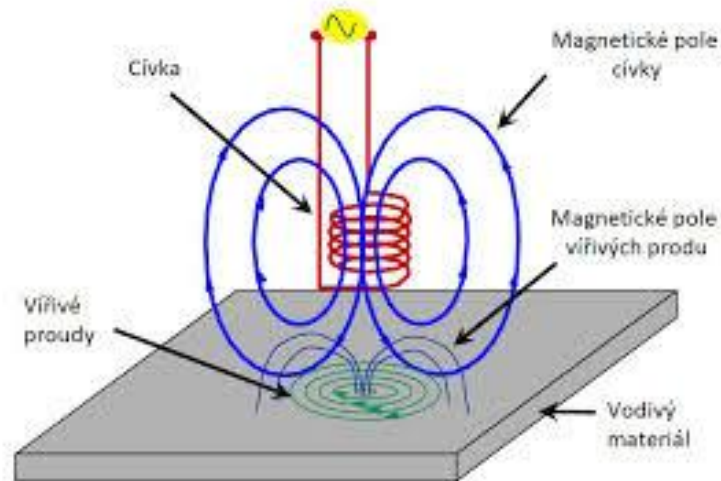
1.1.5.1 Indikace vad na základě rozptylového pole ve zmagnetizovaném předmětu

Při zmagnetování součásti detekujeme porušení homogenního magnetického pole v místě vady pomocí elektromagnetického snímače.

1.1.5.2 Metoda vířivých proudů

Využíváme principu elektromagnetické indukce. Při střídavém elektromagnetickém poli dochází při změně magnetického pole k indukci elektrického napětí nejen v měřené součásti, ale i v okolních vodičích, které se nacházejí v tomto magnetickém poli. Vady v materiálu tedy indikujeme přiblížením magnetického přijímače, založeného na principu cívky, do blízkosti součásti. Pokud je přítomná v dané oblasti nějaká vada, dojde ke změně elektrického napětí na cívce.

Název metody je odvozen od tvaru proudů, které se indukují v rovinách kolmých na vektor magnetické indukce. Tyto proudy tvarem připomínají vodní vír, proto označení vířivé proudy.



Obr. 3 - Vířivé proudy. (5)

1.1.6 Kapilární zkoušky

Používají se k indikaci vad (trhlin, porezity, studených spojů apod.) pouze na povrchu materiálu. Jedná se o jednu z nejstarších defektoskopických metod, vyvinula se už v 19. století při zkouškách těsnosti spojů a odlitků pomocí petroleje a vápenného mléka. Velká výhoda této zkoušky spočívá v možnosti tvarové rozmanitosti a složitosti zkoušeného materiálu oproti ostatním technikám.

Při zkoušce využíváme dobrých vztlínavých a smáčivých vlastností a barevnosti nebo fluorescence některých kapalin, tzv. penetrantů. Povrch zkoušeného materiálu se pokryje pentrantem, po odstranění přebývajícího penetrantu a pokrytí povrchu materiálu kontrastní vývojkou, dojde ke vztlínání penetrantu zbylého ve vadách v podobě barevné nebo fluorescenční stopy na vývojkě.

Metoda je použitelná pro kovové i nekovové materiály, je poměrně rychlá, levná a jednoznačná při vyhodnocování výsledků.



Obr. 4 - Kapilární zkouška. (6)

2 Akustické jevy v materiálech (7) (8)

2.1 Definice zvuku (9) (7)

Zvuk se definuje jako mechanické vlnění pružného prostředí. Zvuk se distribuuje velmi rychle ve formě vln skrz tekutiny v závislosti na typu tekutiny a okolních podmínkách. Prostředí, ve kterém se zvuk šíří, může být libovolné, avšak musí obsahovat částice, které zvuk přenášejí. Například ve vakuu se zvuk nešíří.

Rychlost šíření zvuku závisí kromě teploty a tlaku na hustotě prostředí a jeho stlačitelnosti. Pro představu hustota vody je 997 kg/m^3 a hustota vzduchu je $1,2 \text{ kg/m}^3$ tedy přibližně 800x menší než hustota vody, kdežto stlačitelnost vzduchu je asi 15000x větší než stlačitelnost vody (reálná kapalina je na rozdíl od ideální kapaliny stlačitelná za vysokých tlaků). Proto lze říci, že čím vyšší hustota a dobrá stlačitelnost, tím vyšší rychlost šíření vzduchu v dané tekutině.

Pro porovnání: rychlost zvuku ve vodě je asi 1450 m/s a ve vzduchu asi 340 m/s

2.1.1 Porovnání rychlostí zvuku podle prostředí šíření

Druh média	Rychlost [m/s]	Druh média	Rychlost [m/s]
Kaučuk	40	Voda destilovaná (25 °C)	1497
Oxid uhličitý (25 °C)	259	Voda mořská (13 °C)	1500
Kyslík (25 °C)	316	Beton	1 700
Oxid uhelnatý (25 °C)	338	Stříbro	2 700
Vzduch suchý (25 °C)	346,3	Led	3 200
Helium (25 °C)	965	Mosaz	3 400
Benzín (20 °C)	1170	Měď	3 500
Olovo	1 300	Hliník	5 000
Voda jezerní	1450	Ocel	5 100
Voda destilovaná (20 °C)	1481	Sklo	5 200

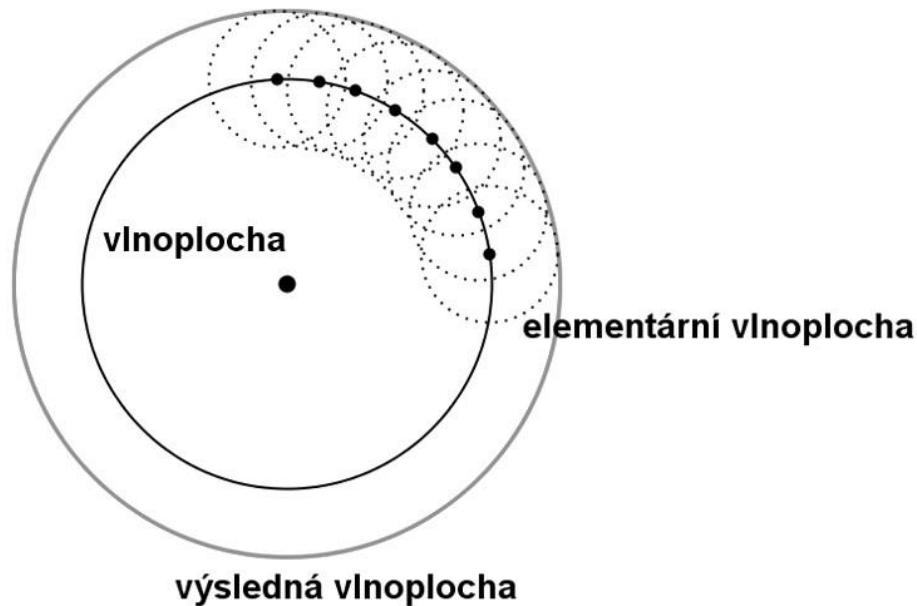
Tab. 2 - Rychlost zvuku ve vybraných prostředích. (10) (11) (12)

2.2 Princip šíření zvuku (7) (13)

Zvukové vlny v materiálu média mohou být definovány jako proces, pomocí něhož dochází k šíření vzruchu z pozice rovnováhy přes objem média bez toho, aby docházelo k transportu hmoty jako takové.

Pokud vlnění narazí na malou překážku, dojde k jeho ohybu, který závisí na velikosti překážky a vlnové délce zvuku. Obecně platí, že čím větší vlnová délka, tím snadněji dojde k ohybu zvuku. Proto například ultrazvuk téměř není ovlivněn ohybem.

Pokud je prostředí homogenní a izotropní, je zvukové vlnění emitováno rovnoměrně tzv. sféricky ve všech směrech od zdroje zvuku, tento jev je nazýván vlnoplocha. Při dalším šíření se každý bod vlnoplochy stává novým zdrojem zvuku, to se nazývá elementární vlnění, ze kterého se zvuk opět šíří sféricky, a tím vzniká tzv. elementární vlnoplocha.

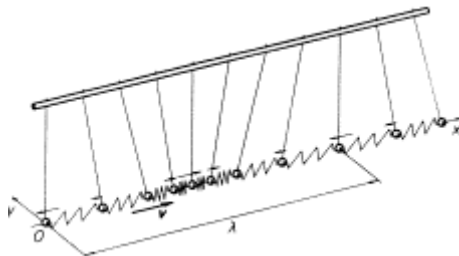


Obr. 5 – Vlnoplocha. (14)

Vlny se mohou vyskytovat ve třech formách, v podélných vlnách, příčných vlnách, nebo jejich kombinaci. Rozdělují se podle směru kmitání částic, které přenášejí zvuk po médiu.

2.2.1 Podélné vlnění

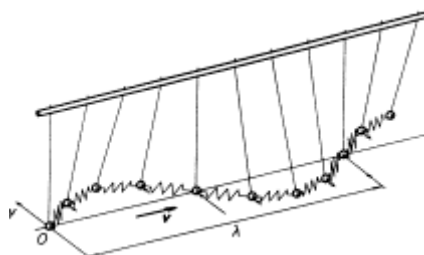
Hlavní pohyb částic je shodný se směrem šíření zvukových vln. Tento typ vlnění se vyskytuje jak při šíření zvuku v plynech, tak i v pevných látkách.



Obr. 6 - Podélné vlnění. (15)

2.2.2 Příčné vlnění

Při vzniku tohoto druhu vlnění se částice média, po kterých se zvuk šíří, pohybují ve směru kolmé na směr šíření zvukových vln. Tento typ zvukových vln se vyskytuje převážně v pevných látkách.



Obr. 7 - Příčné vlnění. (15)

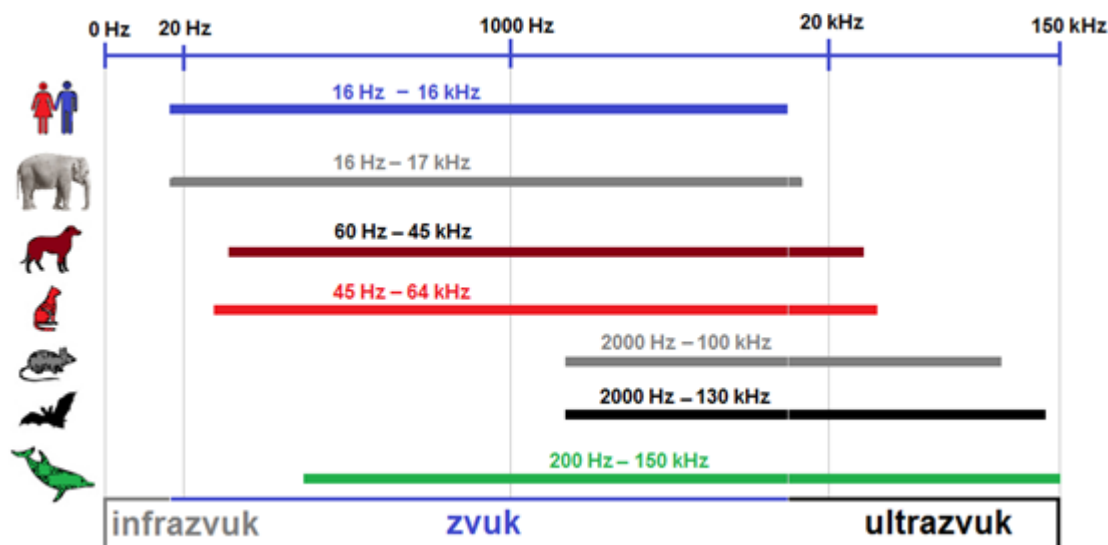
2.2.3 Ohybové a torsní vlnění

Jedná se o kombinaci podélného a příčného kmitání, jsou obzvláště důležité, protože nejsnáze sdílejí a přebírají energii zvuku šířícího se tekutinami.

2.3 Šíření zvuku v tekutinách (16)

Při příchodu zvukových vln z různých směrů se zvukové vlny sami o sobě navzájem neovlivňují, projdou nezměněné skrz. Ovšem přechod několika různých vln skrz tekutinu má markantní vliv na kmitání částic. Částice v tomto případě opisují mnohem složitější pohyb, než při přechodu vlny jen z jednoho směru.

Zvuky se dále dělí podle toho, jestli jsou slyšitelné pro lidi či nikoliv. Rozlišovací schopnosti jsou v tomto směru dost individuální, ale obecně můžeme říct, že lidské sluchové ústrojí je schopné zaznamenat zvuky mezi 16 Hz a 16000 Hz. Pokud mají zvuky nižší frekvenci, než 16 Hz nazývají se infrazvuky. Jde-li o zvuky s vyšší frekvencí než 16 kHz jedná se o ultrazvuk, který sice není slyšitelný pro člověka, ale například pro psy, netopýry nebo velryby ano.



Obr. 8 - Frekvence zvuku. (17)

Často dochází k přenosu zvuku z jednoho objemu tekutiny do druhého pomocí zvukových vln v pevných látkách. Typický příklad toho jevu je přítomný zejména v rozsáhlých budovách, kdy je slyšet neustále zvuk ostatních obyvatel těchto budov.

2.3.1 Rychlost zvuku v tekutinách

Uvnitř kapaliny se zvukové vlnění šíří podélným vlněním ovšem na povrchu se šíří příčným vlněním. To se projeví vznikem vln na hladině. Pro odvození rychlosti zvuku je možno použít Hookeův zákon pro pružné materiály. Rychlost zvuku v kapalině je c_k . Je závislá na hustotě kapaliny ρ a modulu pružnosti kapaliny k , popřípadě součiniteli objemové stlačitelnosti kapaliny γ . Udává ji rovnice

$$c_k = \sqrt{\frac{k}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\gamma\rho}} \quad [1]$$

Rychlost vlnění plynů c_p , se spočítá pomocí Poissonovo konstanty X , tlaku daného plynu p a jeho hustotě ρ . Vztah mezi veličinami udává rovnice

$$c_p = \sqrt{\frac{X \cdot p}{\rho}} \quad [2]$$

2.4 Šíření zvuku v pevných látkách

V pevných látkách je analýza a modelování šíření zvuku mnohem složitější než u tekutin, protože kmitání částic je omežováno vazbami ve struktuře v pevných látkách. Další faktor, ovlivňující šíření zvuku v kapalinách, je, že šíření příčného vlnění závisí na frekvenci tohoto vlnění. Například pokud je hozen kámen na zamrzlý rybník jsou slyšet hlubší tóny, protože v ledu cestují tóny s vyšší frekvencí rychleji.

2.4.1 Rychlost zvuku v pevných látkách

Podmínka šíření zvuku v určitém prostředí říká, že dané prostředí musí být pružné, aby v něm docházelo k přenosu zvuku. Pro odvození rychlosti zvuku v pevných látkách je možné použít Hookeův zákon.

Podélné vlnění se šíří rychlostí c_l , která závisí na hustotě prostředí ρ a modulu pružnosti v tahu E . Udává jí vztah:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [3]$$

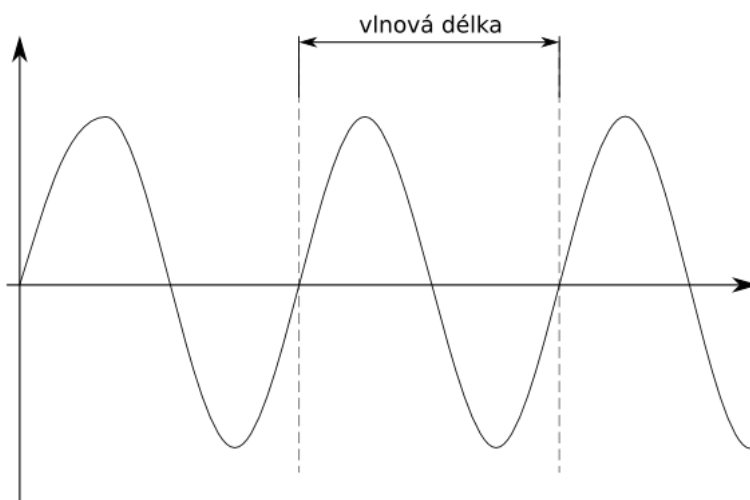
Rychlost příčného vlnění c_t závisí taktéž na hustotě ρ a modulu pružnosti ve smyku G

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [4]$$

2.5 Fyzikální veličiny popisující zvuk

2.5.1 Frekvence

Zvuk se šíří periodickým kmitáním částic média. Délka periody tohoto kmitání je nazývána vlnová délka, 1 vlnová délka je v tomto případě 1 uzavřený cyklus. A frekvence udává, jak často se opakují tyto cykly za sekundu.



Obr. 9 - Vlnová délka. (18)

Jednotka frekvence je Hertz [Hz] a je definována právě jako počet uzavřených cyklů za sekundu. Je možno ji určit pomocí vztahu... kde T je doba periody

$$f = \frac{1}{T} \quad [5]$$

Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Lenka Benešová

Závislost mezi rychlostí světla a frekvencí udává vztah ... kde c je rychlost světla, λ je vlnová délka a f je frekvence.

$$c = f * \lambda \quad [6]$$

2.5.2 Intenzita zvuku (19)

Udává množství energie vlnění za sekundu, které projde plochou kolmou na směr šíření vln. Je udáváno ve W/m^2 . Je charakterizována vztahem, kde I je intenzita, P je akustický výkon a S je jednotka plochy.

$$I = \frac{P}{S} \quad [7]$$

Příklady akustické intenzity včetně prostředí, kde se vyskytují, udává tab. 3

akustický tlak p [Pa]	akustická intenzita I [$W \cdot m^{-2}$]	příklad prostředí, kde se vyskytuje
cca 60	cca 10	práh bolesti
2	10^{-2}	diskotéka
0,2	10^{-4}	rušná ulice
0,02	10^{-6}	kancelář
0,002	10^{-8}	obývací pokoj
0,0002	10^{-10}	ložnice v noci
0,00002	10^{-12}	práh slyšení

Tab. 3 - Závislost akustické intenzity. (19)

2.5.3 Hladina akustické intenzity

Citlivost lidského sluchu se, zvyšující se intenzitou snižuje, což lidem umožňuje vnímat slabé signály i při vysokých intenzitách zatímco je sluch chráněn před vysokou intenzitou. Při převedení akustické intenzity na logaritmickou stupnici vzniká hladina akustické intenzity, která je udávána v decibelech [dB].

2.5.4 Akustický tlak

Je okamžitá hodnota tlaku v daném místě, prostředí a čase. Závisí na okamžité změně hustoty (δu) prostředí, způsobené opakujícími se kmity vlnění, a na výchylce ve směru osy x . Je měřený v pascálech [Pa]. Udává ho následující vztah

$$p = -k \frac{\delta u}{\delta x} \quad [8]$$

Příklady akustického tlaku udává tab. 3, ze které je patrné, že se stoupající intenzitou stoupá i akustický tlak.

3 Akustická emise (20) (21) (22) (23) (24) (25)

Další nedestruktivní metoda zkoušení materiálu, se zabývá mechanickým vlněním, které emituje mechanicky nebo tepelně namáhané těleso. Pokud je těleso namáháno takovou silou,

Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Lenka Benešová

že dojde k plastické deformaci, provází tyto změny jev, nazývaný akustický šum. Zároveň vznikají v objemu materiálu, dlouho před samotnou destrukcí, lokální nespojitosti. Vznik a další růst těchto aktivních poruch provází akustická emise, která je pomocí techniky akustické emise detekována.

Akustická emise je tedy metoda nedestruktivního testování, která detekuje fyzikální jev akustické emise, při němž dochází k vzniku akustické emise v důsledku dynamických procesů uvnitř materiálu, jako je například zvětšování trhlin nebo plastická deformace.

Jedná se o jedinou metodu NDT, která je pasivní, nedochází tedy k vysílání žádného signálu materiálu, pouze se zaznamenávají signály, které vyzařuje samotný materiál.

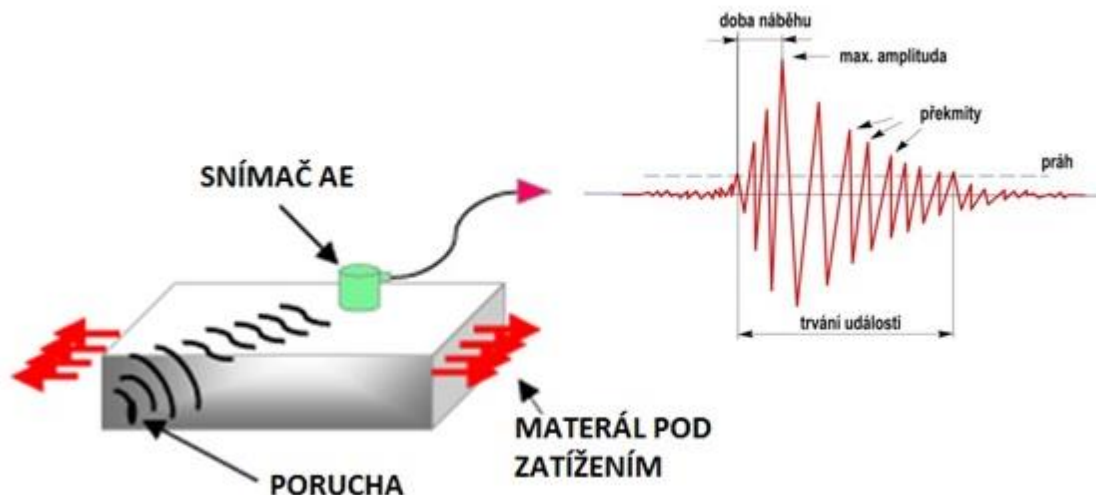
Postup akustické emise: událost akustické emise
 šíření elastické vlny od zdroje k sondě
 detekce akustické emise
 zpracování signálu
 vyhodnocení dat

Velkou výhodou tohoto testování je nenáročnost této metody na tvarové dispozice tělesa, možnost zkoumat rozsáhlé objekty za poměrně krátký čas, i možnost kontinuálního monitorování zkoumaného předmětu. Pro zkoumání například mostních konstrukcí je to nejekonomičtější metoda.

Slabina toho jevu spočívá v obtížném určení lokace akustického zdroje.

3.1 Fyzikální jev akustické emise

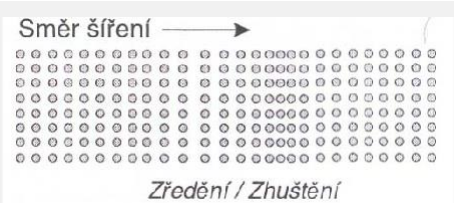
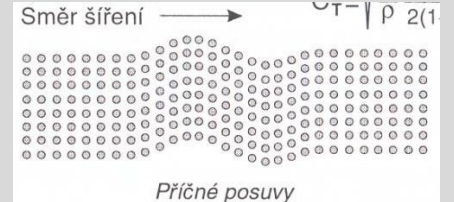
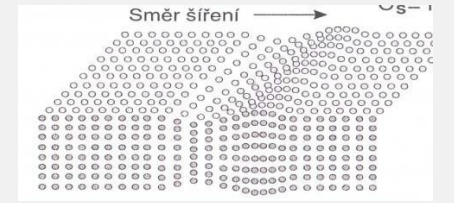
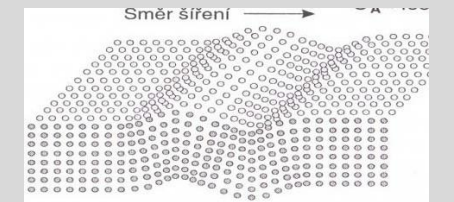
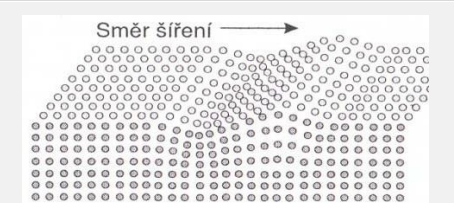
Zdrojem akustické emise může být pohyb dislokací, vznik mikrotrhlin, fázové přeměny, kavitace, plastická deformace, nebo například únik kapaliny z tlakové nádoby apod. Při těchto dějích v mikrostruktuře nebo makrostruktuře dochází k uvolnění energie, která se šíří skrz materiál ve formě tzv. elastických vln.



Obr. 10 - Akustická emise. (23)

3.1.1 Elastické napět'ové vlny

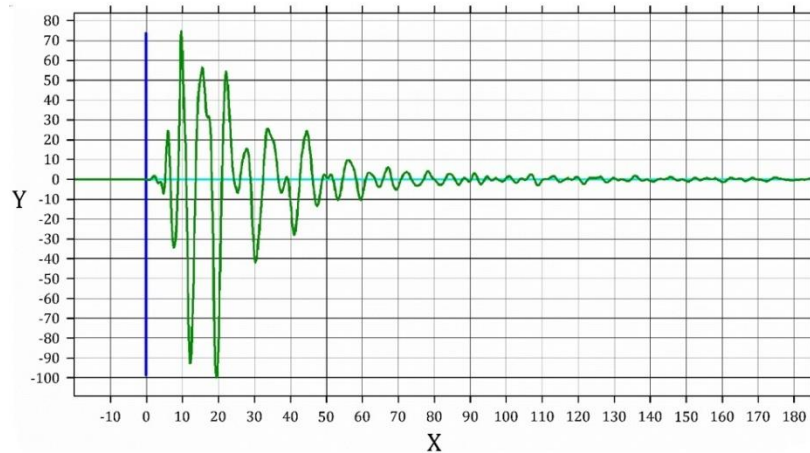
Jsou emitovány ze zdroje napětí. Některé chování vln popisuje následující tab. 4. Jedná se ovšem o idealizované stavy. Šíření elastických vln v reálném materiálu je mnohem složitější, protože reálné materiály nejsou dokonale homogenní, izotropní, apod. Chování struktury materiálu většinou zahrnuje kombinaci několika typů elastických vln.

Název	Popis	Schéma
Podélná vlna v tlusté desce	Materiál nedovoluje smrštění nebo roztažení v příčném směru.	
Příčná (smyková) vlna	Materiál dovoluje smrštění nebo roztažení v příčném směru	
Dilatační vlna v tenké desce - symetrická	Tenká deska dovoluje smrštění a roztažení ve směru kolmo na povrch desky.	
Dilatační vlna v tenké desce - antisymetrická	Tuhost ohybu dlouhých vln ve velmi tenké desce je velmi nízká (rychlost šíření je malá). Kratší vlnové délky se šíří jako vlny.	
Rayleighova vlna na povrchu tlusté desky	V případě ztenčování materiálu přechází v dilatační vlnu antisymetrickou.	

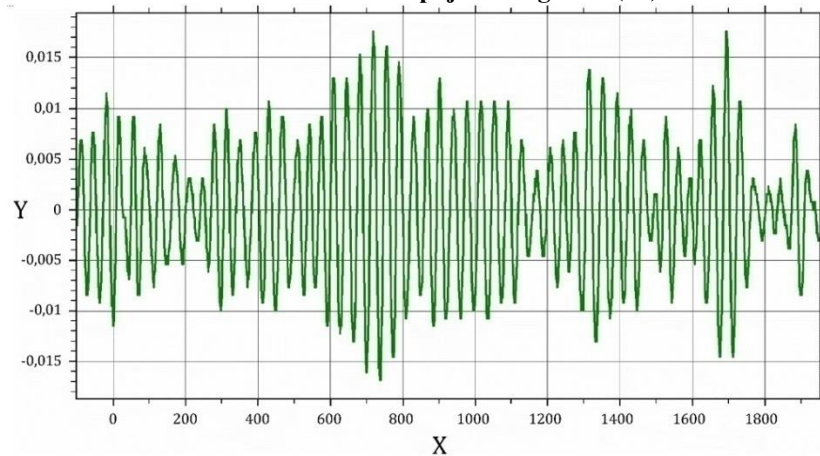
Tab. 4 - Typy elastických vln. (21)

3.2 Detekce veličin při AE

Signál při akustické emisi je zkoumán a vyhodnocován pomocí zavedených veličin. Signál může být nespojitý (obr. 11), ten vzniká při jednorázové emitaci energie ze zdroje AE. Další typ signálu je spojitý (obr. 12), kdy se jednotlivé emisní události překrývají, takže jde vlastně o velké množství emisních událostí, následujících těsně za sebou, typickým příkladem spojitého signálu je únik tekutiny z tlakové nádoby, plastická deformace, apod.

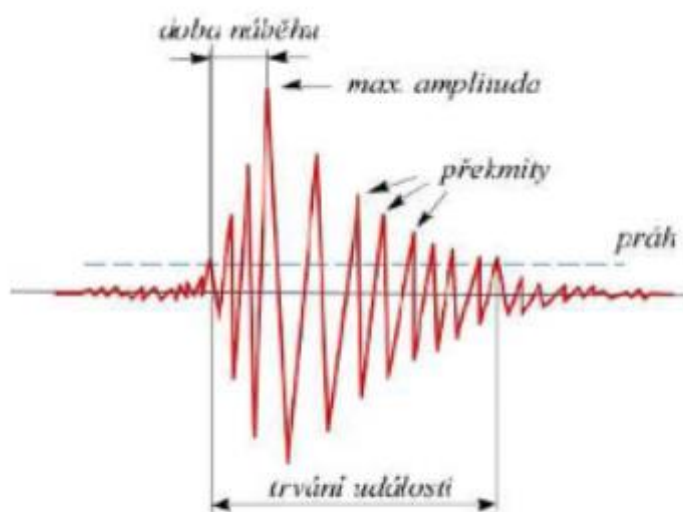


Obr. 11 - Příklad nespojitého signálu. (26)



Obr. 12 - Příklad spojitého signálu. (27)

Emisní událostí je nazývána doba, začíná překročením hodnoty signálu tzv. prahu (termín je vysvětlen níže) a končícím opětovným klesnutím úrovně signálu na nebo pod hranici prahu. Emisní událost je znázorněna na obrázku...



Obr. 13 - Emisní událost. (21)

Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Lenka Benešová

Prahová úroveň je nastavená hodnota, která slouží k „odfiltrování“ například odražených elastických vln apod., pro zlepšení přehlednosti výstupních hodnot. S její pomocí je definována emisní událost.

Při vyhodnocování veličin závisí na tom, jestli se jedná o spojitý či nespojitý signál. U každého z těchto typů výstupů jsou důležité a vyhodnocují se jiné veličiny.

3.2.1 Snímače AE

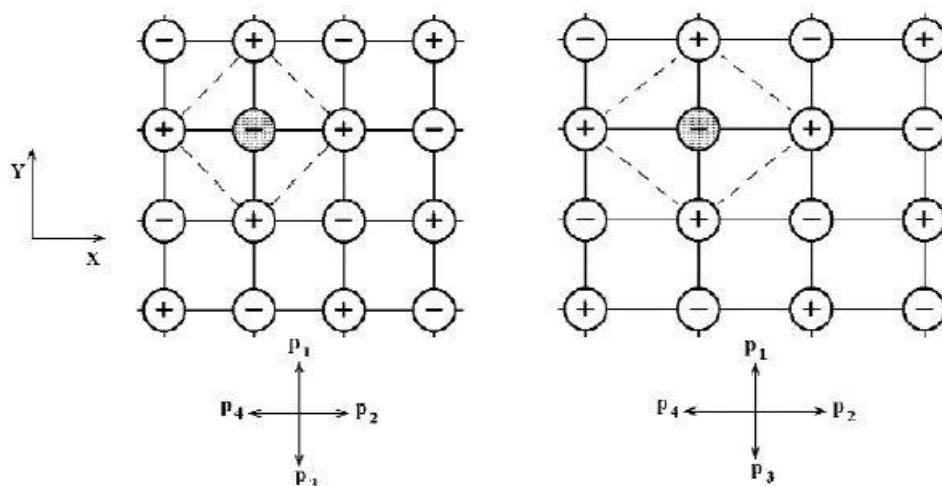
Převádí mechanický tlak způsobený akustickou vlnou na elektrický výstup. Nejčastější typy snímačů jsou uvedeny v tab. 5

Typ snímače	Citlivost [m]	Frekvenční pásmo [MHz]
Piezelektrický rezonanční	10^{-13}	0,1÷0,3
Piezelektrický širokopásmový	10^{-12}	0,1÷2
Kapacitní	10^{-11}	ss÷50
Laserový interferometr	10^{-10}	0,05÷100

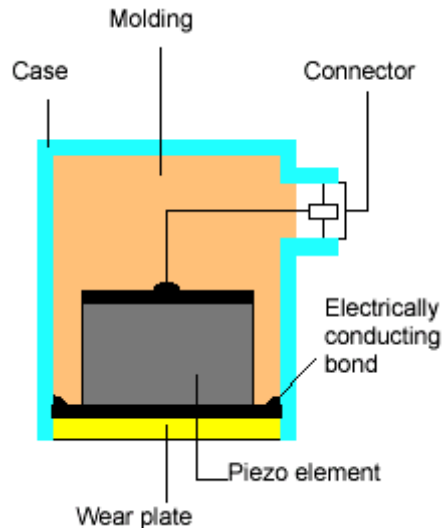
Tab. 5 - Rozdělení snímačů AE. (20)

3.2.1.1 Piezelektrické snímače

Jedná se o nejrozšířenější typ snímačů. Snímač obsahuje piezelektrický element, nejčastěji bývá použit piezokeramický krystal (často monokrystalický křemík), který je izotropní. Piezelektrický jev nastává u materiálů s krystalickou mřížkou, která nemá střed symetrie. Při deformaci (v tomto případě deformace způsobenou akustickou vlnou) se od sebe vzdálí těžiště kladných a záporných iontů, a na určitých plochách krystalu se generuje elektrický proud. Takto deformovaná krystalická mřížka je zobrazena na obr. 14 vpravo.



Obr. 14 - Piezelektrický jev. (25)



Obr. 15 - Piezoelektrický snímač. (23)

3.2.2 Veličiny AE

3.2.2.1 Veličiny u nespojitého signálu

U nespojitého signálu se vyhodnocuje:

- Četnost emisních událostí
- Počet překmitů, které jsou nad úrovní prahu
- Čas prvního překročení prahu
- Maximální a minimální amplituda
- Doba trvání emisní události
- Doba náběhu – udává dobu mezi překročením prahu a maximálním překmitem
- Počet překmitů náběhu – popisuje strmost náběhu, počet překmitů mezi překročením náběhu a maximální amplitudou
- Průměrná frekvence – spočítá se jako počet překmitu k času trvání události
- Energie emisní události
- Mrtvý čas – udává dobu mezi jednotlivými signály

3.2.2.2 Veličiny u spojitého signálu

Vyhodnocování spojitého signálu může být složitější. Je potřeba dát pozor například na kontaminaci signálu provozním šumem.

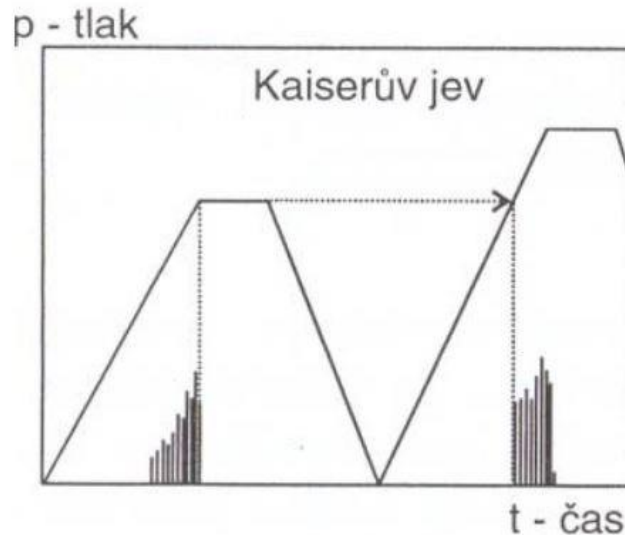
U nespojitého signálu se vyhodnocuje:

- Střední, efektivní a maximální hodnota signálu
- Amplitudová distribuční funkce – slouží k posouzení závislosti překmitů na jednotlivých napěťových úrovních v celém rozsahu amplitud
- Četnost překmitů přes práh
- Histogram amplitud
- Spektrální hustota výkonu
- Energie emisní události

3.3 Jevy ovlivňující vznik AE

3.3.1 Kaiserův jev

Kaiserův jev je základní jev u akustické emise, který uvádí, že elastické vlny jsou emitovány pouze při plastické deformaci. Ta může vzniknout, jen pokud zatížení překročí mez kluzu daného materiálu. Při odlehčení materiálu a jeho opětovném zatížení bude signál vznikat až při překročení předchozího namáhání.



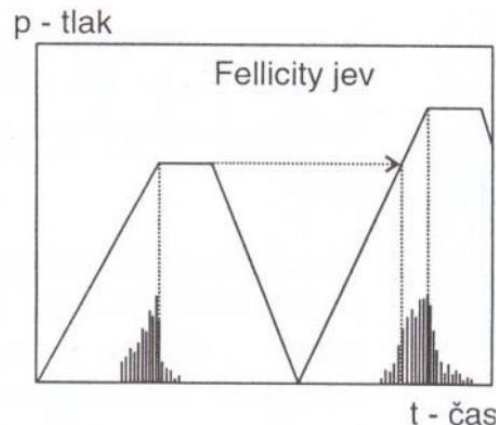
Obr. 16 - Kaiserův jev. (28)

3.3.2 Akustická emise doznívající po přerušení zatěžování (29)

Pokud dochází k akustické emisi i po přerušení zatěžování, materiál se stále plasticky deformuje. To je způsobeno zatěžováním materiálu vyšší rychlostí, než je možnost materiálu relaxovat napětí. Tento jev se nazývá anelastická deformace a oproti elastické vratné deformaci je tato deformace časově závislá a po odtížení se vytrácí postupně. Tuto schopnost nepříznivě ovlivňuje přítomnost koncentrátoru napětí, jako je např. trhlinka.

3.3.3 Felicity jev

K tomuto jevu dochází např. u kompozitních materiálů. Jde o porušení pravidla Kaiserova jevu, protože k akustické emisi dochází už při zatížení nižším, než je maximální hodnota předešlého zatížení, jak je znázorněno na obr. 17.



Obr. 17 - Felicity jev. (28)

3.3.4 AE u cyklicky namáhaných součástí

Příkladem cyklicky namáhaných součástí jsou valivá ložiska. Při jejich testování lze pozorovat amplitudu a frekvenci, které se mění podle stupně poškození ložiska. Na ploše, po které se odvalují ložiska, vznikají imperfekce, jako například dírky a drobné fraktury. S jejich zvyšujícím se počtem postupně vzniká více zdrojů akustické emise, amplituda AE se zvyšuje. Čím více vzniká zdrojů akustické emise, tím více se snižuje vlastní frekvence kmitání.

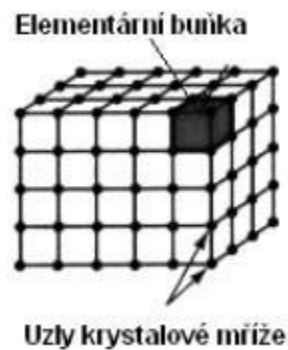
4 Deformace a akustická emise (30) (31) (20) (24) (23) (21) (22) (32)

Deformace u akustické emise začíná přítomností a pohybem vad krystalické mřížky. Nejčastější poruchou krystalické mřížky je dislokace, a ta je také základním mechanismem plastické deformace u kovů.

4.1 Krystalická mřížka v pevných látkách

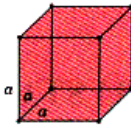
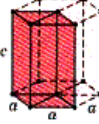
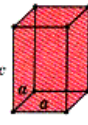

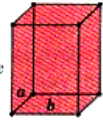
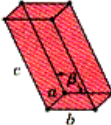
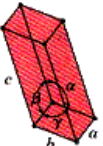
4.1.1 Krystalické mřížky

Pevné krystalické látky krystalizují do krystalických mřížek, které se skládají z elementárních buněk. To je zobrazeno na obr. 18



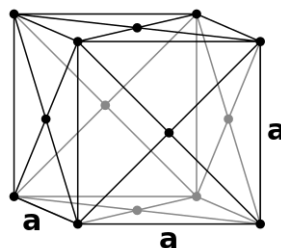
Obr. 18 - Krystalická mřížka. (30)

Elementární buňky se rozlišují podle různé geometrie, jejich základní typy jsou zpracované v následující přehledné tab. 6

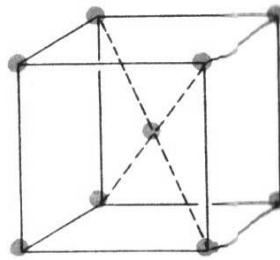
Soustava	Úseky na osách	Úhly	Elementární buňka
Kubická (krychlová) prostá, prostorově a plošně centrovaná.	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Šesterečná (hexagonální), prostá	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Čtverečná (tetragonální), prostá a prostorově centrovaná	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Trigonální - klencová (romboedrická), prostá	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Kosočtverečná (ortorombická), prostá, bazálně, plošně i prostorově centrovaná.	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Jednoklonná (monoklinická), prostá a bazálně centrovaná	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Trojklonná (triklinická), prostá	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

Tab. 6 - Geometrie elementárních buněk krystalických mřížek. (30)

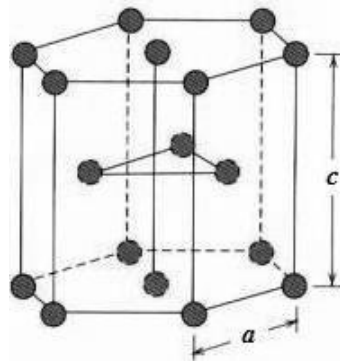
U kovů se nejčastěji vyskytuje mřížka kubická plošně centrovaná obr. 19, kubická prostorově centrovaná obr. 20 a hexagonální mřížka s těsným uspořádáním obr. 21. Krystalické mřížky jsou anizotropní, nemají tedy ve všech směrech stejné vlastnosti. Proto definujeme tzv. skluzové roviny. Jsou to roviny s nejvyšší hustotou atomu, a právě proto, že obsahují větší počet atomů než ostatní roviny, se zde vyskytují menší meziatomární vzdálenosti, a tudíž je pro dislokace nejméně energeticky náročné tyto vzdálenosti překonávat.



Obr. 19 - Kubická plošně středěná. (33)



Obr. 20 - Kubická prostorově středěná. (34)



Obr. 21 - Hexagonální mřížka s těsným uspořádáním. (35)

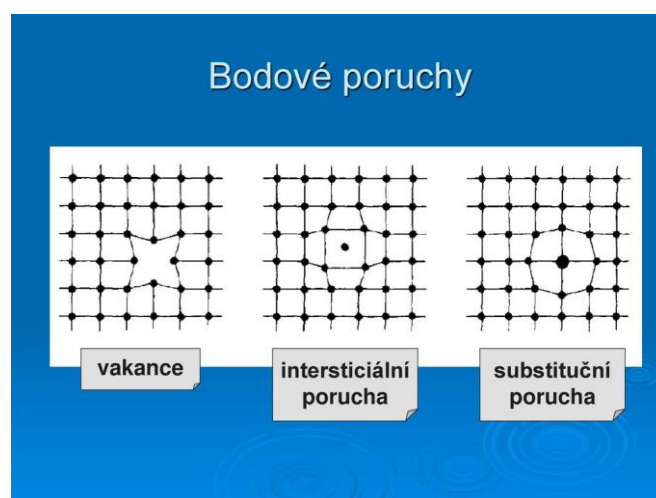
4.2 Poruchy krystalické mřížky

V praxi neexistují dokonalé krystalické mřížky, pokaždé obsahují nějaké vady. Pokud jsou v krystalické mřížce přítomné nějaké poruchy, znamená to, že je daná mřížka elasticky zdeformována. Dělí se podle dimenze následovně:

4.2.1 Bodové poruchy

Bodové neboli bezrozměrné poruchy, také jinak označované jako vakance jsou místa v krystalické mřížce, kde atomy chybí, nebo naopak přebývají, či jsou to atomy jiného typu. Není možné vyrobit materiál, kde se tyto poruchy nebudou vyskytovat. Se zvyšující se teplotou se budou poruchy pohybovat rychleji a dále poroste jejich množství.

Speciálním typem bodových poruch, jsou substituční nebo intersticiální příměsi. Jedná se o cizí atomy, které jsou umístěné v mřížce základního materiálu, jejich umístění je zobrazeno na obr.

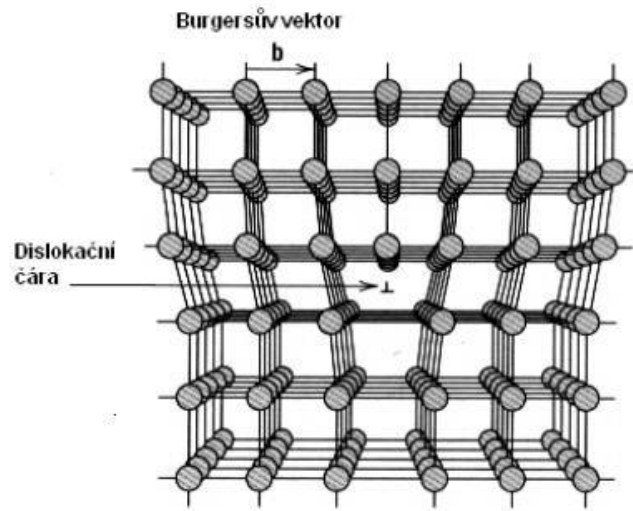


Obr. 22 - Bodové poruchy. (36)

4.2.2 Čárové poruchy

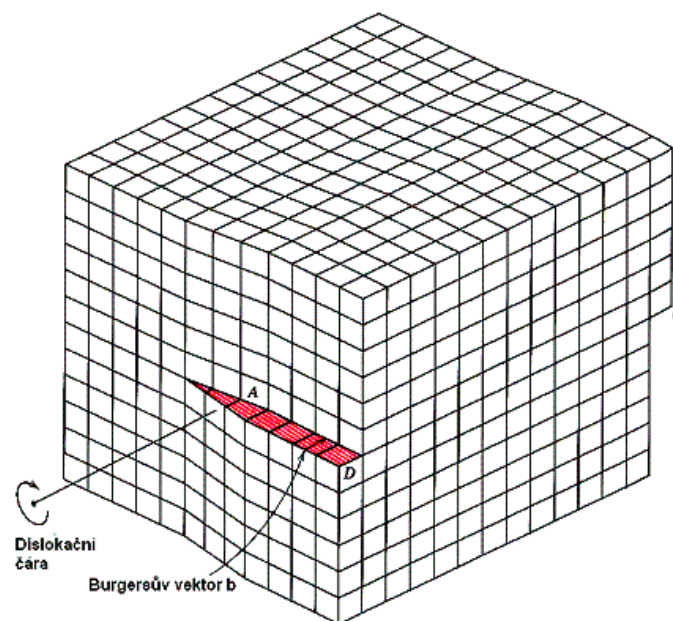
Jinak zvané jednorozměrné poruchy neboli dislokace, jsou nejčastější poruchy materiálu, které jsou zodpovědné za plastickou deformaci. Napětové pole, které je přítomné okolo dislokace, je příčinou pohybu dislokace po krystalické mřížce. Napětové pole nad dislokací má kompresní charakter a pod dislokací dilatační charakter, je tedy možno konstatovat, že dislokace je tímto polem „tažena“. Dislokace jsou 2 základních typů:

- Hranová



Obr. 23 - Hranová dislokace. (30)

- Šroubová



Obr. 24 - Šroubová dislokace. (30)

4.2.3 Plošné poruchy

I plochu materiálu lze považovat za specifický druh poruchy. Vzniká zde napětí povrchu, díky vazbám, které by v objemu materiálu sloužily k propojení jednotlivých buněk.

4.2.4 Objemové poruchy

Jsou několikanásobně větší, než dislokace nebo vakance. Jedná se o póry, trhliny, praskliny nebo např. inkluze. Vznikají přesunem určitého množství atomů při skluzovém pohybu.

4.3 Vliv pohybu dislokací na AE

Jak už bylo zmíněno výše, přesuny dislokací jsou základní příčinou vzniku plastické deformace. I když přesun jediné dislokace neemituje takové množství energie, aby bylo možné ho zaznamenat, pokud ovšem dojde k přesunu všech dislokací jedné fáze, tak se superponují malé množství energie, vyzářené přesuny jednotlivých dislokací, a vzniká akustický šum, který je detekován jako spojitý signál AE.

Procesy plastických deformací:

- Skluz dislokací
- Iniclace trhlín
- Šíření trhlín

Před samotným vznikem trhlín probíhá pouze plastická deformace. Po překročení meze kluzu materiálu vznikají trhliny, které se při detekci AE zobrazí jako nespojitý impuls, protože při této události (a při dalším šíření trhlíny) se prudce uvolní podstatné množství energie.

5 Praktické možnosti využití AE (31)

5.1 Testování tlakových nádob a potrubí

Tlakové nádoby nebo potrubí slouží většinou k uchování nebo distribuci vody nebo plynů. Složitost zkoušení závisí na tvaru a rozměrech zkoumaných objektů. V tomto případě je velice těžké zjišťování umístění vad, protože při úniku tekutin se tlak média projevuje jako spojitý signál. Lokace prasklin se zjišťuje v omezeném množství pomocí triangulace.



Obr. 25 - Tlaková nádrž. (37)

5.2 Testování infrastruktury

Akustická emise u testování mostů je velice důležitá a rozšířená. U ocelových součástí mostu je největší problém koroze. AE slouží k odhalování koroze nebo jiných poruch materiálu pro včasnou opravu nebo výměnu segmentů. U betonových částí je navíc detekce umístění poruchy velice snadné, napoví změna barvy, praskliny popřípadě rovnou drolení se povrchu materiálu. Sondy jsou proto přikládány do blízkosti těchto oblastí a pomocí síly signálu je určována jejich poloha.



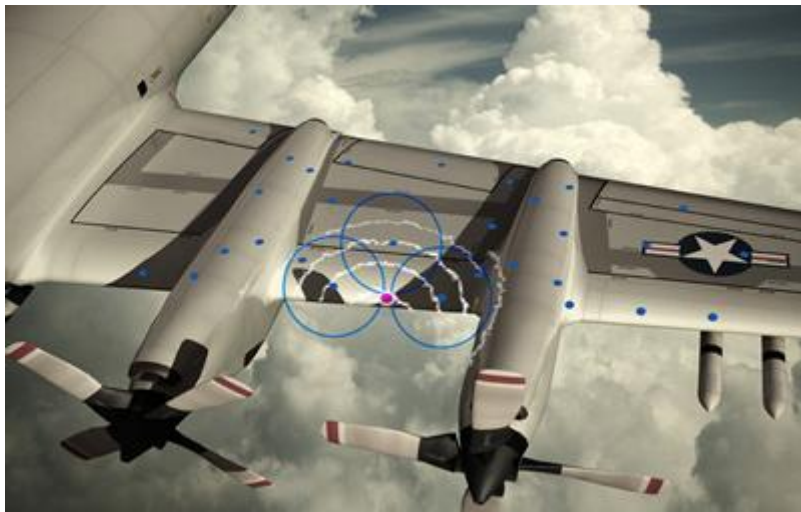
Obr. 26 - Most nad Jordánem v Táboře. (38)

5.3 Testování parních nebo plynových turbín

Lopatky turbíny jsou vystavovány extrémním provozním podmínkám. Pro zjišťování přítomnosti koroze a prasklin je využívána metoda akustické emise.

5.4 Akustická emise v letectví

Monitorování letadel a jejich příslušenství podléhá přísným pravidlům. Z hlediska pravidelné údržby je metoda AE široce využívána. Kvůli velikosti testovaných objektů je pro jiné nedestruktivní metody takřka nemožné odhalit počínající defekty bez toho, aby bylo možné je odhalit jinak než vizuální metodou. Pro to je ale nutné, aby porucha dosáhla dostatečné velikosti, v tom případě má ale následný lom (ať už houževnatý nebo křehký) rychlý průběh a může dojít i k úplné destrukci



Obr. 27 - Šíření akustických vln vlivem defektu na křídle. (39)

6 Experimentální část

V experimentální části bylo prováděno studium akustických projevů při tahové a při ohybové zkoušce. Jako buzení byly použity univerzální zkušební stroje pro tahovou a pro ohybovou zkoušku. Pro měření akustických projevů sloužilo zařízení pro měření akustické emise Dakel Xedo. Pomocí tohoto zařízení byly monitorovány elastické vlny šířící se materiálem zkušebních vzorků v důsledku zatěžování vzorků. AE byla hodnocena podle následujících veličin:

- Count 1 a Count 2 - počet překmitů AE nad prahové úrovně v čase
- RMS – střední kvadratická úroveň detekovaného signálu – odpovídá energii elastických vln

Výše popsané parametry byly exportovány do programu Microsoft Excel a použity k co nejpřesnější evaluaci generovaného signálu akustické emise a vyhodnocování pochodů ve zkoušeném materiálu. Zmíněné měřicí přístroje a měřené veličiny budou detailně specifikovány v následující kapitole.

Naměřené údaje budou vyhodnoceny a na jejich základě bude možné přijít s hypotézami vysvětlujícími akustické projevy v závislosti na struktuře a mechanických vlastnostech testovaného materiálu.

6.1 Použité měřicí přístroje

Pro měření akustické emise bylo použito zařízení Dakel Xedo (viz obr. 28). Pro zobrazení a ukládání dat z tohoto hardwaru bylo použito originálního softwaru Daemon. Z hlediska měření byly pomocí tohoto programu analyzovány veličiny Count1, Count2 a hodnota RMS. Pro pozdější zobrazení a zpracování dat sloužil software DaeShow.



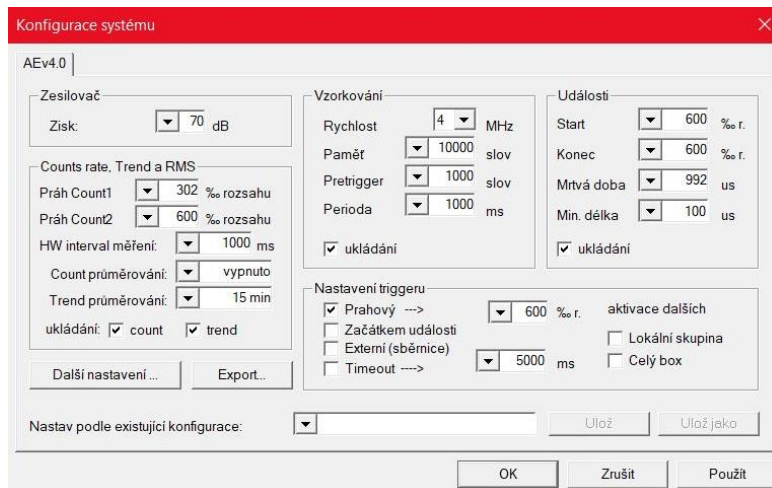
Obr. 28 - Zařízení pro měření akustické emise XEDO.

Count 1 (dále jen C1) je množství překmitů přes prahovou úroveň. V případě těchto měření byla použita prahová úroveň 302‰ rozsahu měření. Obdobně Count 2 (dále jen C2), je počet překmitů přes prahovou úroveň 600‰. RMS je střední kvadratická úroveň detekovaného signálu, ta odpovídá energii elastických vln na snímači.

Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Lenka Benešová

Prahové úrovně a další prvky ovlivňující měření je možné nastavit pro každé měření (viz obr. 29).



Obr. 29 - Uživatelské prostředí Daemon.

Pro tahovou zkoušku byl použit univerzální zkušební stroj (viz obr. 30)



Obr. 30 - Univerzální zkušební stroj.

Pro ohybovou zkoušku byl použit univerzální zkušební stroj DMG (viz obr. 31).



Obr. 31 - Stroj pro tříbodový ohyb.

6.2 Použité materiály

6.2.1 EN AW 6063 (40) (41)

EN AW 6063 je hliníková slitina, která se vyznačuje velmi dobrou svařitelností a snadnou eloxací. Dále má dobrou odolnost proti korozi, obrobiteľnosť a tváriteľnosť. Slitina obsahuje kromě čistého hliníku 0,7 % Mg a 0,4 % Si.

Pro účely zkoušky byla použita slitina ve formě tyčových vzorků s průměrem 16mm v různých stavech tepelné úpravy, některé vzorky pro ohybovou zkoušku byly opatřeny vrubem 2 mm, 4,5 mm nebo 8 mm. Kromě neupraveného stavu 6063 - O, byly použity stavy 6063 - T4 a 6063 - T6.

T4 je stav po rozpouštěcím žíhání následovaný přirozeným stárnutím. Tento stav se vyznačuje dobrou tváriteľností. Stav T6 je stav po rozpouštěcím žíhání, následovaný umělým stárnutím.

	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]
EN AW 6063 – O	130	—	18
EN AW 6063 – T4	140	70	12
EN AW 6063 – T6	200	145	10

Tab. 7 - Mechanické vlastnosti EN AW 6063. (42)

6.2.2 EN AW 2024 (43)

EN AW 2024 hliníková slitina je obecně známá pod názvem Dural. Vyznačuje se vynikající obrobiteľností a vysokou pevností v tahu 420 MPa. Slitina obsahuje kromě hliníkové matrice 4 % Cu a 1 % Mg. Není vhodná ke svařování ani k eloxování, a nemá ani dobrou odolnost proti korozi.

Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Lenka Benešová

Pro účely zkoušky byla použita slitina ve formě tyčových vzorků s průměrem 16 mm, a v nevytvrzeném stavu EN AW 2024 – O.

	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Smluvní mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]
EN AW 2024 - O	180 - 250	—	10

Tab. 8 - Mechanické vlastnosti EN AW 2024. (44) (45)

6.2.3 EN AW 7075 (46)

EN AW 7075 je hliníková slitina obsahující 5,5 % Zn, 2 % Mg a příměsi Cu nebo Ti. Jedná se o slitinu s nejvyšší mezí pevnosti v tahu ze všech hliníkových slitin (viz. tab. 9). Pro vysokou pevnost se používá pro vysoce namáhané součásti. Slitina je velmi dobře obrobitelná, ale má velmi špatnou korozivzdornost. Materiál se nehodí pro svařování ani eloxování.

Pro účely tahové zkoušky byly použity vzorky z plechu válcovaného za studena ve stavu T6 a O. T6 je stav precipitačně zpevnění. Stav O vznikl napájením tenké vrstvy slitiny EN AW 4045 o tloušťce 10 % tloušťky plechu na slitinu EN AW 7075 - T6. Proces pájení zapříčinil vyžhání materiálu. Slitina 4045 má nižší pevnost než základní hliníková slitina EN AW 7075. Slouží jako ochranná vrstva pro zvýšení korozní odolnosti. Pro účely tohoto experimentu bylo také odhalit případnou citlivost AE na poškození této vrstvy.

	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Smluvní mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]
EN AW 7075 O	max. 275	max. 145	10
EN AW 7075 T6	540	470	7

Tab. 9 - Mechanické vlastnosti EN AW 7075. (45)

6.2.4 HX340 (47)

Je vysoce pevnostní a hluboce tažná ocel používaná k válcování za studena. Pro experiment byly použity plechy o tloušťce 1,5 mm válcované v podélném a příčném směru. Účelem zkoušení této konfigurace bylo mimo jiné ověření vlivu směru válcování na AE.

	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Nb [%]	Ti [%]	P [%]	S [%]
HX340	0,12	1,4	0,5	0,1	0,15	0,03	0,025

Tab. 10 HX340 - Chemické složení. (48)

	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Smluvní mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]
HX 340	410-510	340-420	21

Tab. 11 HX340 - Mechanické vlastnosti. (48)

6.2.5 DC-01 a DC-05 (49)

DC01 i DC05 jsou tažné nízkouhlíkové oceli vyráběné válcováním za studena. Materiál DC01 je materiál určený k tažení a má maximální obsah uhlíku 0,12 %, maximální obsah Mn 0,6 %, 0,045 %P a 0,045 %S. Materiál DC05 je materiál určený k zvláště hlubokému tažení a má maximální obsah uhlíku 0,06%, maximální obsah Mn 0,035 %, 0,025 % P a 0,025 % S.

Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Lenka Benešová

	C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
DC01	0,12	0,6	0,045	0,045
DC05	0,06	0,035	0,025	0,025

Tab. 12 – DC-01 a DC-05 – Chemické složení. (50)

U obou materiálů byly použity vzorky z plechu válcované v podélném a příčném směru pro ověření vlivu směru válcování na AE. Pro vzorky DC-05 byly použity plechy o tloušťce 1mm a pro DC-01 plechy tloušťky 1,5mm.

	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Minimální mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]
DC01	270-410	280	28
DC05	270-330	200	39

Tab. 13 – DC-01 a DC-05. (49) (50)

6.2.6 S235 (51)

Oceli řady S235 jsou oceli ČSN třídy 11. Jedná se o jedny z nejběžnějších konstrukčních ocelí. Jsou dobře svařitelné, vhodné k tváření a s dobrou pevností. Mez kluzu v tahu je 235MPa.

Pro účely zkoušky byly použity vzorky kruhového průřezu S235JRC – vzorky válcované za studena, a vzorky S235JRN – vzorky normalizačně žíhané. S235JRC má vyšší pevnost, ale nižší tvářitelnost než materiál S235JRN.

6.2.7 C45 (52)

Oceli C45 jsou jakostní nelegované ušlechtilé oceli třídy 12 s výbornou obrobitelností, ale obtížnou svařitelností. Jedná se o uhlíkovou ocel vhodnou k zušlechťování a povrchovému kalení.

Pro účely zkoušky byly použity vzorky kruhového průřezu s průměrem 20mm. Některé vzorky byly opatřeny vrubem 10mm nebo 12 mm.

	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Co [%]	P [%]	S [%]
C45	0,42-0,5	0,5-0,8	max. 0,4	max. 0,4	max. 0,1	max. 0,4	0,045	max. 0,045	max.

Tab. 14 - C45 - Chemické složení. (52) (53)

	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Smluvní mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]
C45	640-780	390	—

Tab. 15 - C45 - Mechanické vlastnosti. (53)

6.2.8 EN GJL 250 (54)

EN GJL 250 je šedá litina s lupínkovým grafitem. Má vysokou mez pevnosti v tahu (viz tab. 17), a je velmi dobře obrobitelná.

Pro účely zkoušky byly použity vzorky kruhového průřezu s průměrem 21 mm.

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]
GJL250	2,9-3,65	1,8-2,9	0,5-0,7	max 0,1	max. 0,3

Tab. 16 - Chemické složení EN GJL 250. (55)

	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]
EN GJL 250	195	—	—

Tab. 17 - Mechanické vlastnosti GJL 250. (55)

6.3 Tahová zkouška

Tahová zkouška probíhala ve všech směrech jako standardní tahová zkouška. Vzorky byly upnuty do stroje pomocí samosvorných nebo plochých čelistí a byly zatěžovány rychlostí 10 mm/min. Celkem byly na zkoušku použity 2 sondy pracující na principu piezoelektrického jevu (viz. obr. 32). První sonda byla umístěna přímo na namáhaný vzorek, a sloužila jako sonda detekující elastické vlny vznikající v namáhaném vzorku. Druhá sonda byla umístěna na zkušební stroji a měla pouze kontrolní charakter. Sloužila k detekování případných rušivých vlivů od pohonu zkušební stroje a okolí. Z důvodu dostupnosti laboratorního vybavení byla použita nemagnetická sonda na zkoumaném vzorku a sonda magnetická jako kontrolní sonda na stroji. Jako vazební prostředek mezi sondou a zkoumaným povrchem, byl použit glycerin, který zajišťuje dobrý přenos elastických vln z materiálu na sondu.

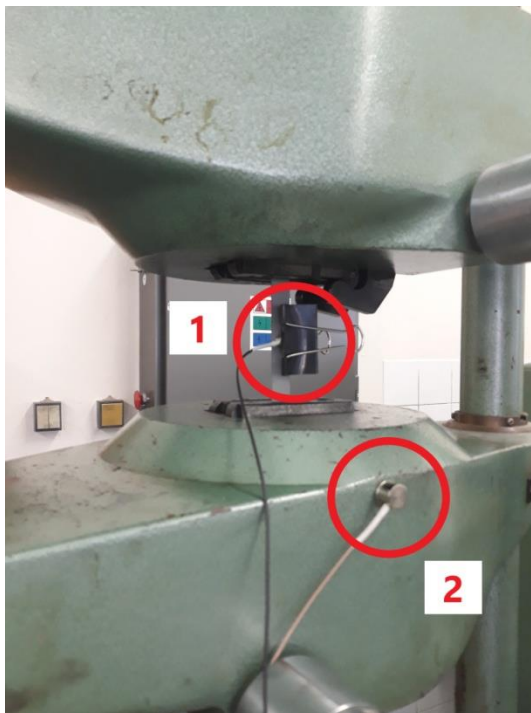
Na kontrolní sondě nebyly v průběhu zkoušky zjištěny žádné emisní události, které by nesouvisely přímo se změnami uvnitř zkoušeného materiálu. Např. na grafu AE (obr. 33) při zkoušení EN AW 2024 je patrný pouze malý výkmit RMS na začátku namáhání a na konci při destrukci vzorku. Tyto události jsou viditelné i na křivce C2, na křivku C1 neměly žádný vliv. Obdobný průběh se vyskytoval na všech vzorcích všech materiálů.

Pro většinu měření byla použita hodnota zesílení 60 dB, při tomto zesílení se dosahovalo nejlepších výsledků pro všechny materiály. Hodnota prahové úrovně pro Count 1 byla určena na 302 ‰ rozsahu a pro Count 2 na 600 ‰ rozsahu.

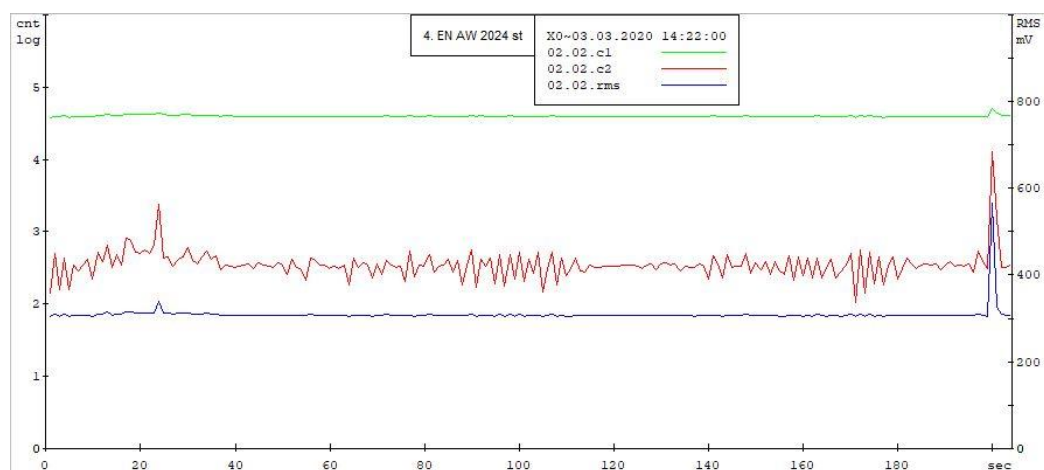
Pro každý materiál bylo měřeno několik vzorků. Z těchto vzorků byl vytvořen jeden průměrný statistický průběh AE při tahovém zatěžování daného materiálu. Křivky AE pro jednotlivá měření a z nich vytvořené statistické průběhy AE jsou k nahlédnutí v přílohách XIII-XXV. Tímto způsobem se zvýrazní typické chování daného materiálu v průběhu namáhání a zároveň se minimalizuje riziko započítání náhodných chyb měření při vyhodnocování výsledků. V tab. 18 je uvedena průměrná maximální tahová síla zjištěná při experimentu pro daný materiál. Křivky zatěžování tahové síly v závislosti na čase pro testované materiály jsou v přílohách I-VI.

Materiál	Průměrná maximální tahová síla [kN]	Materiál	Průměrná maximální tahová síla [kN]
EN AW 7075 – T4	4,88	DC-05 - příčné	3,61
EN AW 7075 - O	4,26	DC-01 – podélné	5,53
EN AW 6063 - O	19,38	DC-01 – příčné	5,48
EN AW 6063 – T4	27,75	S235JRC	49,92
EN AW 2024	34,15	S235JRN	34,92
HX340 – podélné	8,9	GJL250 upnutí pomocí závitu	20,83
HX340 – příčné	9,35	GJL250 upnutí pomocí samosvorných čelistí	29,92
DC-05- podélné	3,67		

Tab. 18 - Maximální tahová síla pro testované materiály.



Pbr. 32 - Upnutí vzorku a sond AE při tahové zkoušce.

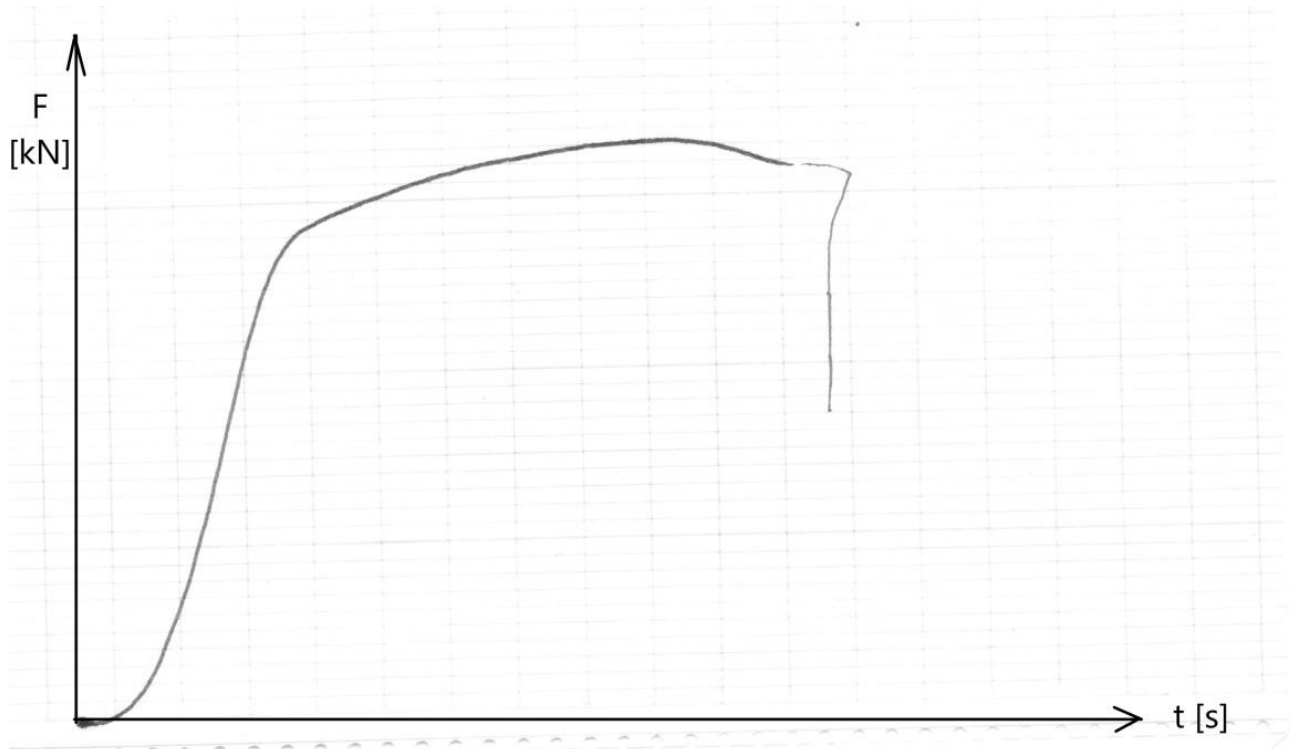


Obr. 33 - AE na kontrolní sondě ze stroje.

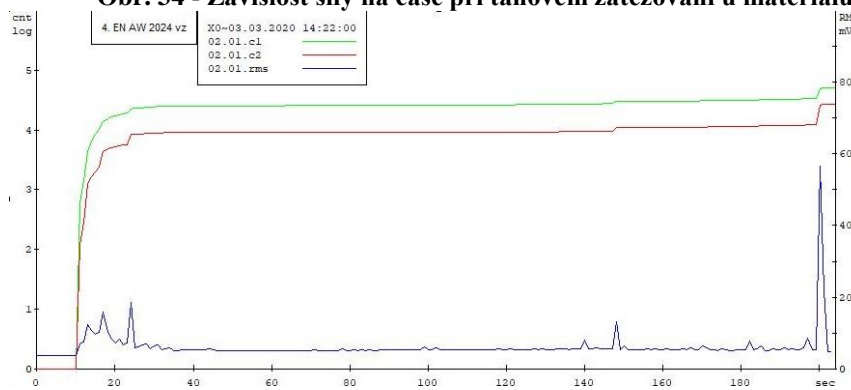
6.3.1 Spojitost mezi průběhem AE a průběhem tahové zkoušky

Při znázornění AE v sumačním grafu je možné pozorovat spojitost mezi křivkou AE a diagramem tahové zkoušky. Na obr. 34 je znázorněn průběh tahové zkoušky pro materiál EN AW 2024. Jehož křivka má podobný průběh jako sumační diagram křivek C1 a C2 záznamu AE pro daný vzorek (viz obr. 35).

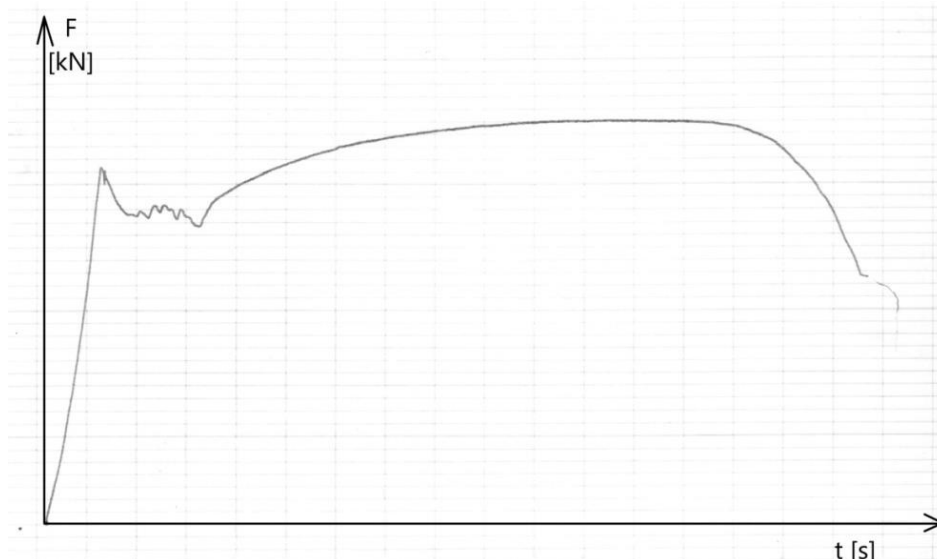
Tato závislost je viditelná i u vzorku materiálu S235JRN. Diagram tahové zkoušky je na obr. 36. Tento materiál se vyznačuje výraznou mezí kluzu, kterou je možné pozorovat i v průběhu C1 a C2 v sumačním grafu AE (obr. 37)



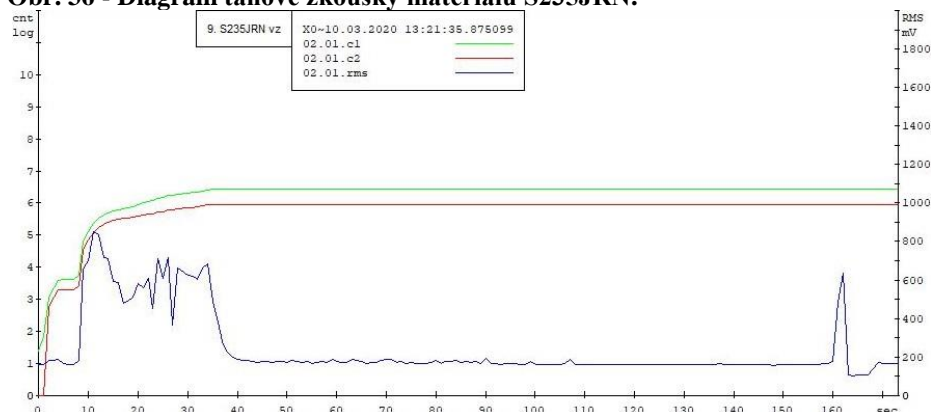
Obr. 34 - Závislost síly na čase při tahovém zatěžování u materiálu EN AW 2024



Obr. 35 - Sumační diagram AE materiálu EN AW 2024 pro tahovou zkoušku.



Obr. 36 - Diagram tahové zkoušky materiálu S235JRN.



Obr. 37 - Sumační diagram AE materiálu S235JRC pro tahovou zkoušku.

6.3.2 AE při namáhání tahem u hliníkových slitin

Pro tahovou zkoušku byly vybrány následující hliníkové materiály: EN AW 7075 – O, EN AW 7075 – T4, EN AW 2024, EN AW 6063 – O a EN AW 6063 – T4. Tyto materiály byly podrobně popsány dříve, na str. 31-32. Pro každý materiál bylo provedeno několik měření (konkrétní počet měření pro daný materiál je v tab. 19, a z těchto měření poté vytvořen jeden statistický průběh AE pro daný materiál. Statistické průběhy C1 a RMS u hliníkových materiálů vytvořených z příslušného počtu měření jsou zobrazeny na obr. 40.

Materiál	EN AW 7075 - T4	EN AW 7075 - O	EN AW 6063 - T4	EN AW 6063 - T4	EN AW 2024
Počet měření	5	5	2	2	4

Tab. 19 - Počet měření hliníkových slitin.

U materiálu 7075 T4, který je precipitačně zpevněný, je v průběhu C1 patrné, že dochází k pohybu dislokací v krystalické mřížce. To probíhá až do maximální amplitudy plynule. Po maximu je zřetelný poměrně strmý propad signálu, protože dislokace se v tuto chvíli přestávají přesunovat, díky působení precipitátů. Precipitáty materiál zpevňují a znemožňují dislokacím další volný pohyb. Tento průběh potvrzuje i RMS. Těsně před destrukcí dochází k dalšímu většímu uvolňování energie. Precipitační zpevnění je prolomeno, dislokace se dále šíří materiálem a vznikají praskliny a nakonec křehký lom vzorku.

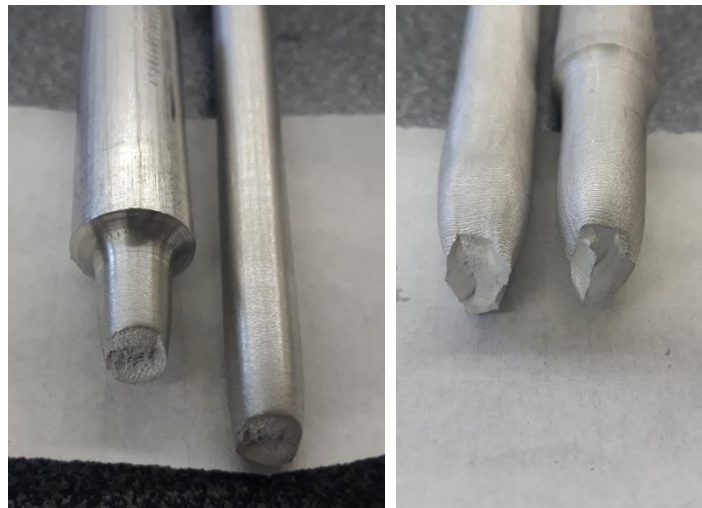
Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Lenka Benešová

U materiálu 7075 – O lze pozorovat odlišný průběh. Tento materiál je díky pájení vyžíhaný, nevyskytují se v něm tedy v dostatečné míře precipitáty, které by bránily pohybu dislokací a tím emisi akustické energie. Dislokace se volně pohybují strukturou bez větších překážek, průběh křivky se tedy jeví plynulejší. Na začátku zatěžování nedosahuje tak vysokých hodnot C1 ani RMS, ale takřka lineárně klesají až do momentu před přetržením vzorku. Prasknutí vzorku je jako v předchozím případě doprovázeno velkou akustickou emisí.

U materiálu 6063-O se aplikují podobné principy jako u předchozích vzorků. Materiál je v přirozeném vyžíhaném stavu a snadno se deformuje. Tomu odpovídá poměrně malé množství překmitů C1 i RMS na začátku zatěžování. Proti deformaci působí jen malé vnitřní síly. Materiál nemá příliš vysokou pevnost ani tažnost, to je patrné i z malé doby trvání zkoušky oproti ostatním hliníkovým materiálům. Destrukci materiálu následuje uvolnění větší množství energie.

Stav T4 materiálu 6063 je, oproti jeho přirozenému stavu O, vytvrzený, proto jsou hodnoty C1 i RMS řádově vyšší, jinak je jejich průběh obdobný jako v předchozích případech vytvrzených hliníkových materiálů. Začátek zatěžování provází ve velké míře události AE, následně se skokově snižují a přetrvávají na nízké úrovni až do destrukce.

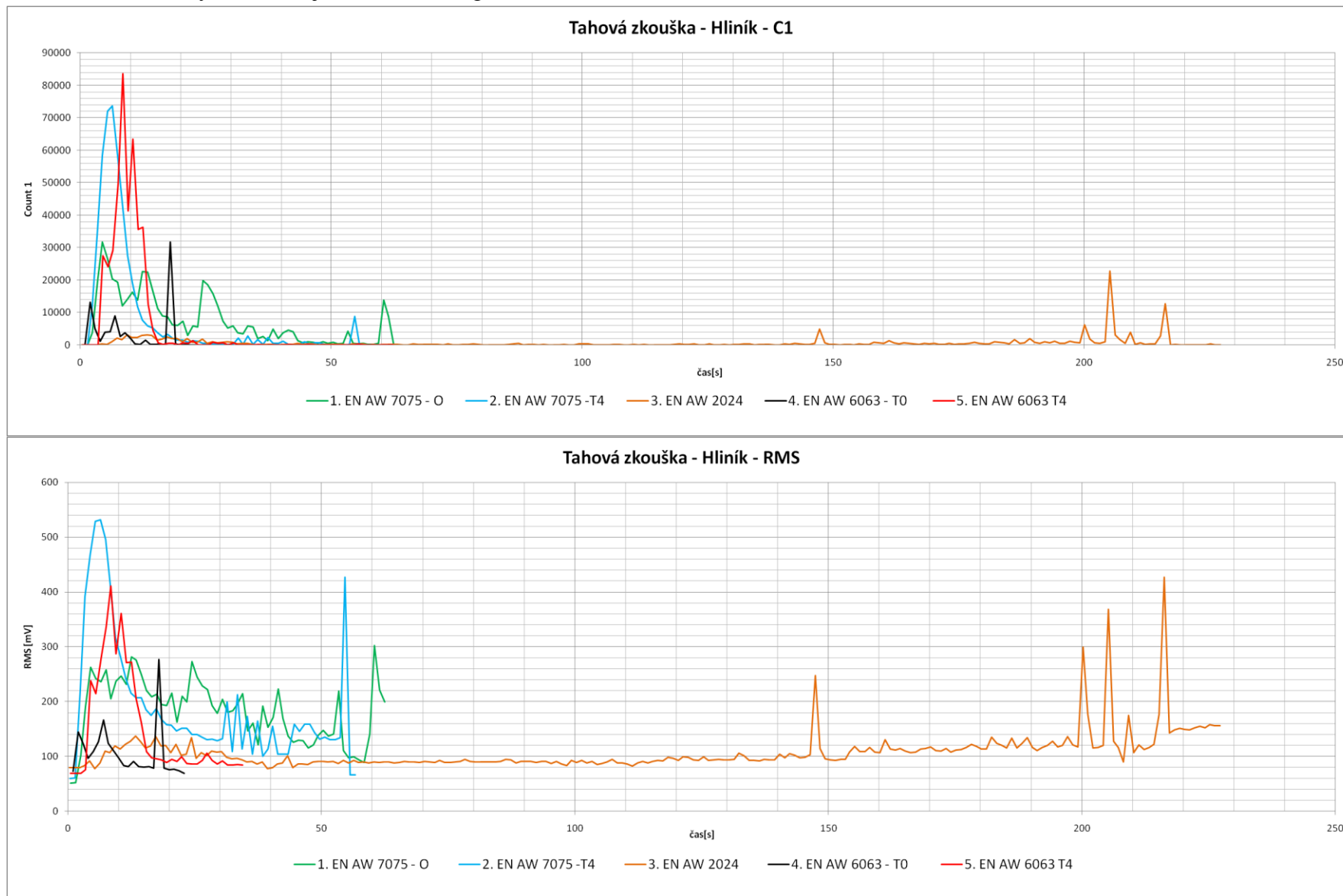


Obr. 38 - mat. 6063 vlevo O – tvárný lom, vpravo T4 - křehký lom.

Materiál EN AW 2024 je dobře tvárný, má plynulý průběh uvolňování akustické energie, po kterém následuje křehký lom (viz obr. 39) s vysokou úrovní akustické emise v době destrukce.



Obr. 39 - Materiál 2024 - křehký lom.



Obr. 40 – Záznam AE z tahové zkoušky – hliníkové slitiny.

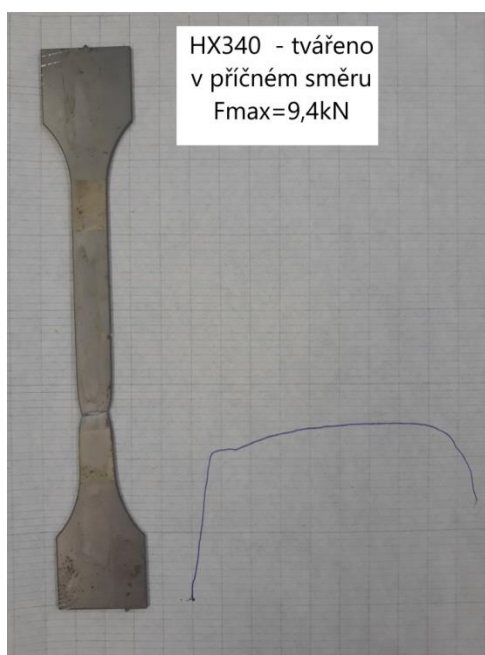
6.3.3 AE ocelí při tahovém zatěžování

Pro tahovou zkoušku ocelí byly vybrány následující materiály: HX340 tvářené ve směru deformace (podélně) a kolmo na ní (příčně), DC-01, DC-05, S235JRC a S235JRN. Tyto materiály byly podrobně popsány dříve, na str. 32-33. Pro každý materiál bylo provedeno několik měření (konkrétní počet měření pro daný materiál je v tab. 20), a z těchto měření poté vytvořen jeden statistický průběh AE pro daný materiál. Tyto statistické průběhy C1 a RMS u ocelí jsou zobrazeny na obr. 40.

Materiál	Počet měření	Materiál	Počet měření
HX340 – válcované podélně	1	DC-01 – válcované podélně	4
HX340 – válcované příčně	2	DC-01 – válcované příčně	4
DC-05 – válcované podélně	5	S235JRC	4
DC-05 – válcované příčně	4	S235JRN	4

Tab. 20 - Počet měření u ocelí.

Protože HX340 je ocelový plech určený k hlubokému tažení za studena, je u něj předpoklad schopnosti velké plastické deformace a tažnosti. Tuto domněnku potvrzuje průběh C1 a RMS. Na začátku zatěžování je možné pozorovat uvolnění energie akustické emise způsobené velkým množstvím přesunů dislokací ve struktuře. Z toho plyne, že na začátku zatěžování probíhá ve velké míře plastická deformace, která se později prudce sníží v důsledku vytvrzení materiálu. Toto vytvrzení pochází od tahové zkoušky, která je zjednodušenou formou tváření za studena. Na konci zatěžování je možné pozorovat uvolnění energie od destrukce. Došlo k tvárnému lomu, proto není množství uvolněné energie tak velké jako například u lomu materiálu EN AW 6063 – O. Průběh zatěžování je podobný pro vzorky tvářené v podélném směru, což je zatěžování ve směru tváření, i v příčném směru, tvářeném kolmo na směr zatěžování. Jediný rozdíl zůstává v tažnosti: Vzorky tvářené ve směru zatěžování mají vyšší tažnost, to je viditelné na době trvání experimentu – vzorky tvářené v podélném směru ji mají vyšší.

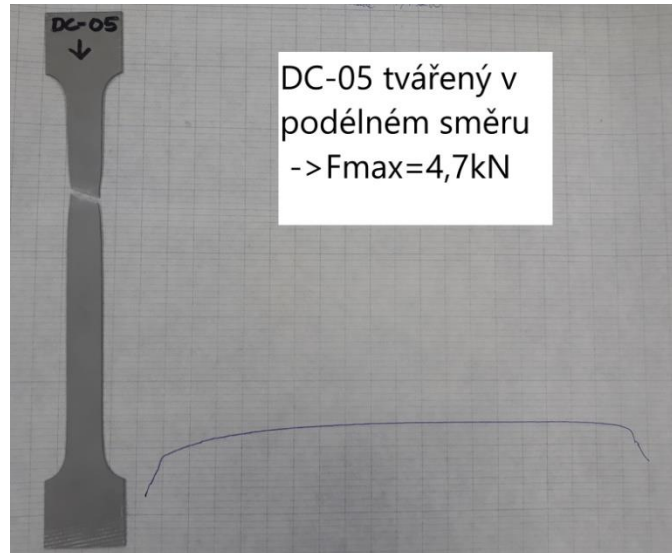


Obr. 41 - HX340 - graf tahové zkoušky znázorňující závislost síly na čase.

Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Lenka Benešová

Materiál DC-05 má dobrou tažnost, na začátku zatěžování je tedy možné pozorovat velkou úroveň C1 i RMS. Obě tyto úrovně se potom pozvolně snižují. To odpovídá faktu, že tento materiál má vyšší tažnost než materiál HX340, u toho je snížení emise podstatně strmější. V průběhu zkoušky vzorků tvářených v podélném a příčném směru je opět patrné, že vzorky tvářené ve směru zatěžování mají vyšší tažnost – zkouška trvá déle.

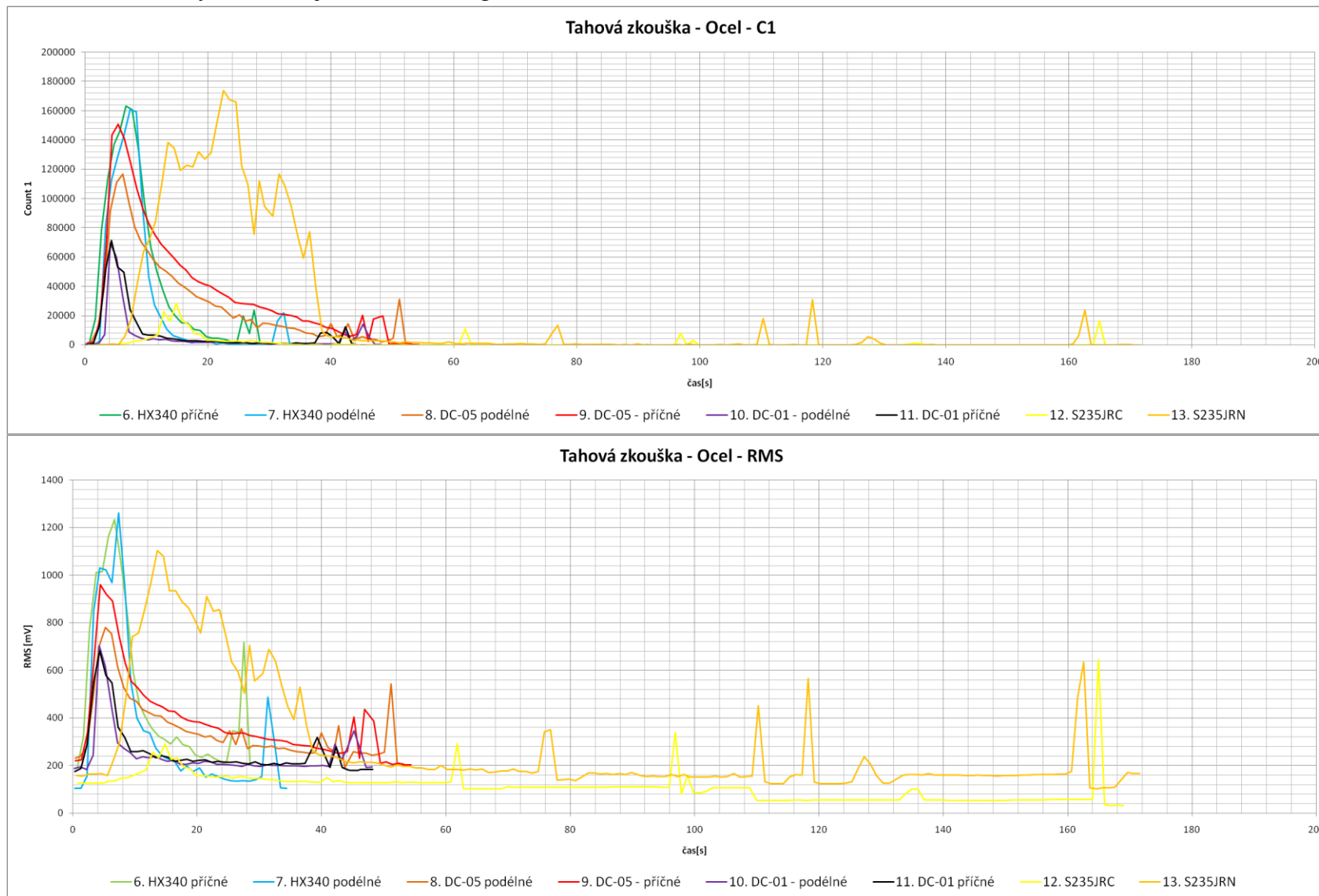


Obr. 42 DC-05 graf tahové zkoušky zobrazující závislost síly na času

U materiálu DC-01 je možné pozorovat podobný průběh zkoušení jako u materiálu DC-05. Materiál DC-01 má nižší tažnost. To koresponduje s maximem emitované energie, která je oproti materiálu DC-05 nižší. Tento děj úzce souvisí s obsahem intersticiálního uhlíku, jehož obsah se pohybuje okolo 0,12 % (viz. tab. 12). Uhlík zabraňuje volnému skluzu dislokací, a protože ho materiál DC-01 obsahuje více než DC-05, má to za následek nižší tažnost a zároveň nižší projevy akustické emise.

Materiál S235JRC je materiál válcovaný za studena, je tedy zpevněný a dislokace se nemohou ve struktuře volně pohybovat. Z toho důvodu je množství akustické emise na počátku zatěžování menší. Ani v jeho průběhu nedochází k větším emisím. Až při tvorbě krčku a následném křehkém lomu dojde k emisím.

Materiál S235JRN je normalizačně žíhaná ocel. Průběh akustické emise se touto tepelnou úpravou zásadně změní. Protože už materiál není zpevněný, nic nebrání dislokacím ve volném pohybu strukturou. Dojde k velkému uvolnění akustické energie na začátku zatěžování a k jejímu postupnému snižování. Vzorky po tvorbě krčku praskaly tvárně.



Obr. 43 – Záznam AE z tahové zkoušky ocelových materiálů.

6.3.4 AE při namáhání tahem u litin

Při tahové zkoušce byla z litin použita pouze šedá litina s lupínkovým grafitem GJL250. Byly použity 2 typy upnutí: upnutí pomocí závitu a upnutí pomocí samosvorných čelistí. Počet měřených vzorků pro oba typy upnutí je k nahlédnutí v tab. 21. Statistické průběhy AE v porovnání s hliníkovými a ocelovými materiály jsou znázorněné na obr. 45.

Typ upnutí litiny	Počet měření
GJL250 – upnutí pomocí závitu	7
GJL250 – upnutí pomocí samosvorných čelistí	3

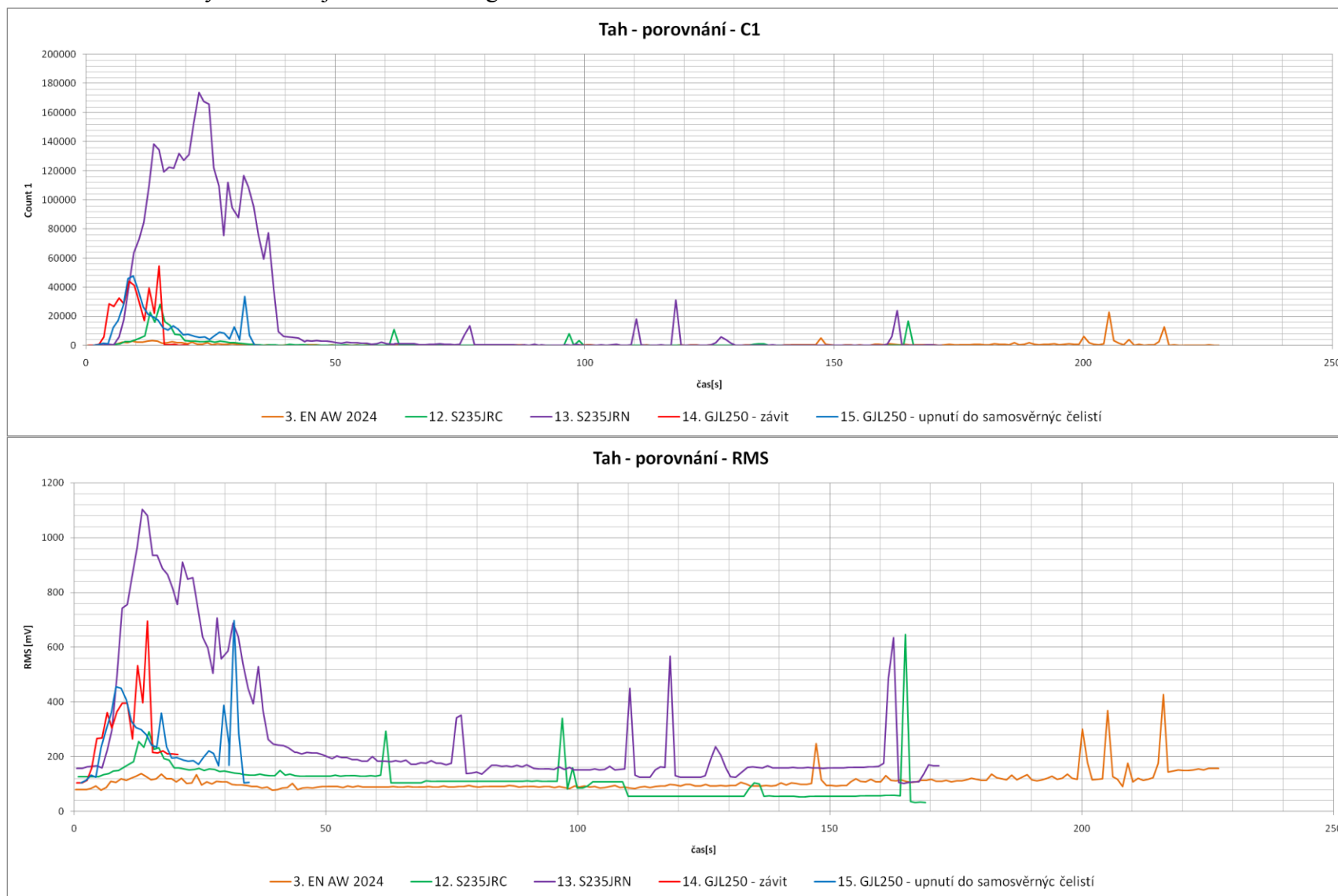
Tab. 21 - Počet jednotlivých měření šedé litiny

Litina upnutá do samosvorných čelistí má předpokládaný průběh akustické emise. Jde o materiál, u kterého nevzniká plastická deformace, v malé míře vzniká pouze elastická deformace, proto je na průběhu RMS možné pozorovat úplně odlišný průběh, než u předchozích hliníkových a ocelových materiálů. Na počátku zatěžování je úroveň emitované RMS poměrně nízká, protože velký podíl z celkové deformace zabírá elastická deformace – nedochází k trvalé změně krystalické mřížky vlivem skluzu dislokací, a tím pádem nedochází ani k plastické deformaci. Při lomu se uvolňuje podstatně větší množství energie než na počátku zatěžování, protože litina má křehký lom, netvoří krček a rozlomí se tím pádem plný průřez vzorku.



Obr. 44 - Křehký lom šedé litiny s lupínkovým grafitem.

Průběh zkoušky litiny upnuté pomocí závitu je zcela odlišný od předpokládaného průběhu jako při upnutí pomocí samosvorných čelistí. V rozsahu této kvalifikační práce ovšem není možné upřesnit proč tomu tak je. Bylo by nutné provést další experimenty.



Obr. 45 - Porovnání průběhů tahové zkoušky u různých materiálů.

6.4 Ohybová zkouška

Ohybová zkouška probíhala ve všech směrech jako standardní zkouška pro třibodový ohyb. Vzorky byly umístěny na podpory a zatěžovány rychlostí 10 nebo 20 mm/min. Celkem byly na zkoušku použity 2 sondy pracující na principu piezoelektrického jevu (viz. obr. 46). První sonda byla umístěna přímo na namáhaný vzorek, a sloužila jako sonda detekující elastické vlny vznikající v namáhaném vzorku. Druhá sonda byla umístěna na zkušební stroji a měla pouze kontrolní charakter. Sloužila k detekování případných rušivých vlivů od pohonu zkušebního stroje a okolí. Z důvodu dostupnosti laboratorního vybavení byla použita nemagnetická sonda na zkoumaném vzorku a sonda magnetická jako kontrolní sonda na stroji. Jako vazební prostředek, mezi sondou a zkoumaným povrchem, byl použit glycerin, který zajišťuje dobrý přenos elastických vln z materiálu na sondu.

Na kontrolní sondě nebyly v průběhu zkoušky zjištěny žádné emisní události, které by nesouvisely přímo se změnami uvnitř zkoušeného materiálu. Např. na grafu AE při zkoušení GJL250 je patrný pouze výkmit RMS při destrukci vzorku (viz. obr. 47). Tyto události jsou viditelné i na křivce C2, na křivku C1 neměly žádný vliv. Obdobný průběh se vyskytoval na všech vzorcích všech materiálů.

Pro všechna měření byla použita hodnota zesílení 60dB, při tomto zesílení se dosahovalo nejlepších výsledků pro všechny materiály. Hodnota prahové úrovně pro Count 1 byla určena na 302‰ rozsahu a pro Count 2 na 600‰ rozsahu.

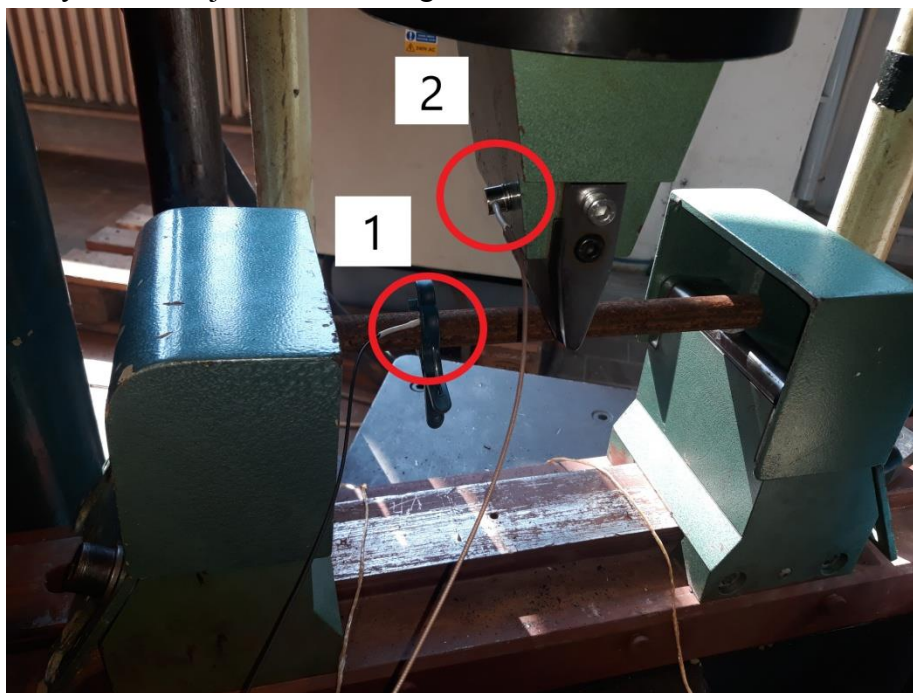
Pro každý materiál bylo měřeno několik vzorků, z těchto vzorků byl vytvořen jeden průměrný statistický průběh. Tímto způsobem se zvýrazní typické chování daného materiálu v průběhu namáhání a zároveň se minimalizuje riziko započítání náhodných chyb měření do vyhodnocení výsledků.

Ohybová zkouška je ve své podstatě pouze variací tahové zkoušky. Při vyhodnocování akustické emise u ohybové zkoušky je proto možné vycházet ze stejných principů jaké byly využívány pro vyhodnocení tahové zkoušky.

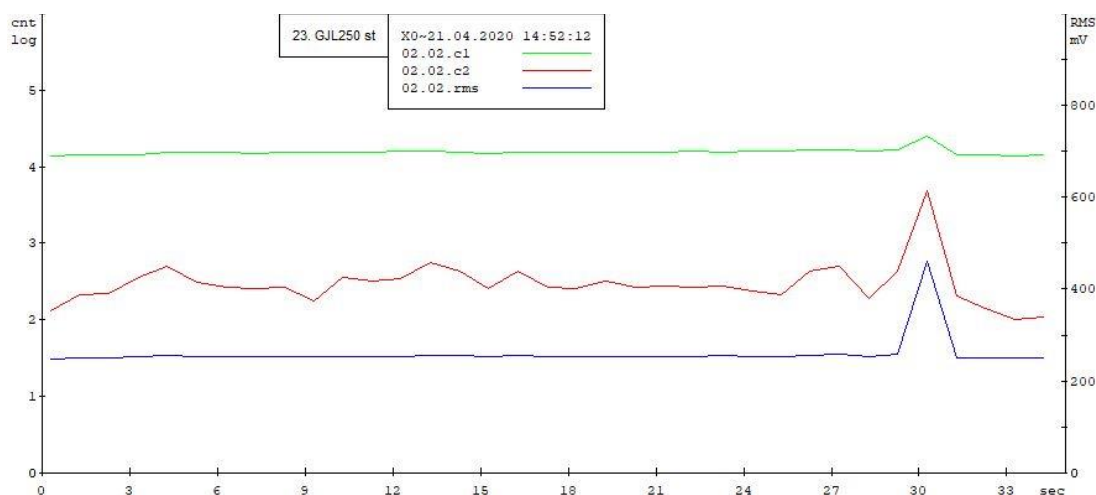
Pro každý materiál bylo měřeno několik vzorků. Z těchto vzorků byl vytvořen jeden průměrný statistický průběh AE při ohybovém zatěžování daného materiálu. Křivky AE pro jednotlivá měření a z nich vytvořené statistické průběhy AE jsou k nahlédnutí v přílohách XXVI-XXXVII. Tímto způsobem se zvýrazní typické chování daného materiálu v průběhu namáhání a zároveň se minimalizuje riziko započítání náhodných chyb měření při vyhodnocování výsledků. V tab. 22 je uvedena průměrná maximální ohybová síla zjištěná při experimentu pro daný materiál. Křivky zatěžování ohybové síly v závislosti na čase pro testované materiály jsou v přílohách VII-XII.

Materiál	Maximální průměrná ohybová síla [kN]	Materiál	Maximální průměrná ohybová síla [kN]
EN AW 6063 – O	0,65	EN AW 6063 – T6 s vrubem 4,5 mm	3,5
EN AW 6063 – O s vrubem 2 mm	3,07	EN AW 6063 – T6 s vrubem 8 mm	2,65
EN AW 6063 – O s vrubem 4,5 mm	2,56	C45	12,95
EN AW 6063 – O s vrubem 8 mm	1,39	C45 s vrubem 10 mm	13,45
EN AW 6063 – T6	2,97	C45 s vrubem 12 mm	7,17
EN AW 6063 – T6 s vrubem 2 mm	3,55	GJL250	8,28

Tab. 22 - Průměrné maximální síly při ohybovém zatěžování.



Obr. 46 - Rozmístění sond při ohybové zkoušce.

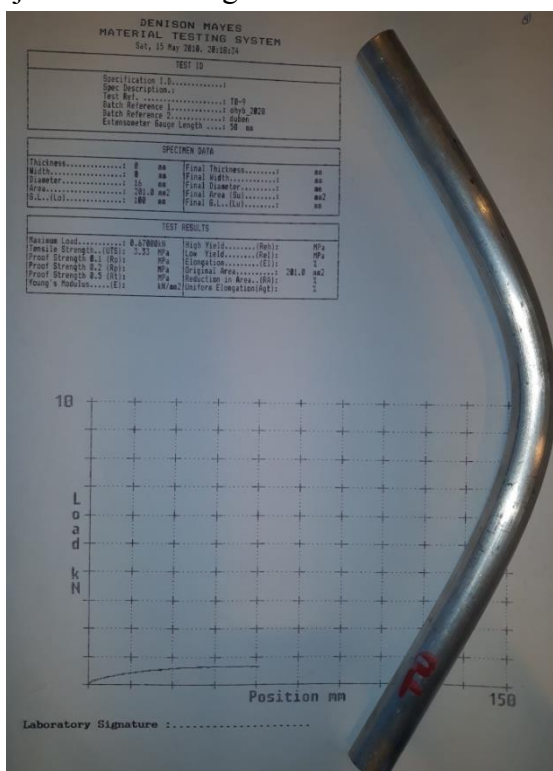


Obr. 47 - Kontrolní sonda AE ze stroje.

6.4.1 AE při namáhání ohybem u hliníkových materiálů

Jako zástupce hliníkových materiálů byl pro ohybovou zkoušku zvolen materiál EN AW 6063 ve stavu O a stavu T6. Průběh C1 a RMS je zobrazen na obr. 450. Pro ověření vlivu vrubových účinků byly některé vzorky opatřeny vruby.

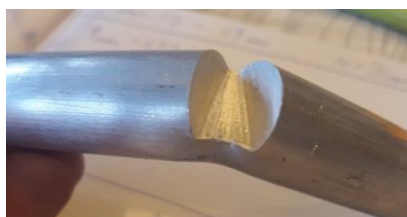
U materiálu EN AW 6063-O je možné sledovat obdobný průběh AE v závislosti na zatěžování vzorku jako u tahové zkoušky. Materiál je v přirozeném vyžíhaném stavu a snadno se deformuje. Tomu odpovídá malé množství překmitů C1 i RMS na začátku i v průběhu zatěžování. Proti deformaci nepůsobí téměř žádné vnitřní síly. Protože má materiál značnou tažnost a houževnatost, nestačil za těchto podmínek rozsah zkušebního stroje k přelomení vzorků. Zkoušený vzorek je na obr. 48 spolu s průběhem ohybové zkoušky. V tomto konkrétním případě bylo dosaženo maximálního zatížení 3,33 kN, poté byl experiment z technologických důvodů ukončen.



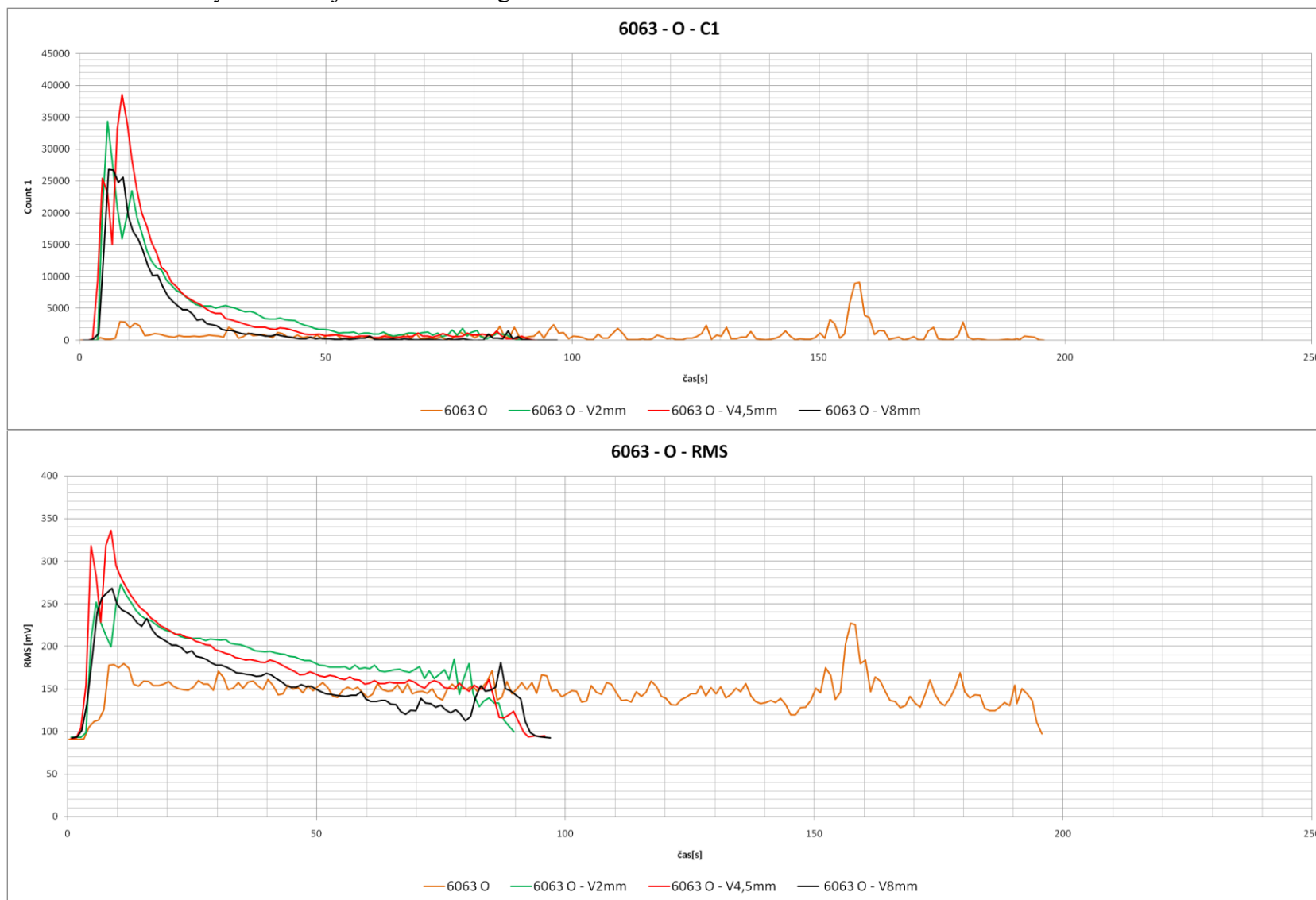
Obr. 48 - Zkoušený vzorek 6063 - O s průběhem ohybové zkoušky.

Pro ověření vlivu vrubu na AE byly některé vzorky opatřeny vrubem 2 mm, 4,5 mm, a 8 mm. Díky přítomnosti vrubu se podstatně změnil průběh celého zkoušky. Kvůli přítomnosti koncentrátoru napětí se několikanásobně zvýší úroveň AE na začátku zkoušky. Protože se ale stále jedná o materiál vyžiháný, tvárný a houževnatý, dochází k poklesu emise postupně a plynule u všech vzorků s vrubem bez rozdílu na hloubku vrubu. U vzorků s vrubem 2mm a 4,5mm je rozdíl v prudkosti klesání C1 a RMS. To není způsobeno ničím jiným, než hloubkou vrubu. Čím větší je vrub, tím strmější propad akustické emise následuje. U vzorků s vrubem 8 mm je úroveň akustické emise na začátku ohybové zkoušky nižší, protože vrub má takovou hloubku, že zasahuje až do středu vzorku a materiál je tím značně oslaben. Vliv vrubu ukazuje i časový průběh zkoušky. S vrubem se čas podstatně snižuje.

Na konci zkoušky není možné pozorovat stejnou destrukci materiálu, kterou provází uvolnění velkého množství energie v krátkém čase jako u tahové zkoušky, protože, jak plyne z charakteristiky ohybového napětí, na jedné straně vzorku je materiál namáhán na tah a na straně druhé je namáhán na tlak. Docházelo tedy k rozrušování materiálu jen na jedné straně průřezu vzorku viz. obr. 49.



Obr. 49 - Lom materiálu 6063 - O při ohybové zkoušce.



Obr. 50 – Záznam AE z ohybové zkoušky pro materiál 6063 – O.

Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Lenka Benešová

Ve stavu T6 materiálu EN AW 6063 nebyly pozorovány velké emisní události jako tomu tak bylo u vyžíhaného stavu. Materiál je precipitačně vytvrzen a precipitáty brání volnému pohybu dislokací, proto se deformační energie uvolňuje spíše skokově v průběhu celého testu. A je možné pozorovat spíše menší výkmity energie v průběhu celého experimentu (viz grafy obr. 52). U vzorků bez vrubu byla zkouška, z technologických důvodů, ukončena před destrukcí materiálu stejně jako v případě se stavem O téhož materiálu.

Průběhu testování vzorků s vrubem 2mm lze pozorovat stejné skokové výkmity energie v průběhu celého zatěžování, ale tyto výkmity dosahují z důvodu přítomnosti koncentrátoru napětí mnohem vyšší úrovně než v případě vzorků bez vrubu.

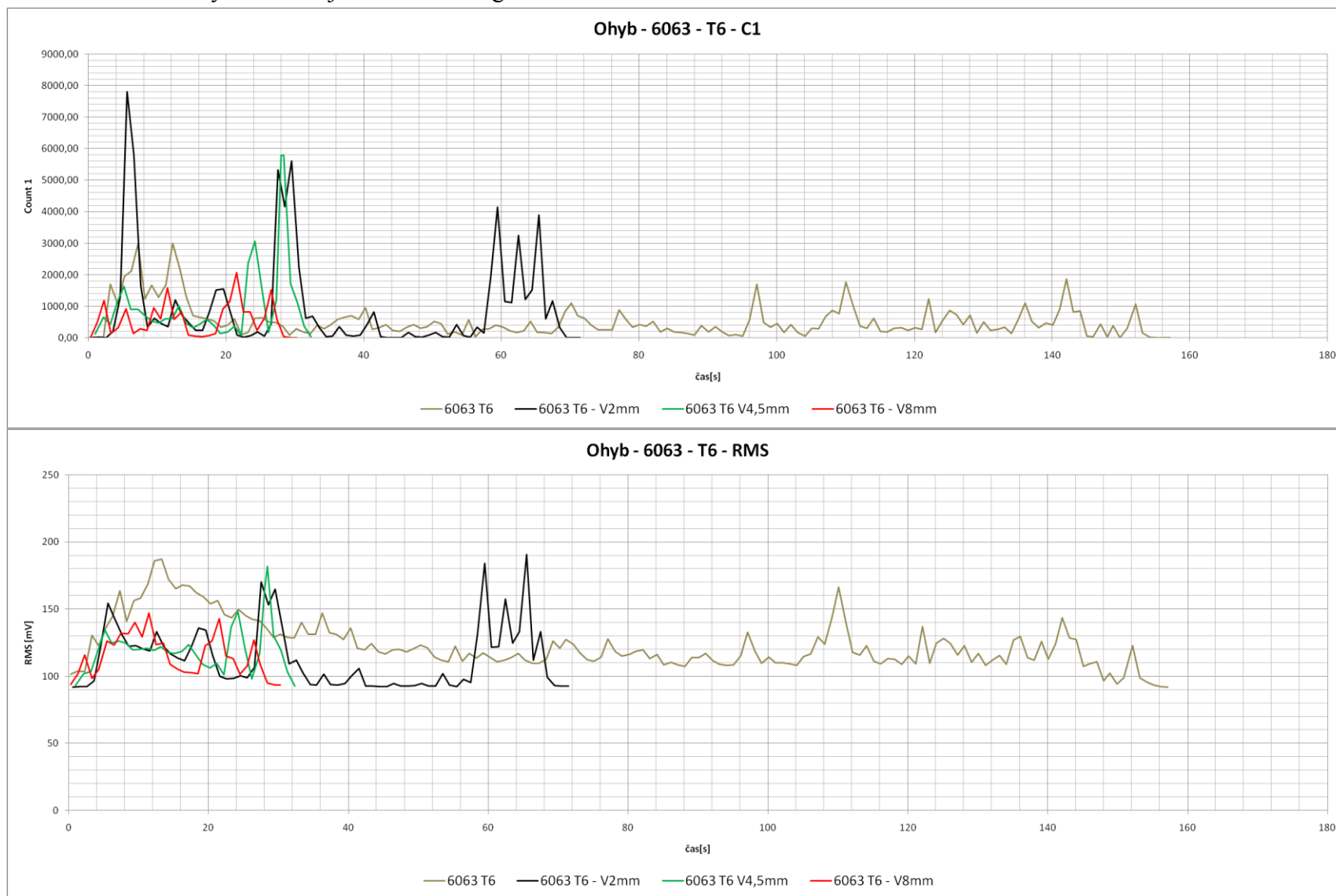
U vzorků s vrubem 4,5mm jsou tyto skokové uvolnění energie zaznamenávány také, ale protože se zkrátila délka testu, jsou tyto skoky umístěny blíže k sobě. Při destrukci materiálu dojde k uvolnění velkého množství energie, což je pravděpodobně způsobeno křehkým lomem. Vzorek 6063 – T6 s vrubem 4,5 mm je na obr. 51 společně s grafem namáhání v průběhu ohybové zkoušky, nejvyšší dosažená síly v průběhu tohoto konkrétního testu byla 2,57 kN.



Obr. 51 - Vzorek 6063 T6 s vrubem 4,5mm namáhaný na ohyb.

U vzorků s vrubem 8 mm pozorujeme opět skokové uvolnění energie, ale protože je průřez značně oslaben vrubem, nedosahují tato skoky tak vysoké úrovně jako v předchozích případech.

V závislosti na přítomnosti koncentrátoru napětí a na jeho hloubce se snižuje délka testu a tím i houževnatost daného vzorku.



Obr. 52 – Záznam AE z ohybové zkoušky pro materiál 6063 T6.

6.4.2 AE při namáhání ohybem u oceli a litiny

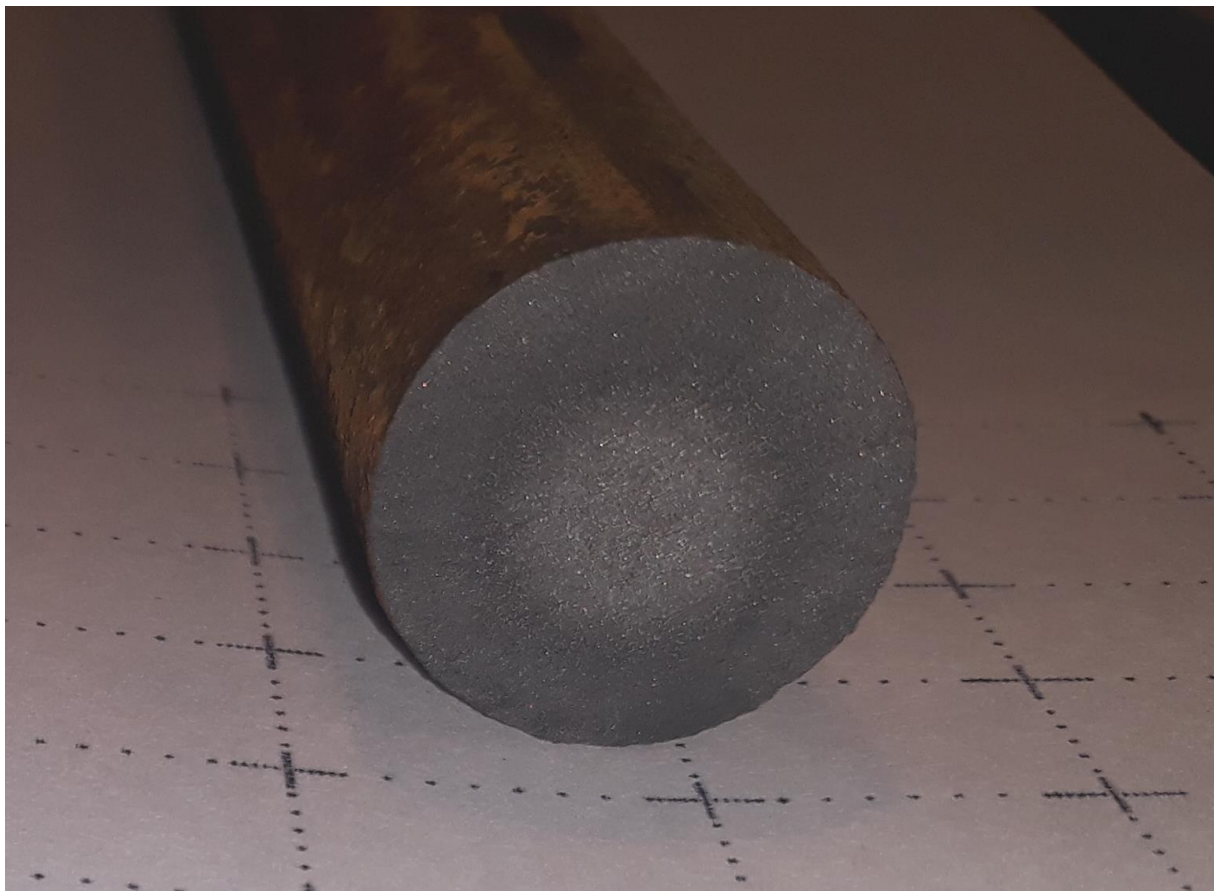
Jako zástupce ocelí pro ohybovou zkoušku byl vybrán materiál C45. Tento materiál byl podrobně popsán na str. 32-33. Průběh C1 a RMS u oceli C45 je zobrazen na obr. 54. Protože rozsah zkušebního stroje nestačil pro přelomení vzorků materiálu C45 byly některé vzorky opatřeny vrubem o hloubce 10 mm a 12 mm.

V materiálu C45 se vyskytuje uhlík, který zabraňuje snadnému posouvání dislokací a materiál tedy není snadné deformovat. V průběhu zkoušky je možné pozorovat rovnoměrně uvolňování akustické energie. Na konci experimentu je velká úroveň C1 i RMS, to je způsobeno křehkým dolomením vzorku.

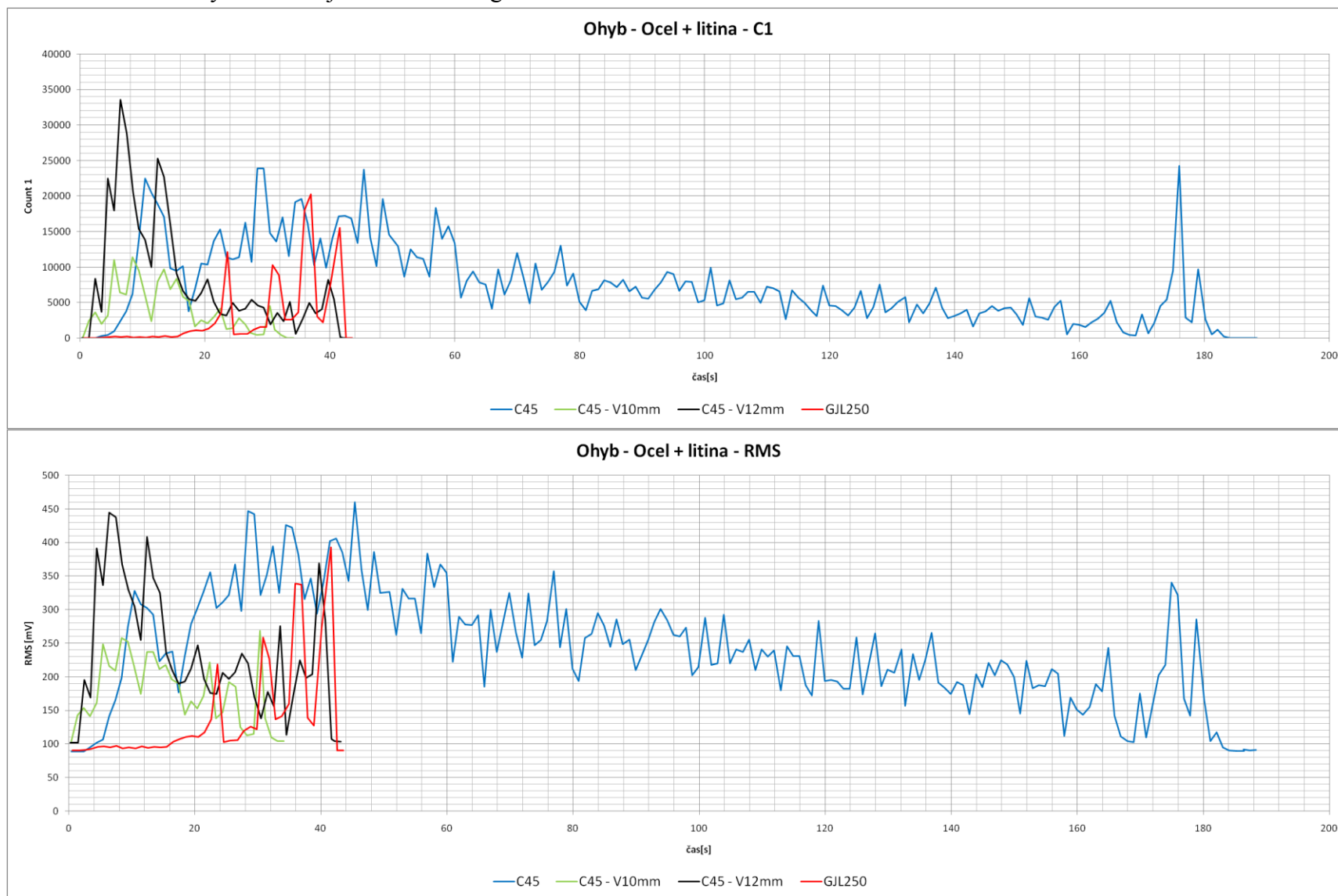
U vzorků C45 opatřených vrubem se na počátku zatěžování uvolňuje větší množství energie. Množství této energie závisí na hloubce vrubu, který slouží jako koncentrátor napětí a iniciační centrum. Čím hlubší je vrub, tím je předpoklad vyšší vyemitované energie. U vzorků s vrubem je množství energie vyemitované při křehkém dolomení vzorku nižší než u vzorků bez vrubu. Kvůli přítomnosti vrubu se podstatně zmenší plocha lomu.

Jako zástupce litiny pro ohybovou zkoušku byl zvolen stejný materiál jako pro tahovou zkoušku. Jde o šedou litinu GJL250 s lupínkovým grafitem. Tento materiál je detailně popsán v kapitole věnující se použitým materiálům.

U litiny GJL250 je možné pozorovat stejný průběh akustické emise jako u zkoušky tahové. Podstatná část energie je vyzářena až před a při destrukci vzorku. Struktura šedé litiny neumožňuje plastickou deformaci, veškerá energie zatěžování se tedy přemění na elastickou deformaci a litina poté křehce praskne (viz obr. 53). Tomu odpovídá i vysoká úroveň uvolněné energie při akustické emisi.



Obr. 53 - Křehký lom u šedé litiny.



Obr. 54 - Záznam AE z ohybové zkoušky pro materiály C45 a GJL250.

6.5 Diskuze výsledků

V předchozích kapitolách byl rozepsán průběh AE u zkoušených materiálů v závislosti na deformačních pochodech při deformačním zatěžování. U testovaných vzorků byla v projevech AE pozorována jistá pravidelnost, která je vysvětlena následujícími hypotézami:

- Čím je větší deformace materiálu, tím více energie je vyzářeno.
- Pokud je materiál nějakým způsobem vytvrzený, projeví se to na množství C1 a RMS v čase.
 - V důsledku zbrzdění pohybu dislokací vlivem přítomnosti precipitátů v matici materiálu budou projevy akustické emise na začátku zatěžování vyšší.
 - Při zpevnění materiálu vlivem válcování za studena budou projevy akustické emise nižší.
- Pokud je materiál ve vyžíhaném stavu bez napětí, akustická emise má hladký a pozvolný průběh bez větších extrémů.
- Při přítomnosti vrubu jakožto iniciačních center, dochází k emitování většího množství energie.
- S hloubkou vrubu se zvětšují i projevy akustické emise.
- U materiálů s nízkým podílem plastické deformace, dochází k podstatné části akustické emise, až když se materiál blíží k lomu.
- Při křehkém lomu se emituje řádově více energie než při tvárném lomu.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo studium akustických projevů a jejich následné vyhodnocení. Obecně je možné uvést teoretická tvrzení, která jsou více popsána v diskuzi výsledků, jimiž se akustická emise řídí. V prostředí, které je dostatečně klidné a nejsou v něm příliš významné ruchy okolí, je možné na základě těchto pozorování určit, jaké děje v materiálu při zatěžování probíhají. Lze také dle charakteru akustické emise zhruba určit, jaké vlastnosti má deformovaný materiál, či lze detekovat případnou přítomnost trhliny nebo vrubu. V tomto směru byly cíle práce úspěšně splněny a bylo zdokumentováno deformační chování materiálů z hlediska akustické emise.

Deformační zatěžování, způsobující změny ve struktuře materiálu, má své specifické akustické projevy. Ovšem tyto projevy jsou ovlivňovány mnoha parametry, od přítomnosti precipitátů, až po typ lomu. Pokud budou specifikovány všechny základní pravidla, kterými se emise akustické emise řídí, pak mohou být tyto poznatky v budoucnu využity pro komplexnější kontrolu konstrukcí, zvýšení bezpečnosti i efektivity.

7 Citovaná literatura

1. **Beneš, Petr.** Nauka o materiálu. Plzeň, 9.-12. 2017.
2. **kol., Bernard Kopec a.** *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí.* Brno : Akademické vydavatelství CERM, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
3. Fyzika v moderním lékařství. *Rentgenové záření.* [Online] [Citace: 28. 10 2019.] <http://cz7asm.wz.cz/fyz/index.php?page=renzar>.
4. Magnetická metoda prášková. *FSI Forum.* [Online] 2013. [Citace: 28. 10 2019.] <http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/DZM/2013%20-%20DZM%2003%20Magnetick%C3%A1%20metoda%20pr%C3%A1%20kov%C3%A1.pdf>.
5. **Vachuda, Viktor.** Bakalářská práce Detekce povrchových vad s využitím vířivých proudů. *Digitální knihovna západočeské univerzity.* [Online] 2017. [Citace: 28. 10 2019.] https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/27530/1/BP%20Defekce%20povrchovych%20vad%20s%20vyuzitim%20virivych%20proudu_Vachuda.pdf.
6. **Matoušek, Jakub.** Nedestruktivní defektoskopie. *PT - Kapilární zkouška.* [Online] [Citace: 28. 10 2019.] <http://www.matousekhk.cz/pt.html>.
7. **Fahy, Frank.** *Foundation of engineering acoustics.* San Diego : Academic Press, 2003. ISBN 0-12-247665-4.
8. 1.8.3. Akustické vlnění. *studypory.vsb.cz.* [Online] [Citace: 3. 12 2019.] http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/1_8_3_akustika.pdf.
9. **doc. Ing. Jan Kaňka, Ph.D., Stavební fakulta ČVUT Praha.** Fyzikální podstata zvuku – vlnová rovnice. [Online] [Citace: 28. 10 2019.] <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/212-fyzikalni-podstata-zvuku-vlnova-rovnice>.
10. conVERTER. *Rychlost zvuku v pevných látkách.* [Online] [Citace: 1. 12 2019.] <http://www.converter.cz/tabulky/rychlost-zvuku-pevne.htm>.
11. conVERTER. *Rychlost zvuku v kapalinách.* [Online] [Citace: 1. 12 2019.] <http://www.converter.cz/tabulky/rychlost-zvuku-kapaliny.htm>.
12. Závislost rychlosti šíření zvuku ve vzduchu na teplotě. *conVERTER.* [Online] [Citace: 1. 12 2019.] <http://www.converter.cz/tabulky/rychlost-zvuku-vzduch.htm>.
13. **Rejchl, J.** Rychlost vzduchu. *Encyklopedie fyziky.* [Online] [Citace: 1. 12 2019.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/189-rychlost-zvuku>.
14. Šíření vlnění v prostoru. *Eduportál techmania.* [Online] [Citace: 2. 12 2019.] <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/vlneni/sireni-vlneni-v-prostoru>.
15. Vznik a druhy vlnění. *Fyzika 007.* [Online] [Citace: 1. 12 2019.] <https://sites.google.com/site/fyzika007/mechanicke-kmitani-a-vlneni/vznik-a-druhy-vlneni>.
16. **Rejchl, J.** Akustika a její dělení. *Encyklopedie fyziky.* [Online] [Citace: 5. 12 2019.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/214-akustika-a-jeji-deleni>.
17. Ultrazvuk a infrazvuk. *ELUC.* [Online] 1. 12 2019. <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1673>.
18. Vlnová délka. *Wikipedie.* [Online] [Citace: 3. 12 2019.] https://cs.wikipedia.org/wiki/Vlnov%C3%A1_d%C3%A9lka.
19. **doc. Ing. Jan Kaňka, Ph.D., Stavební fakulta ČVUT Praha.** Intenzita zvuku - decibel. *tzbinfo.* [Online] [Citace: 2. 12 2019.] <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/216-intenzita-zvuku-decibel>.
20. **Keprt, Jiří.** *Primární kalibrace snímačů akustické emise.* Brno, 2009.
21. **STEIN, Bc. PAVEL.** *Kategorizace signálu akustické emise.* Brno, 2010.
22. **Tlačbaba, Bc. Jaromír.** *Koroze oceli a její lokalizace NDT metodou - AE.* Brno : autor neznámý, 2011.

Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Lenka Benešová

23. Nedestruktivní metody testování akustická emise. *Kiwi.mendelu.cz*. [Online] [Citace: 3. 12 2019.] http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=6390&typ=html.
24. **Mareš, Bc. Vratislav**. Diagnostika tlakových lahví pomocí akustické emise. *DSpace VŠB - TUO*. [Online] 5. 5 2010. [Citace: 4. 12 2019.] https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/81814/MAR724_FMMI_N3923_3911T031_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
25. FZMT_11. *Ústav fyziky*. [Online] [Citace: 25. 2 2020.] http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf.
26. ČSN EN 1330-9 nespojitý signál. *Informační systém, uvádění výrobků na trh*. [Online] [Citace: 11. 2 2020.] <https://www.nlnorm.cz/terminologicky-slovník/80852>.
27. ČSN EN 1330-9 spojitý signál. *Informační systém uvádění výrobků na trh*. [Online] [Citace: 11. 2 2020.] <https://www.nlnorm.cz/terminologicky-slovník/80853>.
28. **Zawada, Paweł**. DSpace VŠB-TUO. *Bakalářská práce Planární lokalizace zdrojů akustické emise*. [Online] 2018. [Citace: 11. 2 2020.] https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129339/ZAW0005_FS_B2341_3901R003_2018.pdf?sequence=1.
29. **CSc., Doc. RNDR. Josef Kasl**. *FMM-7*. Plzeň : autor neznámý, 2020.
30. Fyzikální základy vědy o materiálu. *Pedagogická fakulta MU*. [Online] [Citace: 4. 12 2019.] <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>.
31. **editoři: Miller, Hill, Moore**. *Acoustic emission testing*. Columbus : American society for nondestructive testing, 2005. ISBN - 13: 978-1-57117-106-1.
32. Deformační chování materiálu. *Fakulta materiálově technologická - VŠB - TUO*. [Online] [Citace: 5. 12 2019.] https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacni-chovani-materialu/Schindler_Kawulok_Deformacni_chovani_materialu.pdf.
33. Alotropické modifikace železa. *Wikiwand*. [Online] [Citace: 5. 12 2019.] https://www.wikiwand.com/cs/Alotropick%C3%A9_modifikace_%C5%BEeleza.
34. my project. *Odborná práce deformace pevného tělesa*. [Online] [Citace: 4. 12 2019.] <http://deformacepevnéholesa.kvalitne.cz/struktura.htm>.
35. **Čapek, Jan**. Vliv mikrostrukturních parametrů na mechanické vlastnosti polykrystalického hořčíku. *Docplayer*. [Online] 2011. [Citace: 5. 12 2019.] <https://docplayer.cz/17454708-Bakalarska-prace-jan-capek-vliv-mikrostrukturnich-parametru-na-mechanicke-vlastnosti-polykrystalickeho-horciku-katedra-fyziky-materialu.html>.
36. Fyzika kondenzovaného stavu. *Slideplayer.cz*. [Online] [Citace: 4. 12 2019.] <https://slideplayer.cz/slide/13577649/>.
37. Global acoustic emission testing market industry analysis and forecast. *Weekllyspy*. [Online] [Citace: 12. 12 2019.] <https://weekllyspy.com/2019/10/07/global-acoustic-emission-testing-market-industry-analysis-and-forecast-2017-2024/>.
38. Tábor - most nad Jordánem. *Mapy.cz*. [Online] [Citace: 5. 12 2019.] <https://mapy.cz/zakladni?x=14.6635006&y=49.4276577&z=17&source=foto&id=489109>.
39. Propagation and sensing of ultrasonic waves for detecting acoustic emission. *University of Southampton*. [Online] [Citace: 5. 12 2019.] https://www.southampton.ac.uk/engineering/research/projects/propogation_and_sensing_of_ultrasonic_waves.page.
40. EN AW-6063 (AlMg0.7Si): Vlastnosti. *Hliníkové profily, tyče, plechy a desky; PROAL Ostrava*. [Online] [Citace: 20. 06 2020.] <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-6063/>.
41. Aluminum 6063-T6. *Online Materials Informatin Resource - MatWeb*. [Online] [Citace: 20. 06 2020.] <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=333b3a557aeb49b2b17266558e5d0dc0&ckck=1>.

Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Lenka Benešová

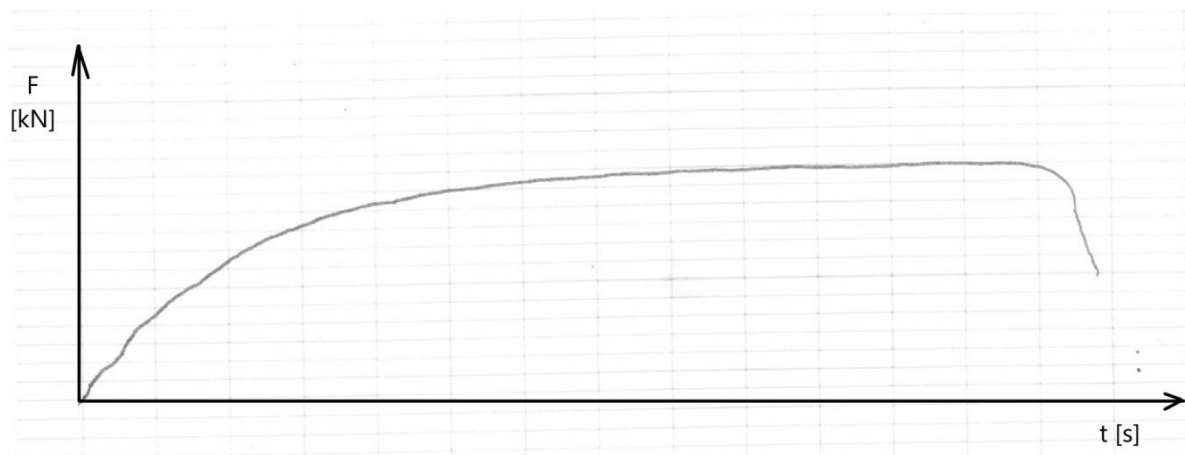
42. **měření, Úřad pro technickou normalizaci a.** ČSN 424401. *Slitina 42 4401AlMgSi*. Praha : autor neznámý, 1981.
43. EN AW 2024 AlCu4Mg1: Vlastnosti a aplikace. *Hliníkové profily, tyče, plechy a desky; PROAL Ostrava*. [Online] [Citace: 20. 06 2020.] <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-2024/>.
44. Tyče a profily. *ALFUN*. [Online] [Citace: 20. 06 2020.] <http://www.alfun.cz/tyce-a-profilu>.
45. **měření, Úřad pro technickou normalizaci a.** ČSN EN 485-2. *Hutnictví 4240 - hliník tvářený*. 2017.
46. EN AW-7075 (AlZn5.5MgCu). *Hliníkové profily, tyče, plechy a desky; PROAL Ostrava*. [Online] [Citace: 20. 06 2020.] <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-7075/>.
47. Plechy POZINKOVANÉ. *Davi Steel CZ - dodávky a úpravy plechů*. [Online] [Citace: 20. 06 2020.] <http://www.davisteel.cz/nabidka-plechu/plechy-pozinkovane/>.
48. **měření, Úřad pro technickou normalizaci a.** ČSN EN 10346 - 420110. *Kontinuálně žárově povlakované ocelové výrobky pro tváření za studena*. 2016.
49. ocelaruv_pruvodce_2. *Profil B&B*. [Online] [Citace: 20. 06 2020.] http://babca.cz/content/useruploads/ocelaruv_pruvodce_2b.pdf.
50. **měření, Úřad pro technickou normalizaci a.** ČSN EN 10152 - 420911. *Ocelové ploché výrobky válcované za studena elektrolyticky pozinkované pro tváření za studena*. 2017.
51. Stručný návod o nelegované konstrukční oceli řady S235. *Linkun, Metal supermarkets*. [Online] [Citace: 20. 06 2020.] <http://cz.lksteelpipe.com/news/a-brief-guide-of-s235-series-non-alloy-structu-18867434.html>.
52. ČSN 12050/1.1191/C45 - JKZ Bučovice. *Nástrojové a speciální oceli - JKZ Bučovice*. [Online] [Citace: 20. 06 2020.] <https://www.jkz.cz/cs/produkty/konstrukcni-oceli/csn-12-050-11191-c45/>.
53. **měření, Úřad pro technickou normalizaci a.** ČSN EN 10083. *Oceli pro tepelné zpracování, oceli legované a oceli automatové*. 2019.
54. GG25/EN-GJL-250 - Dijkkamp. *Ijzer - en staalgieterij/Dieterij Dijkkamp*. [Online] [Citace: 20. 06 2020.] <https://www.dijkkamp.nl/en/materials/gg25-en-gjl-250/>.
55. **měření, Úřad pro technickou normalizaci a.** ČSN EN 16482. *Výrobky z ocelí a oceli na odlitky a litiny*. 2015.
56. Iontová vazba. *Wikiskripta*. [Online] [Citace: 4. 12 2019.] https://www.wikiskripta.eu/w/Iontov%C3%A1_vazba.
57. **Rejchl, V.** Vazby v krystalech. *Encyklopedie fyziky*. [Online] [Citace: 4. 12 2019.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/628-vazby-v-krystalech>.

8 Seznam příloh

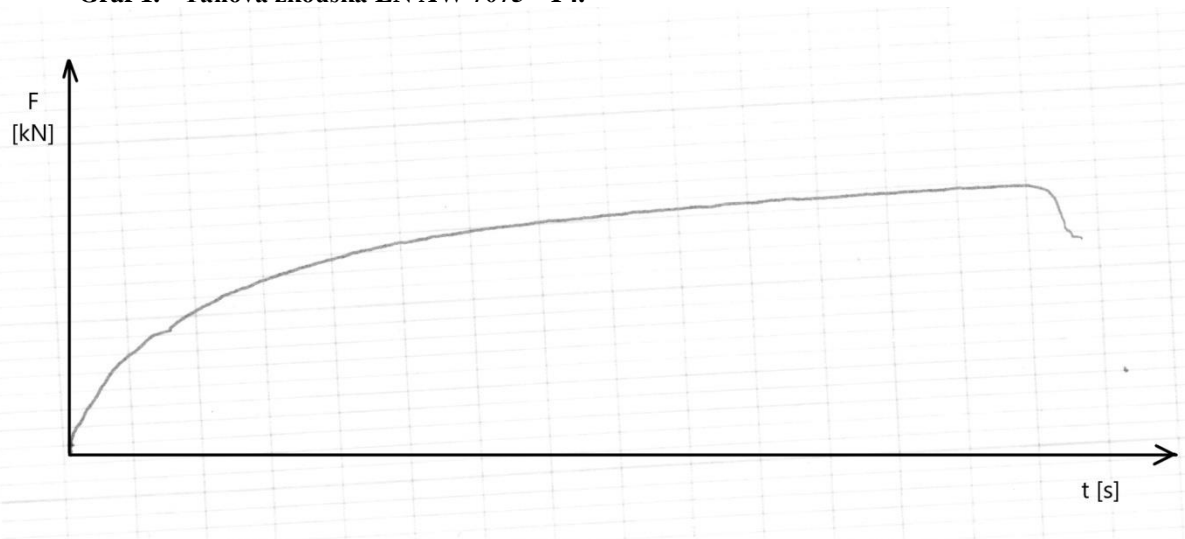
- I. Tahová zkouška materiálu EN AW 7075
- II. Tahová zkouška materiálu EN AW 6063
- III. Tahová zkouška materiálu HX340
- IV. Tahová zkouška materiálu DC-05 a DC-01
- V. Tahová zkouška materiálu S235JRC
- VI. Tahová zkouška materiálu GJL250
- VII. Ohybová zkouška materiálu EN AW 6063 – O
- VIII. Ohybová zkouška materiálu EN AW 6063 – O
- IX. Ohybová zkouška materiálu EN AW 6063 – T6
- X. Ohybová zkouška materiálu EN AW 6063 – T6
- XI. Ohybová zkouška materiálu C45
- XII. Ohybová zkouška materiálu C45 a GJL250
- XIII. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu EN AW 7075 – T4
- XIV. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu EN AW 7075 – O
- XV. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu EN AW 6063
- XVI. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu EN AW 2024
- XVII. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu HX340
- XVIII. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu DC-05 tvářený v podélném směru
- XIX. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu DC-05 tvářený v příčném směru
- XX. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu DC-01 tvářený v podélném směru
- XXI. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu DC-01 tvářený v příčném směru
- XXII. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu S235JRC
- XXIII. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu S235JRN
- XXIV. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu GJL250 – upnutí pomocí závitů
- XXV. Záznam AE z tahové zkoušky materiálu GJL250 – upnutí pomocí samosvorných čelistí
- XXVI. Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – O
- XXVII. Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – O s vrubem 2mm
- XXVIII. Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – O s vrubem 4,5mm
- XXIX. Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – O s vrubem 8mm
- XXX. Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – T6
- XXXI. Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – T6 s vrubem 2mm
- XXXII. Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – T6 s vrubem 4,5mm
- XXXIII. Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – T6 s vrubem 8mm
- XXXIV. Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu C45
- XXXV. Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu C45 s vrubem 10mm
- XXXVI. Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu C45 s vrubem 12mm
- XXXVII. Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu GJL250

9 Přílohy

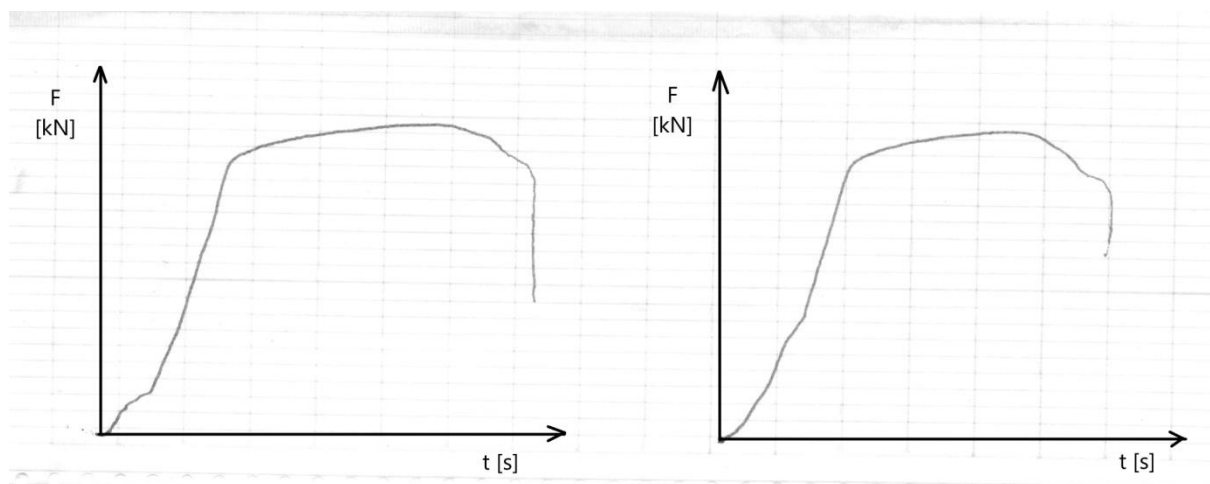
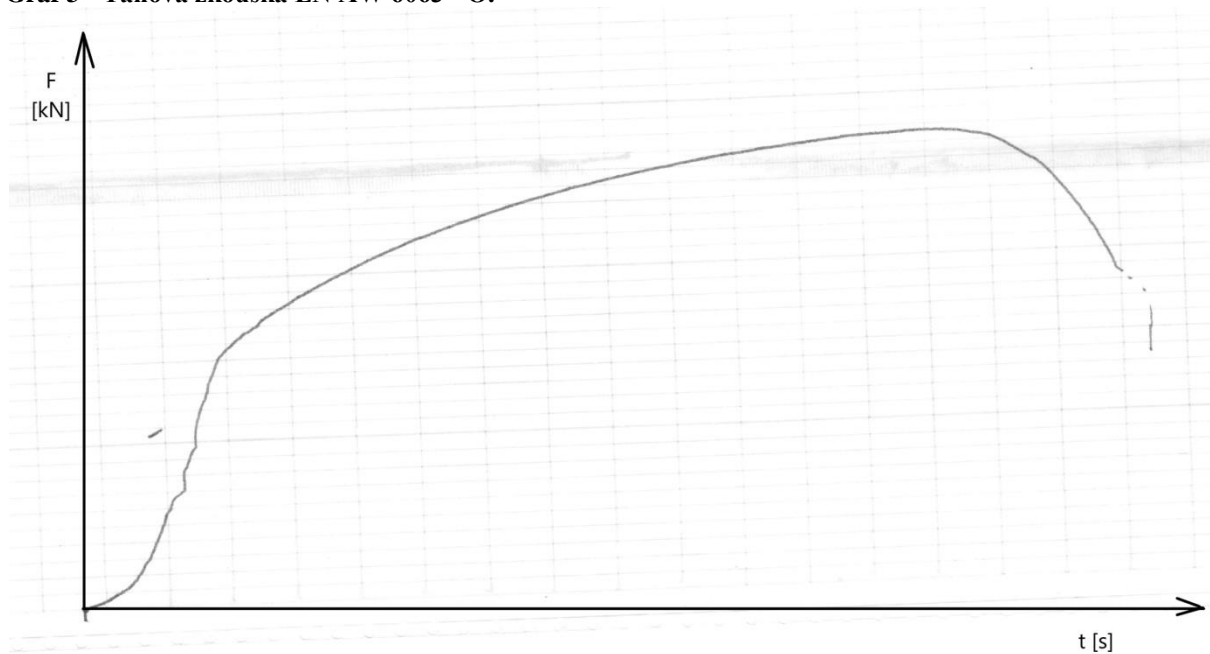
I. Tahová zkouška materiálu EN AW 7075



Graf 1. - Tahová zkouška EN AW 7075 - T4.

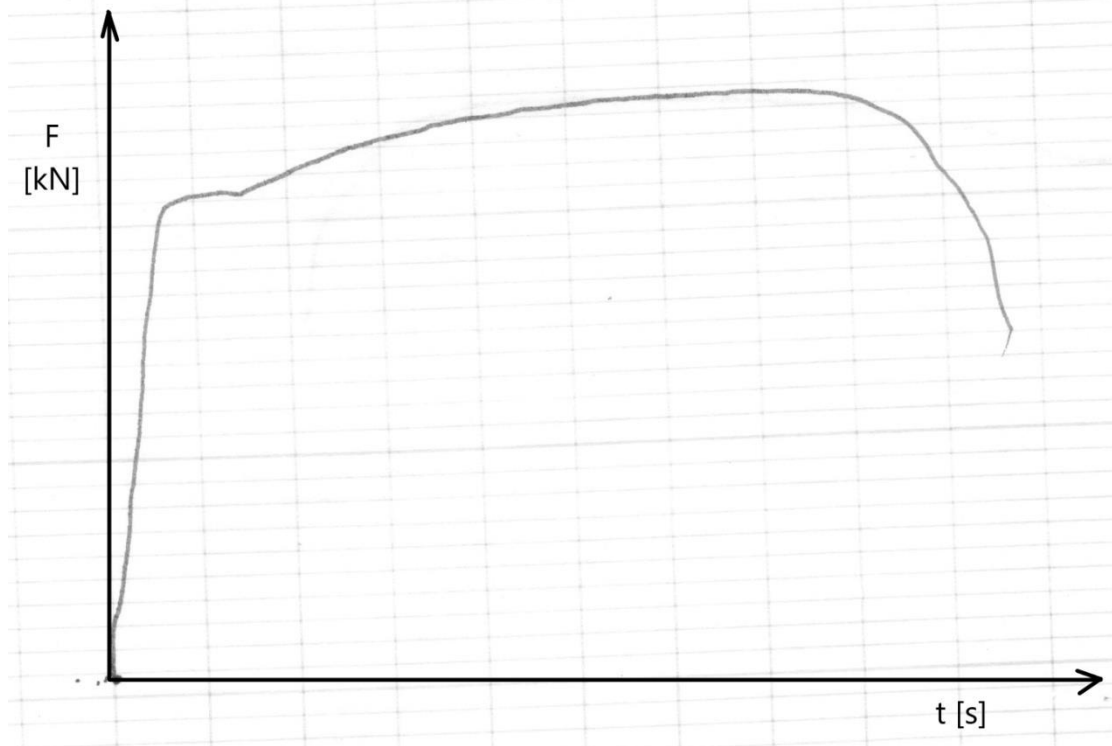


graf 2 - Tahová zkouška EN AW 7075 - O.

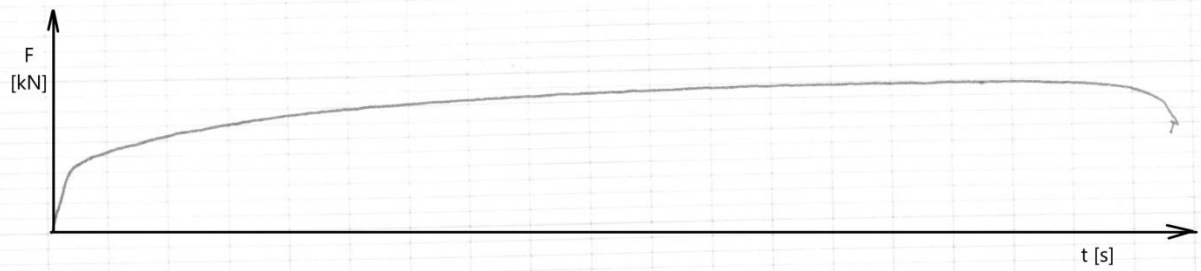
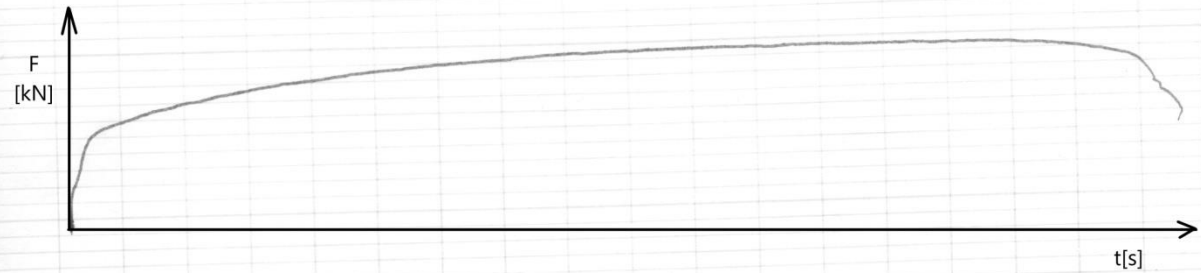
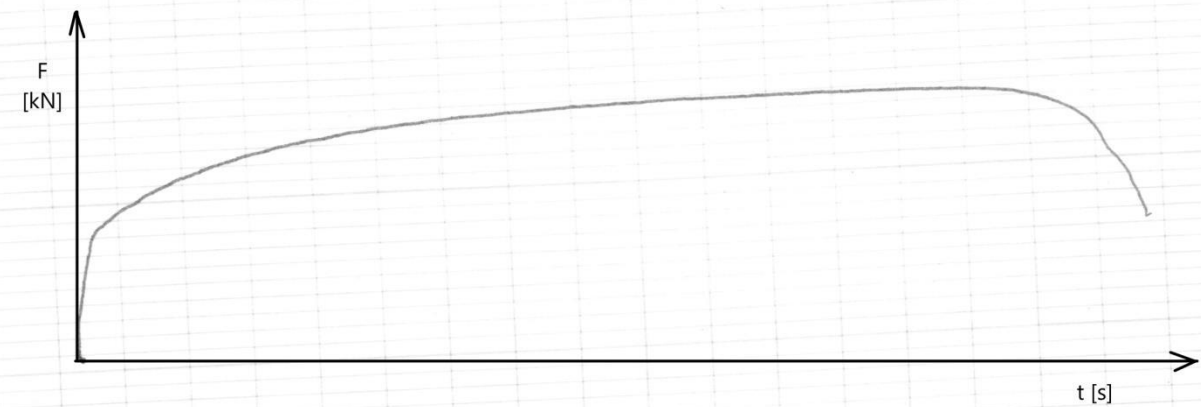
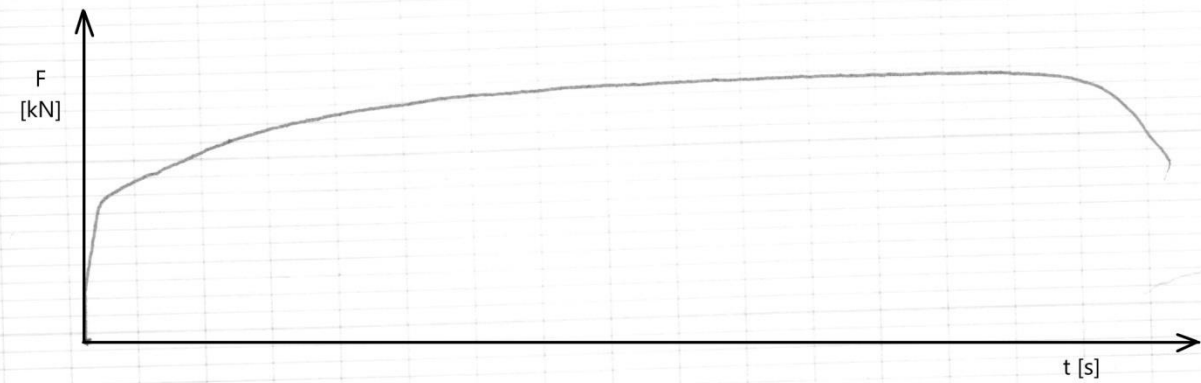
II. Tahová zkouška materiálu EN AW 6063**Graf 3 - Tahová zkouška EN AW 6063 - O.****graf 4 - Tahová zkouška EN AW 6063 - T4**

III. Tahová zkouška materiálu HX340

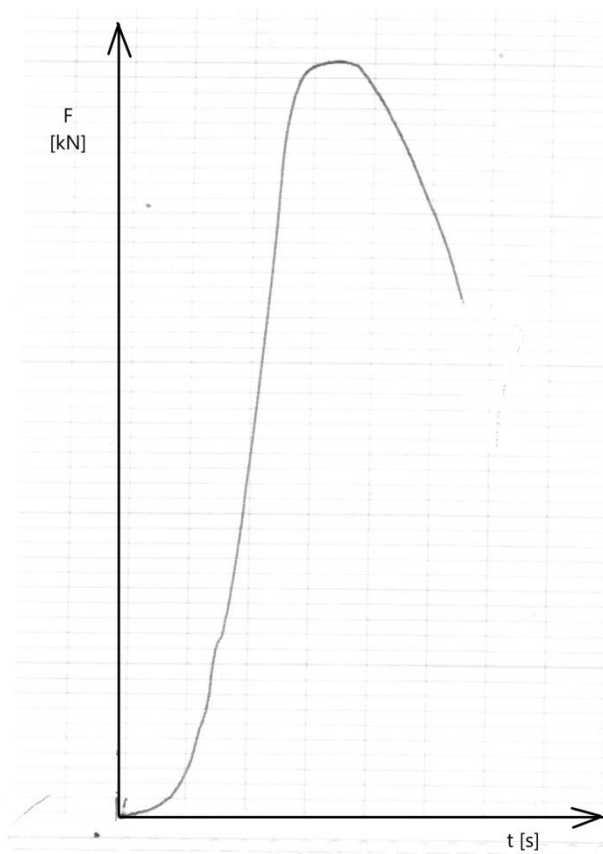
graf 5 - Tahová zkouška HX340 - tvářeno v podélném směru.



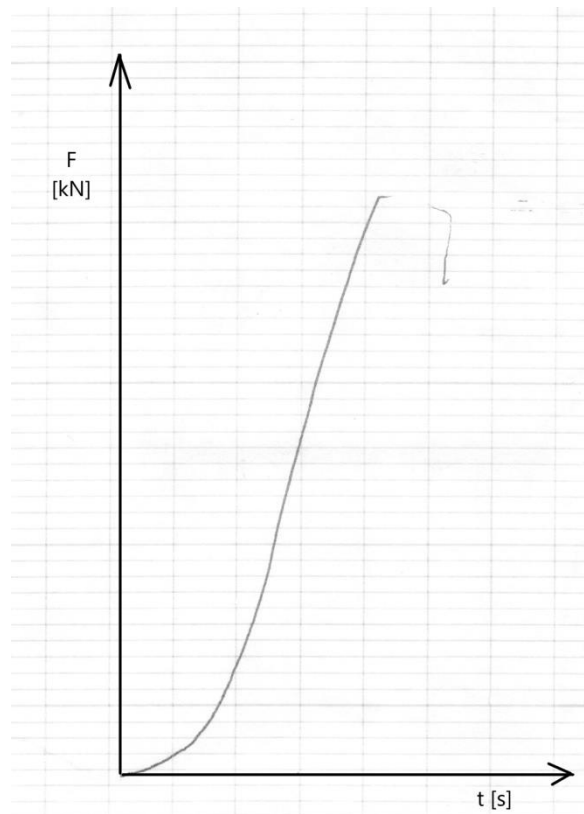
graf 6 - Tahová zkouška HX340 - tvářeno v příčném směru.

IV. Tahová zkouška materiálu DC-05 a DC-01.**graf 7 - Tahová zkouška DC-05 - tvářeno v podélném směru.****graf 8 - Tahová zkouška DC-05 - tvářeno v příčném směru.****graf 9 - Tahová zkouška DC-01 - tvářeno v podélném směru.****graf 10 - Tahová zkouška DC-01 - tvářeno v příčném směru.**

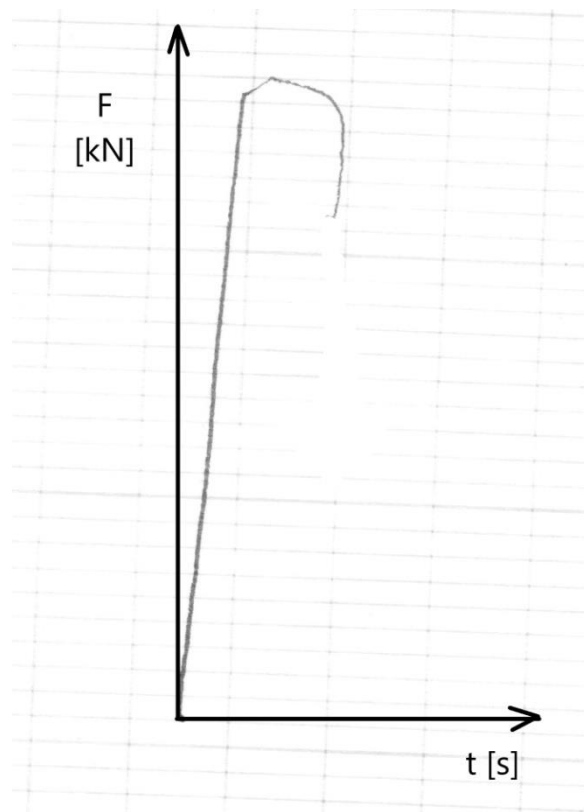
V.Tahová zkouška oceli S235JRC



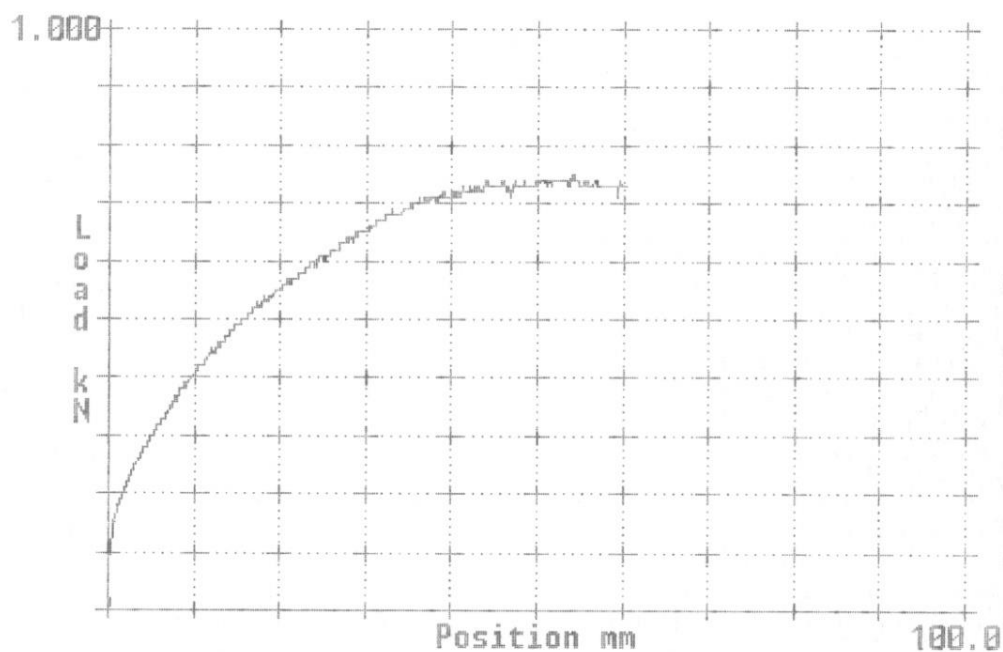
graf 11 - Tahová zkouška S235JRC

VI. Tahová zkouška šedé litiny GJL250

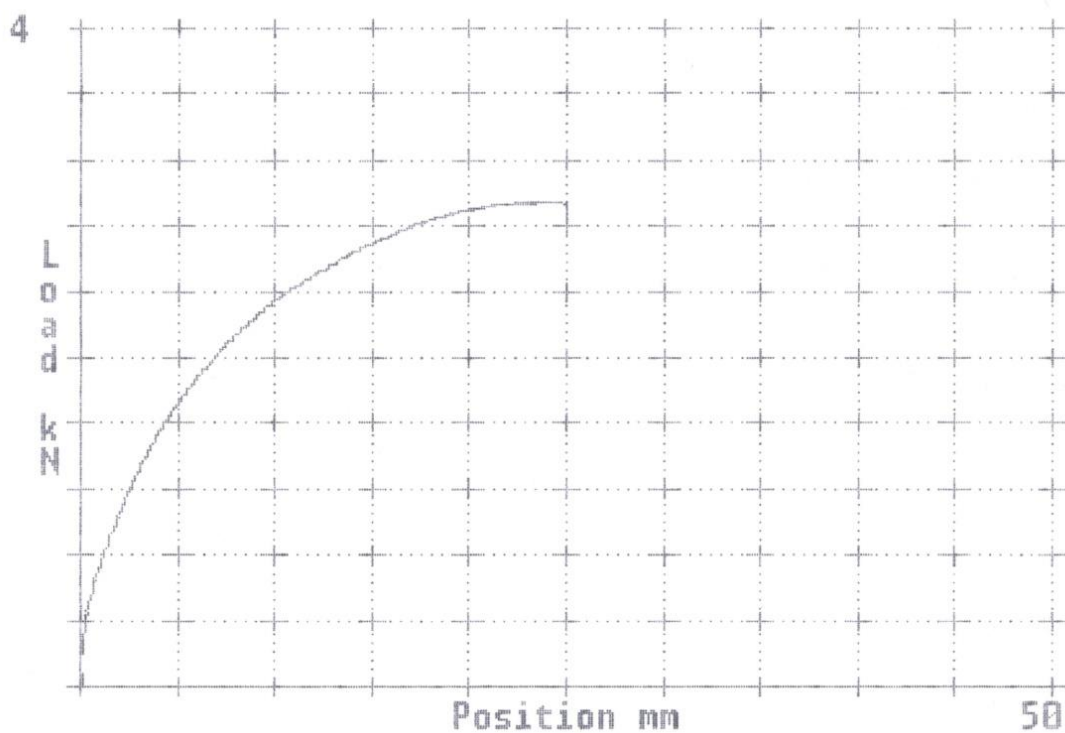
graf 12 - Tahová zkouška GJL250 - upnutí pomocí samosvorných čelistí



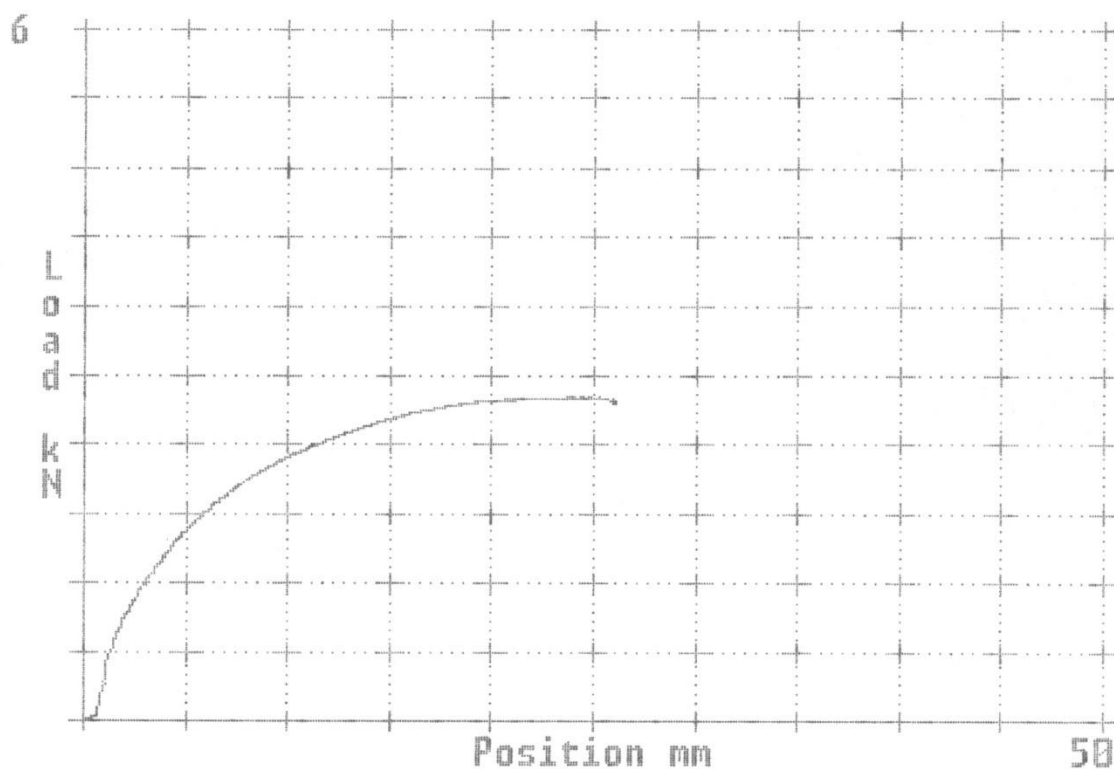
graf 13 - Tahová zkouška GJL250 - upnutí pomocí závitů.

VII.Ohybová zkouška materiálu EN AW 6063 - O

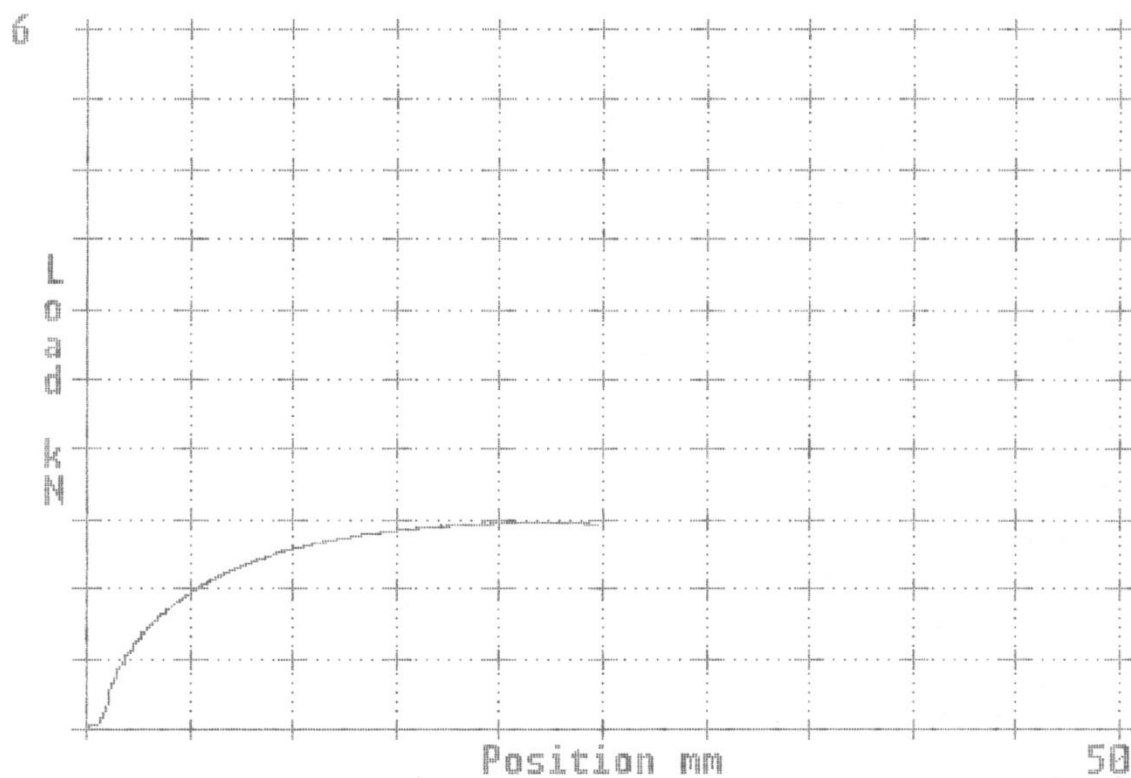
graf 14 - Ohybová zkouška - EN AW 6063.



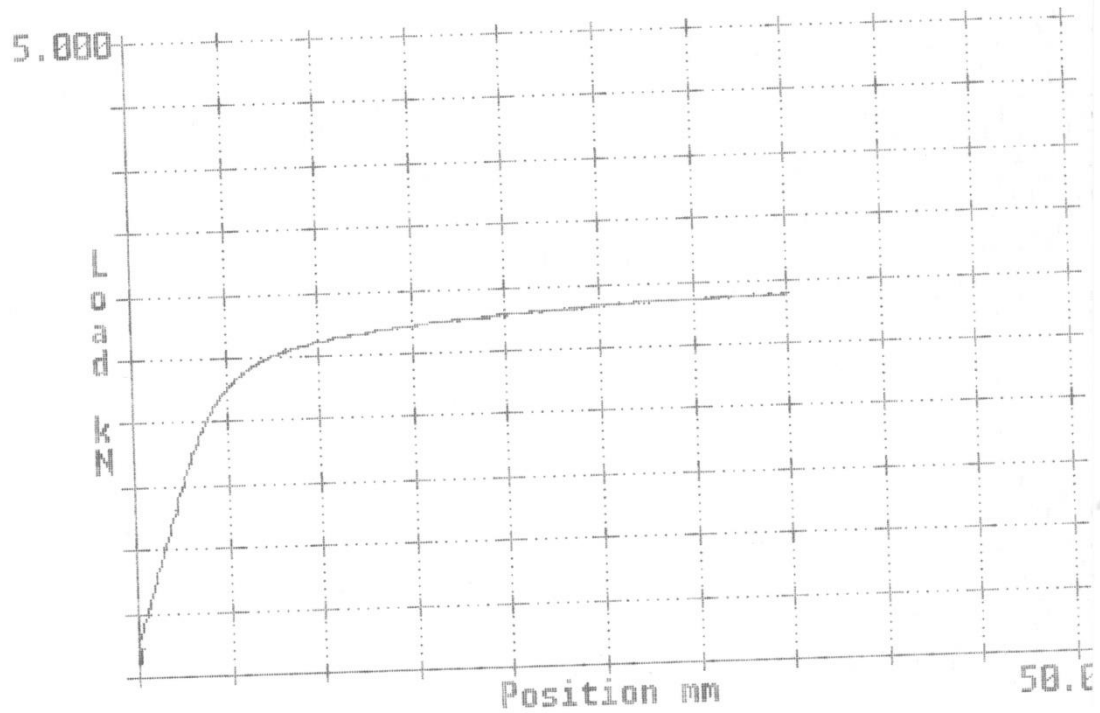
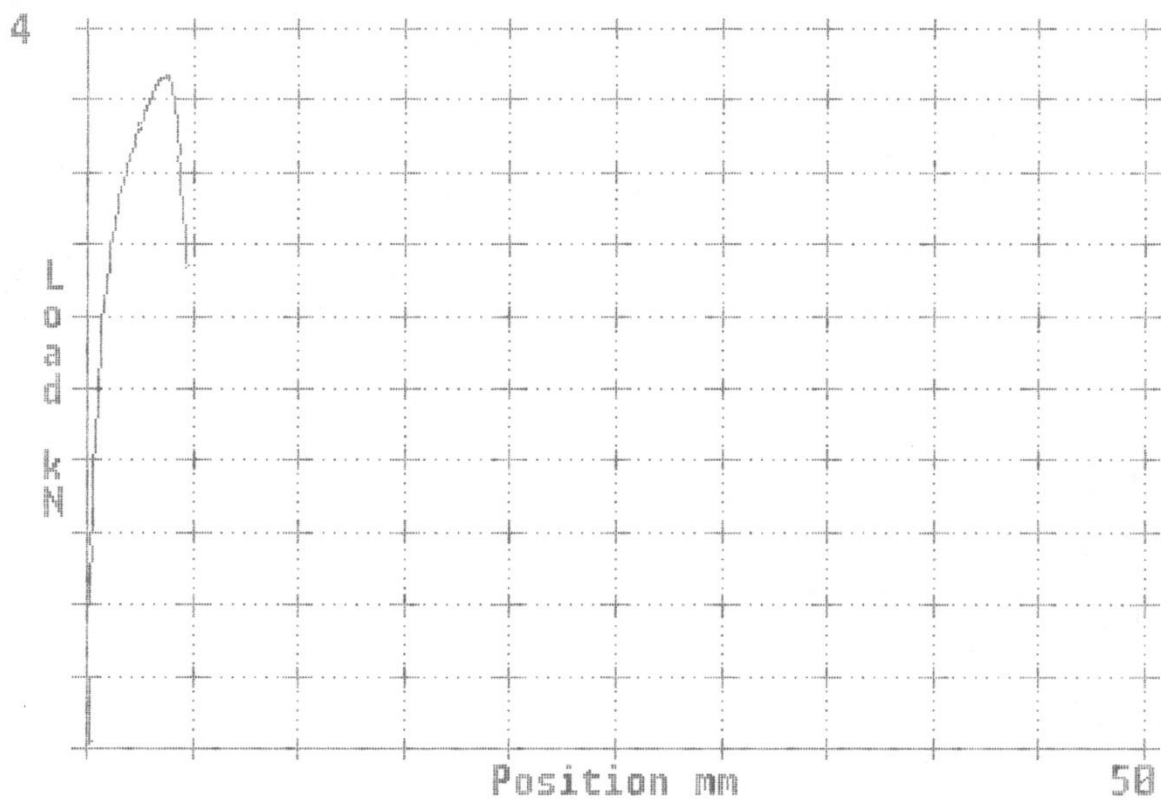
graf 15 - Ohybová zkouška - EN AW 6063 - O s vrubem 2mm.

VIII.Ohybová zkouška materiálu EN AW 6063 - O

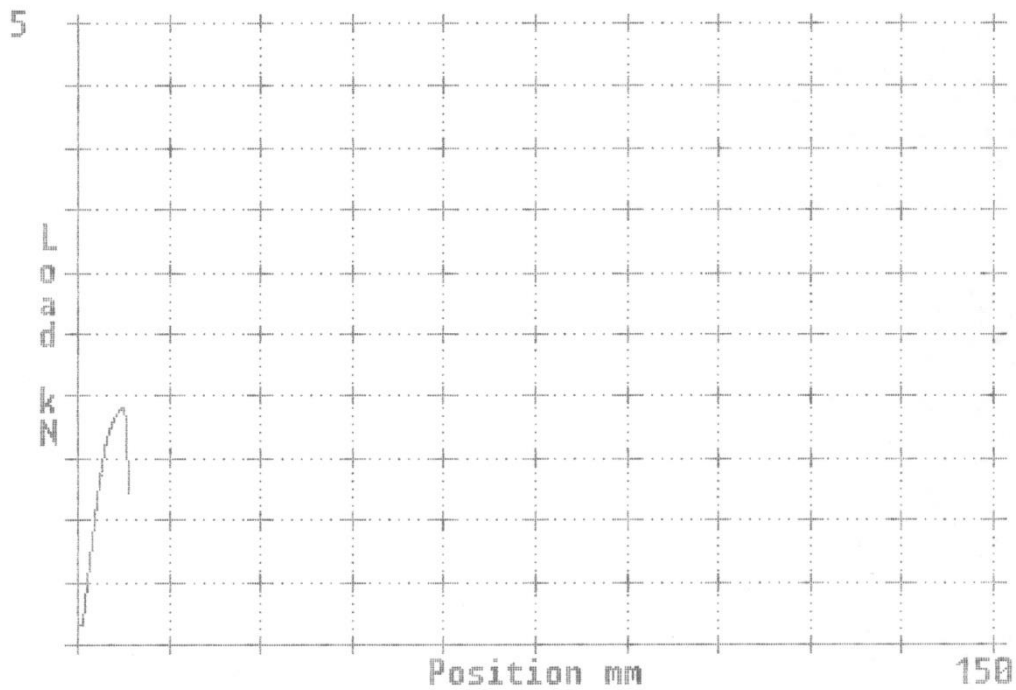
graf 16 - Ohybová zkouška - EN AW 6063 - O s vrubem 4,5mm.



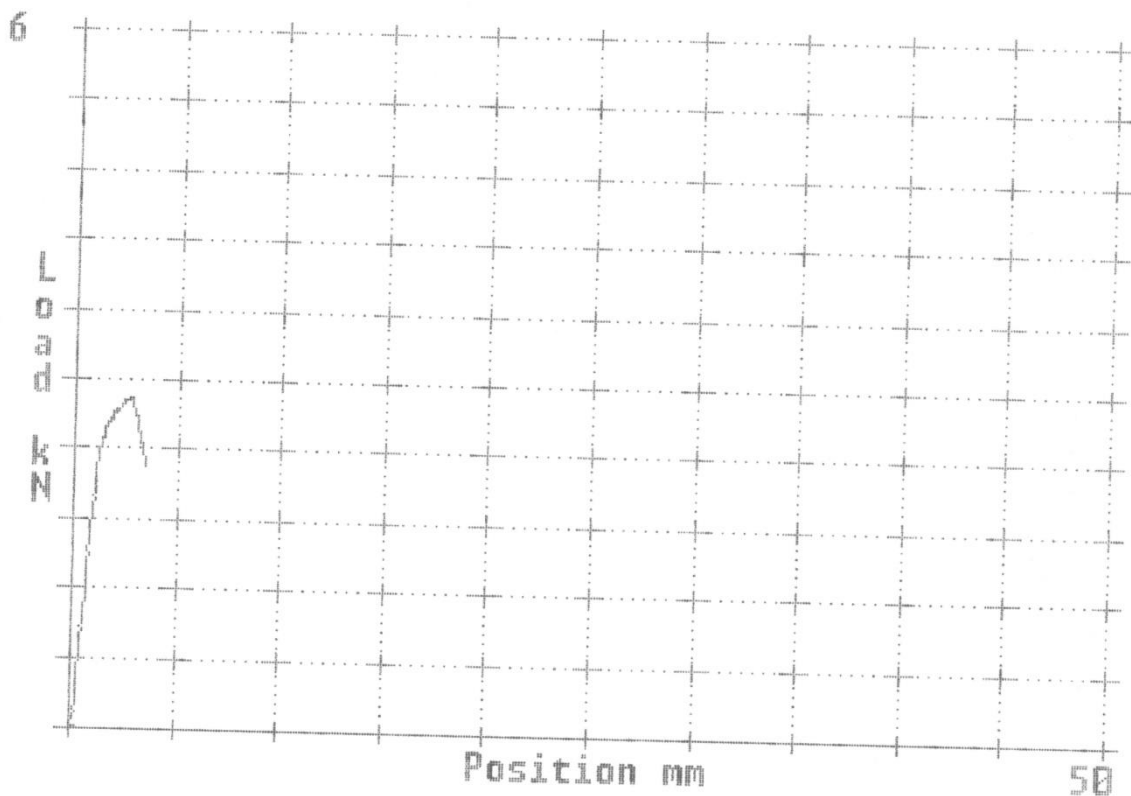
graf 17 - Ohybová zkouška - EN AW 6063 - O s vrubem 8mm.

IX. Ohybová zkouška materiálu EN AW 6063 – T6**graf 18 - Ohybová zkouška - EN AW 6063 - T6.****graf 19 - Ohybová zkouška - EN AW 6063 - T6 s vrubem 2mm.**

X.Ohybová zkouška materiálu EN AW 6063 – T6

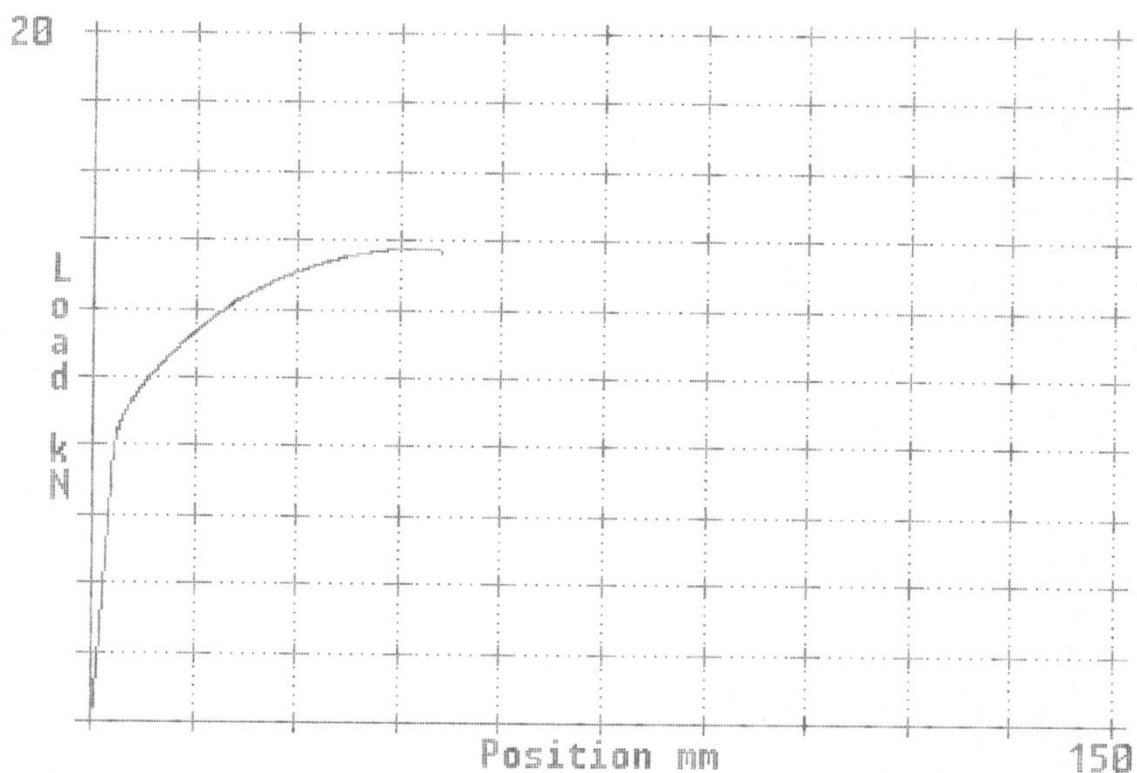


graf 20 - Ohybová zkouška - EN AW 6063 - T6 s vrubem 4,5mm.

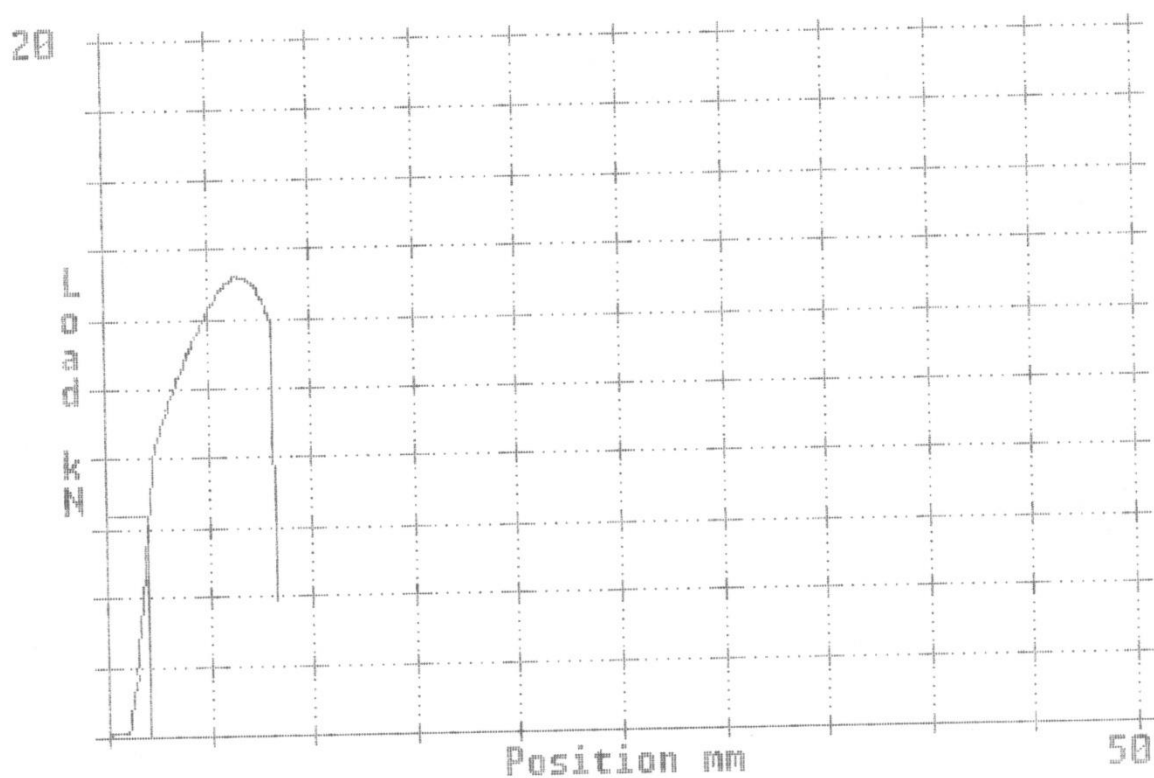


graf 21 - Ohybová zkouška - EN AW 6063 - T6 s vrubem 8mm.

XI.Ohybová zkouška materiálu C45

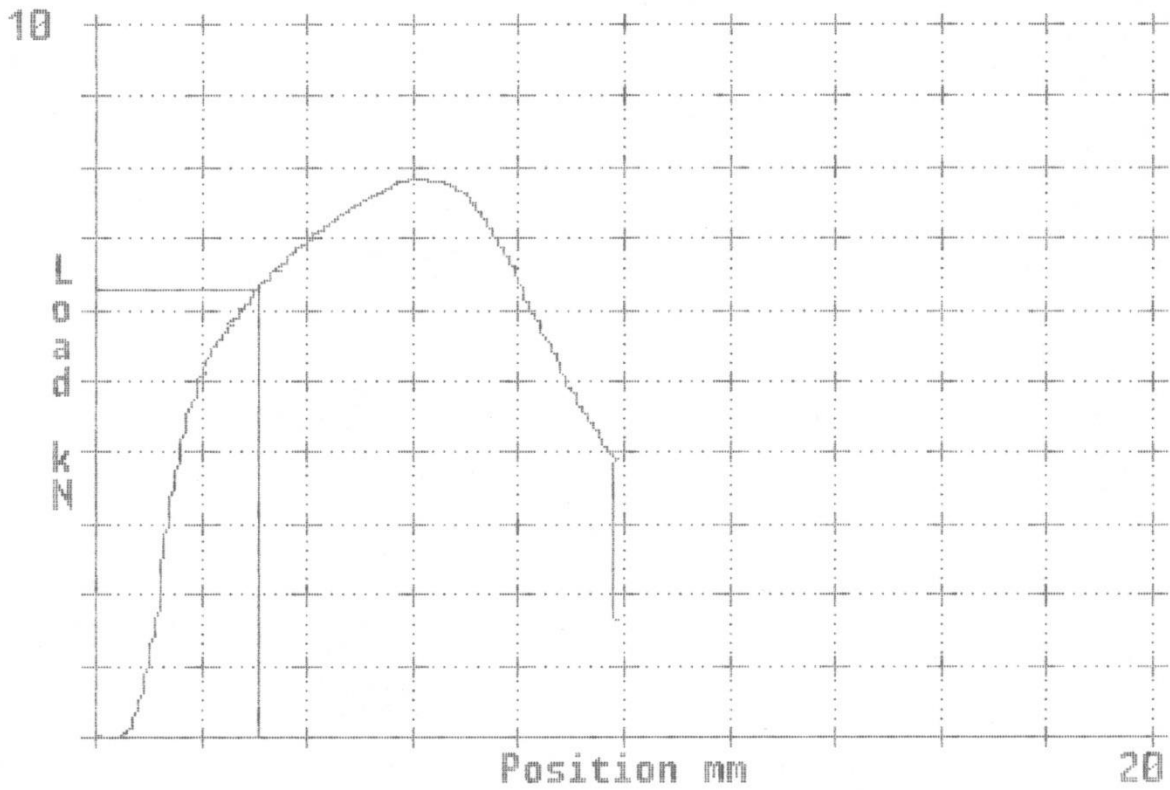


graf 22 - Ohybová zkouška - C45.

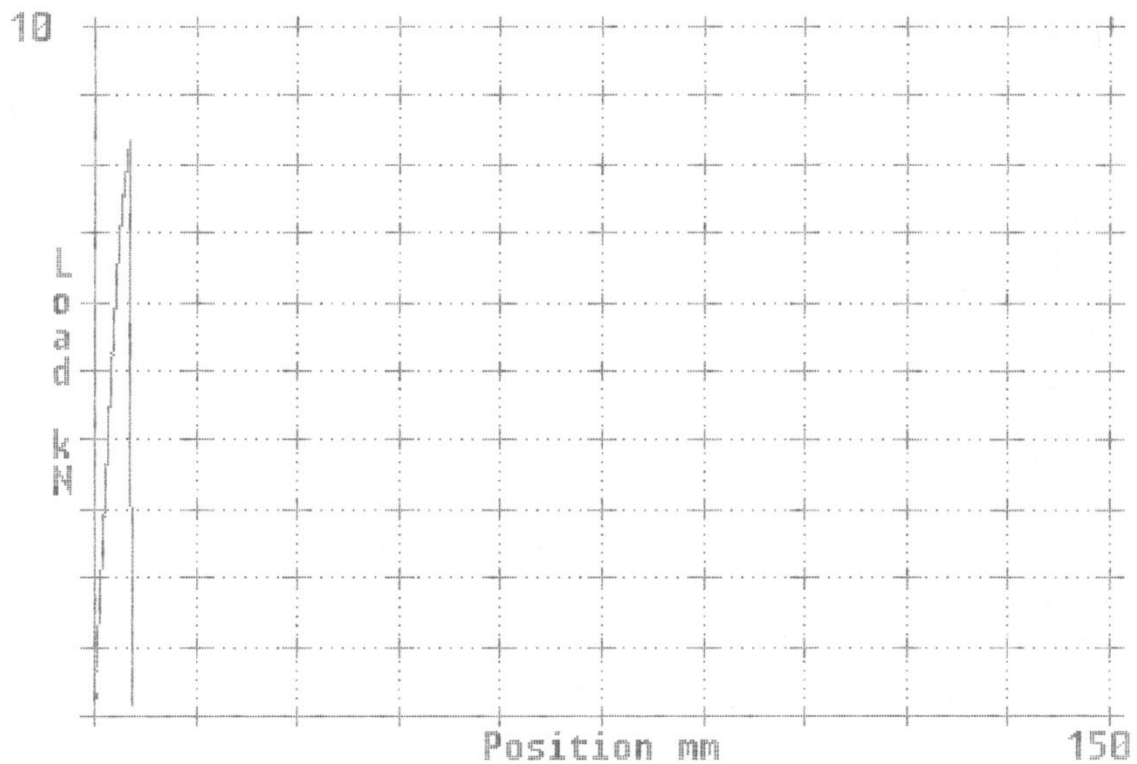


graf 23 - Ohybová zkouška - C45 s vrubem 10mm.

XII.Ohybová zkouška materiálů C45 a GJL250

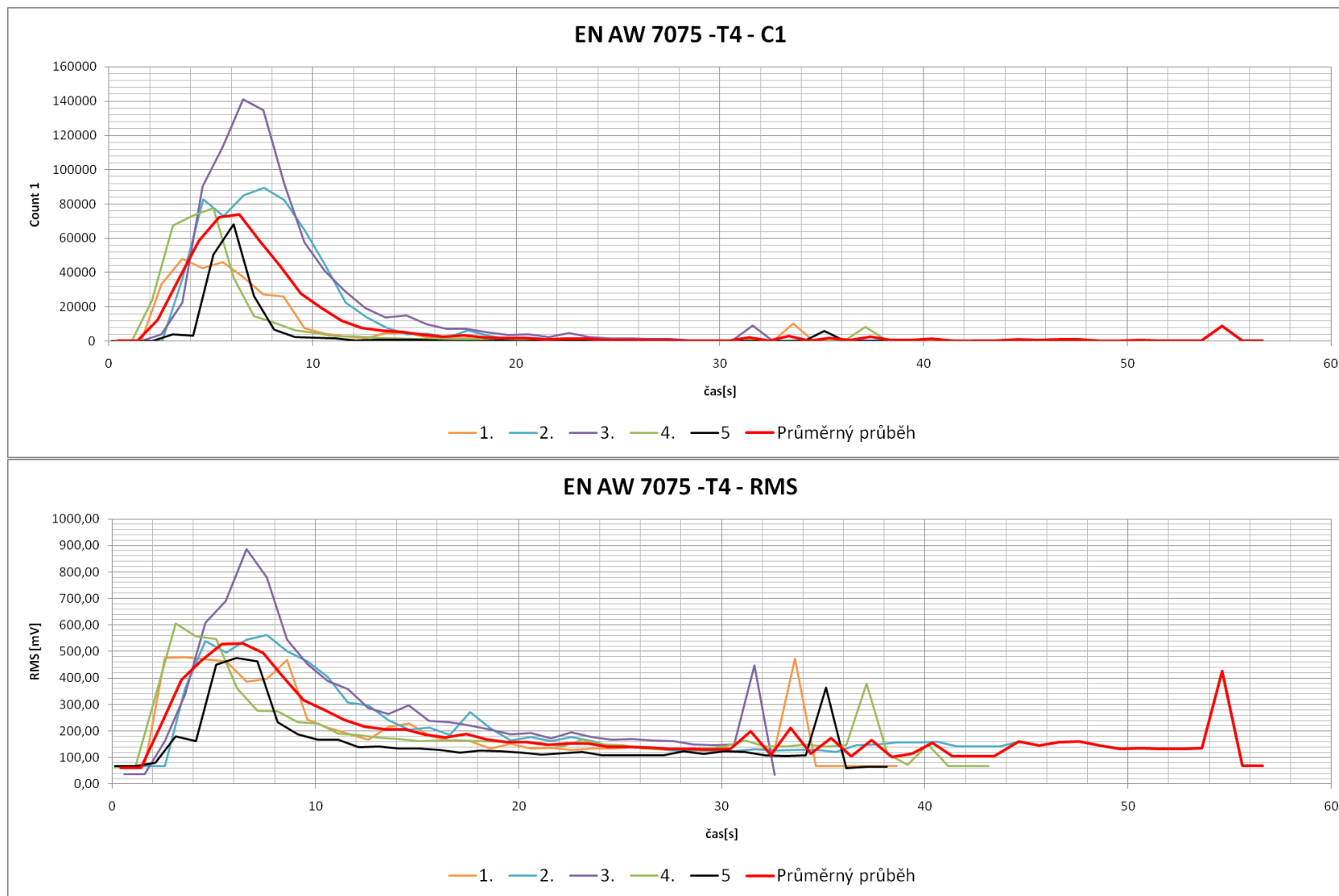


graf 24 - Ohybová zkouška - C45 s vrubem 12mm.

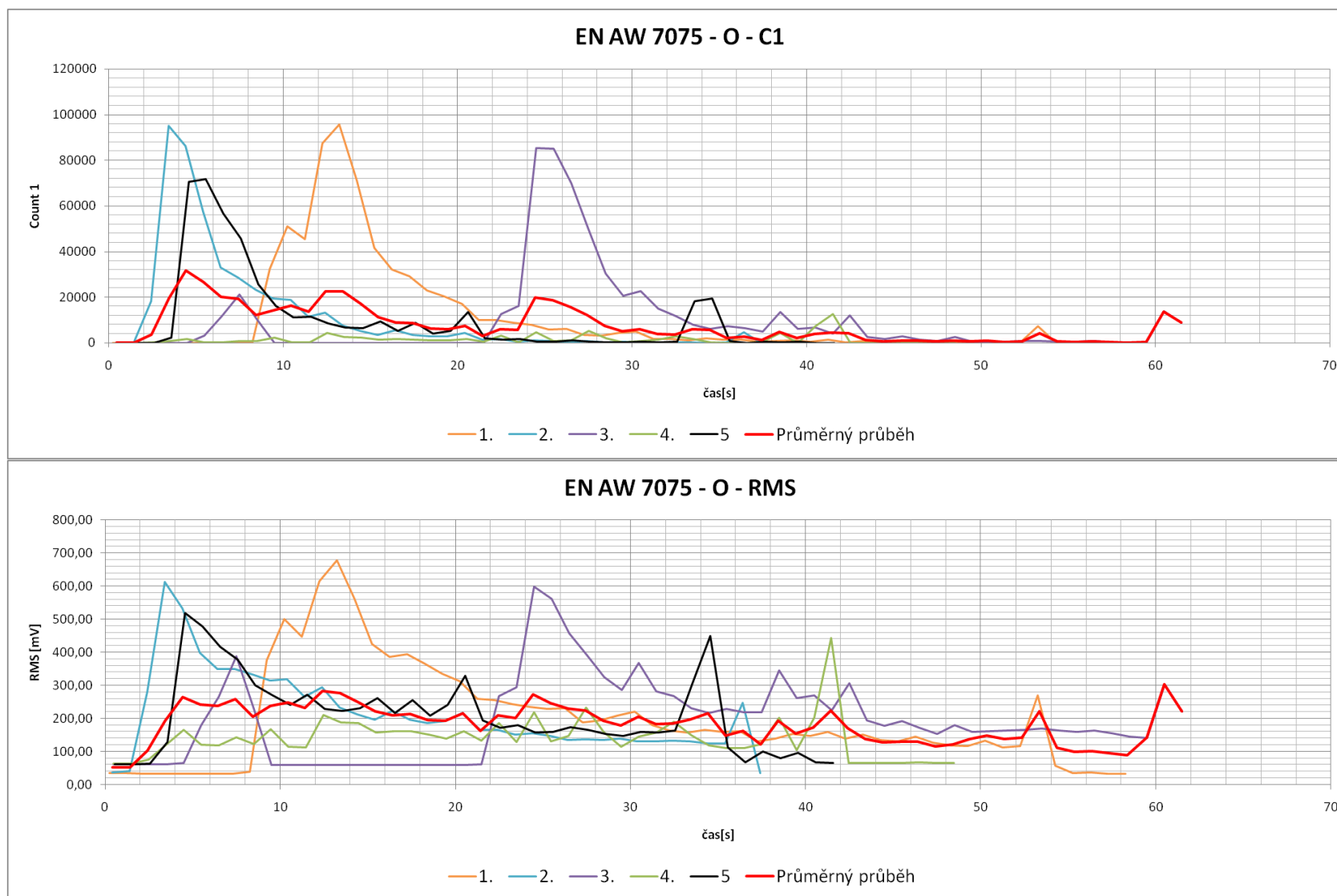


graf 25 - Ohybová zkouška - GJL250.

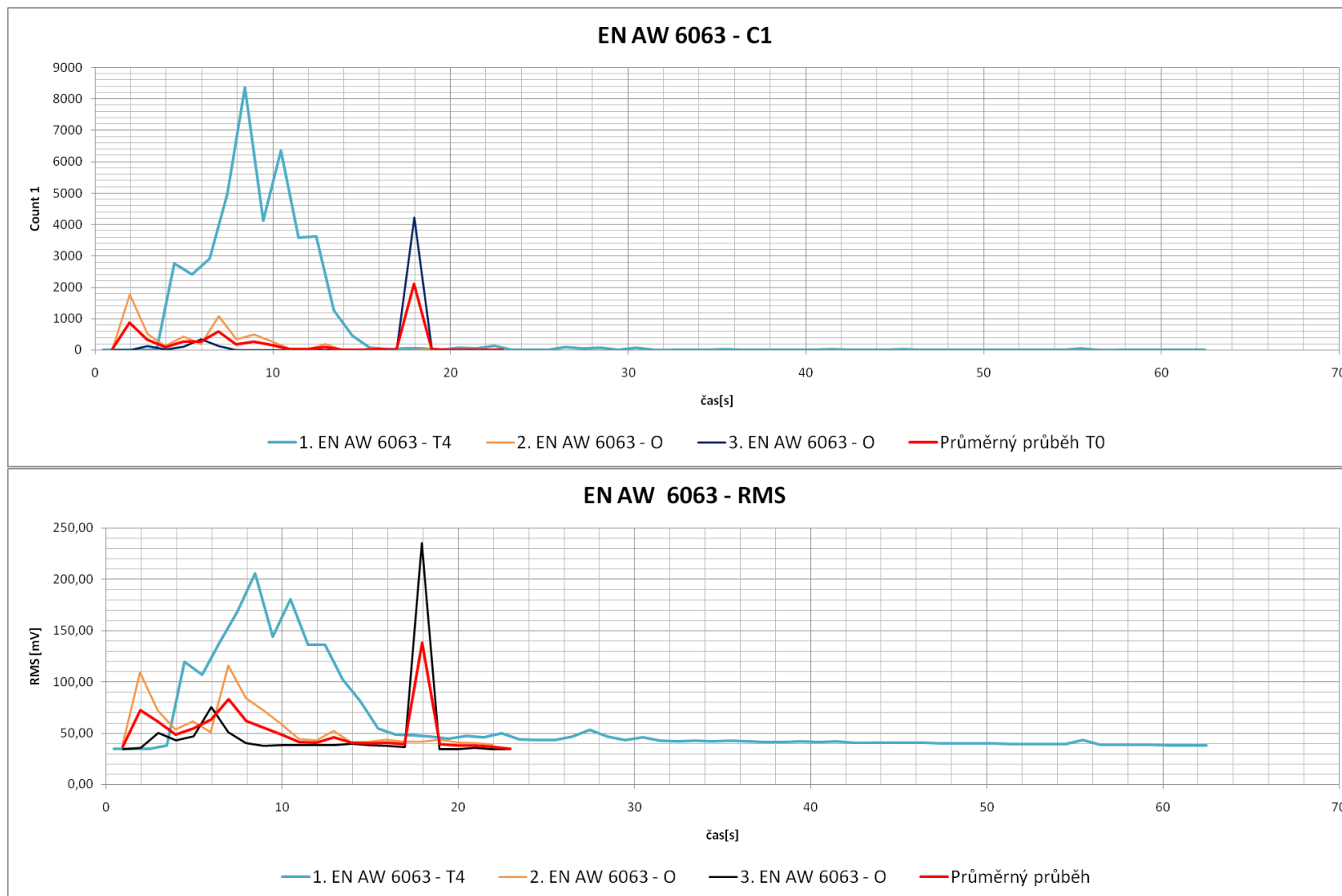
XIII.Záznam AE z tahové zkoušky materiál EN AW 7075 – T4



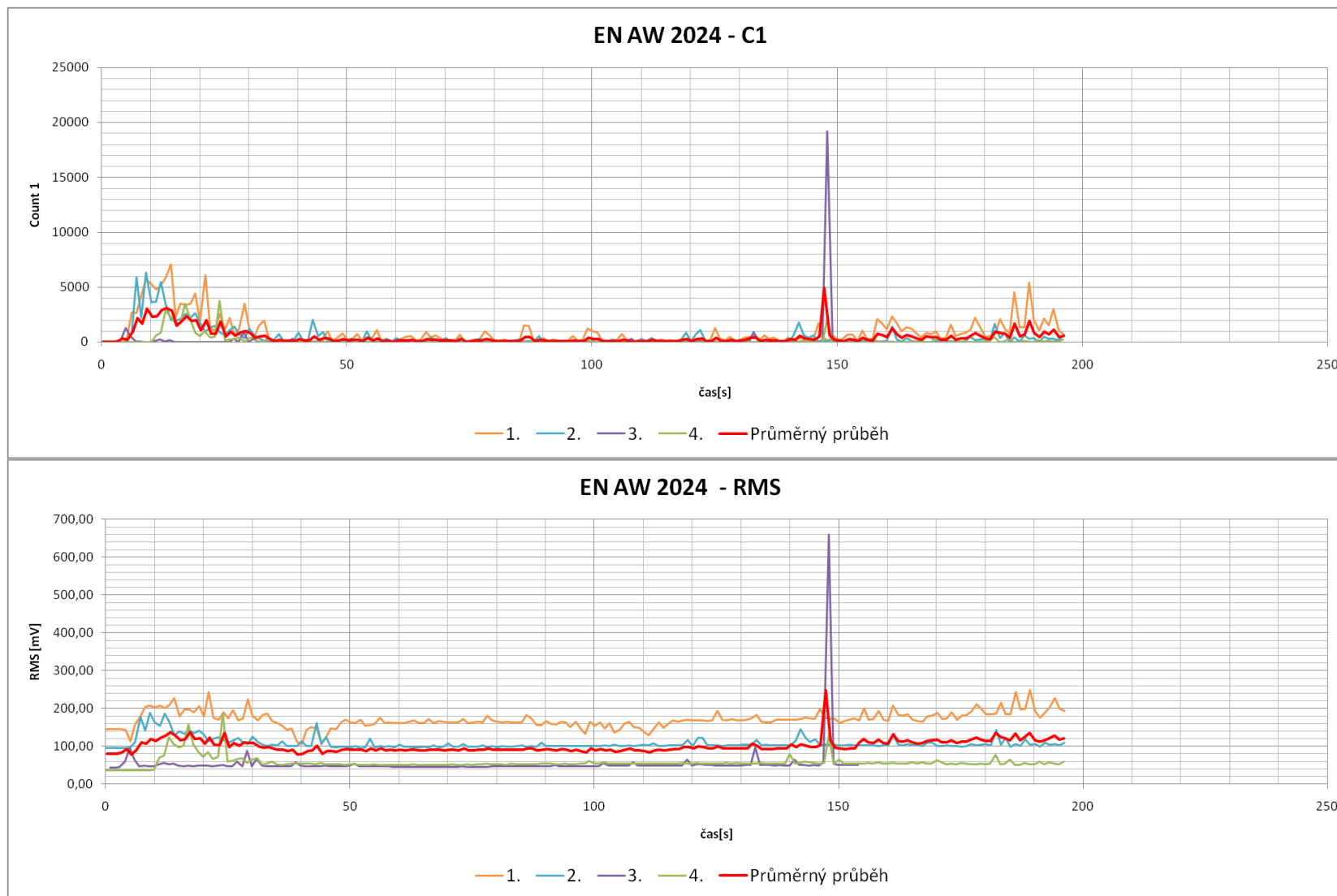
XIV.Záznam AE z tahové zkoušky materiál EN AW 7075 – O



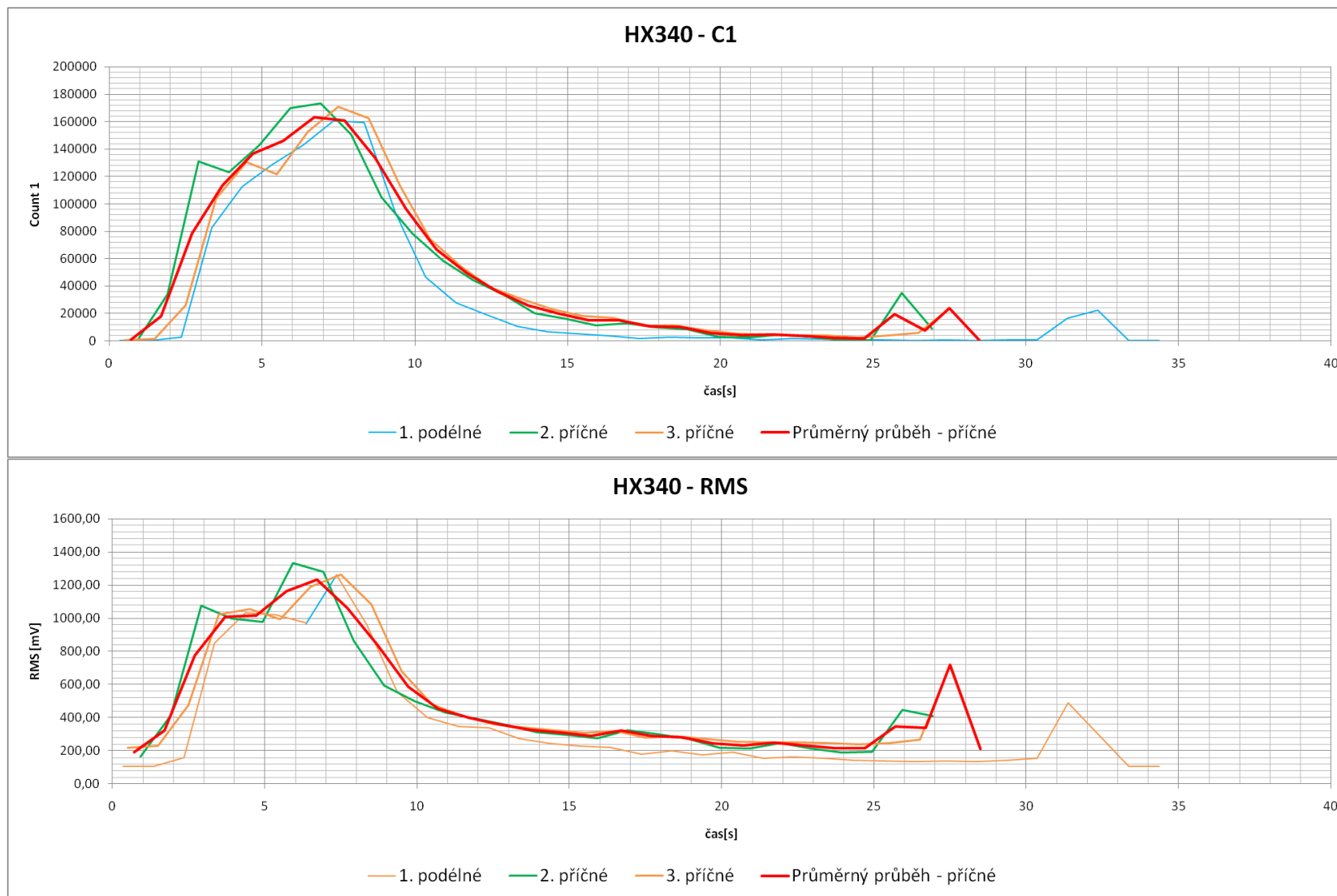
XV.Záznam AE z tahové zkoušky materiál EN AW 6063



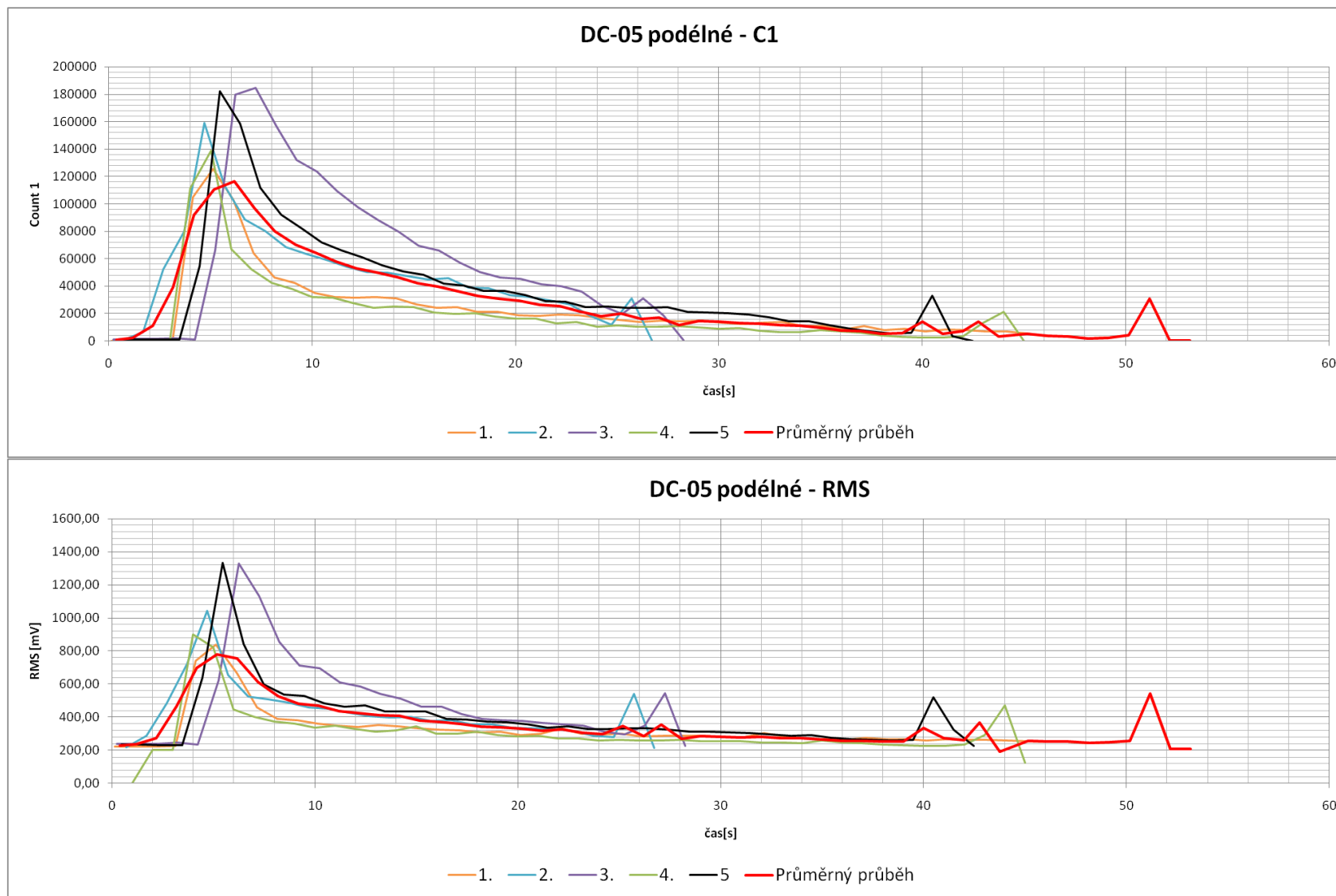
XVI.Záznam AE z tahové zkoušky materiálu EN AW 2024



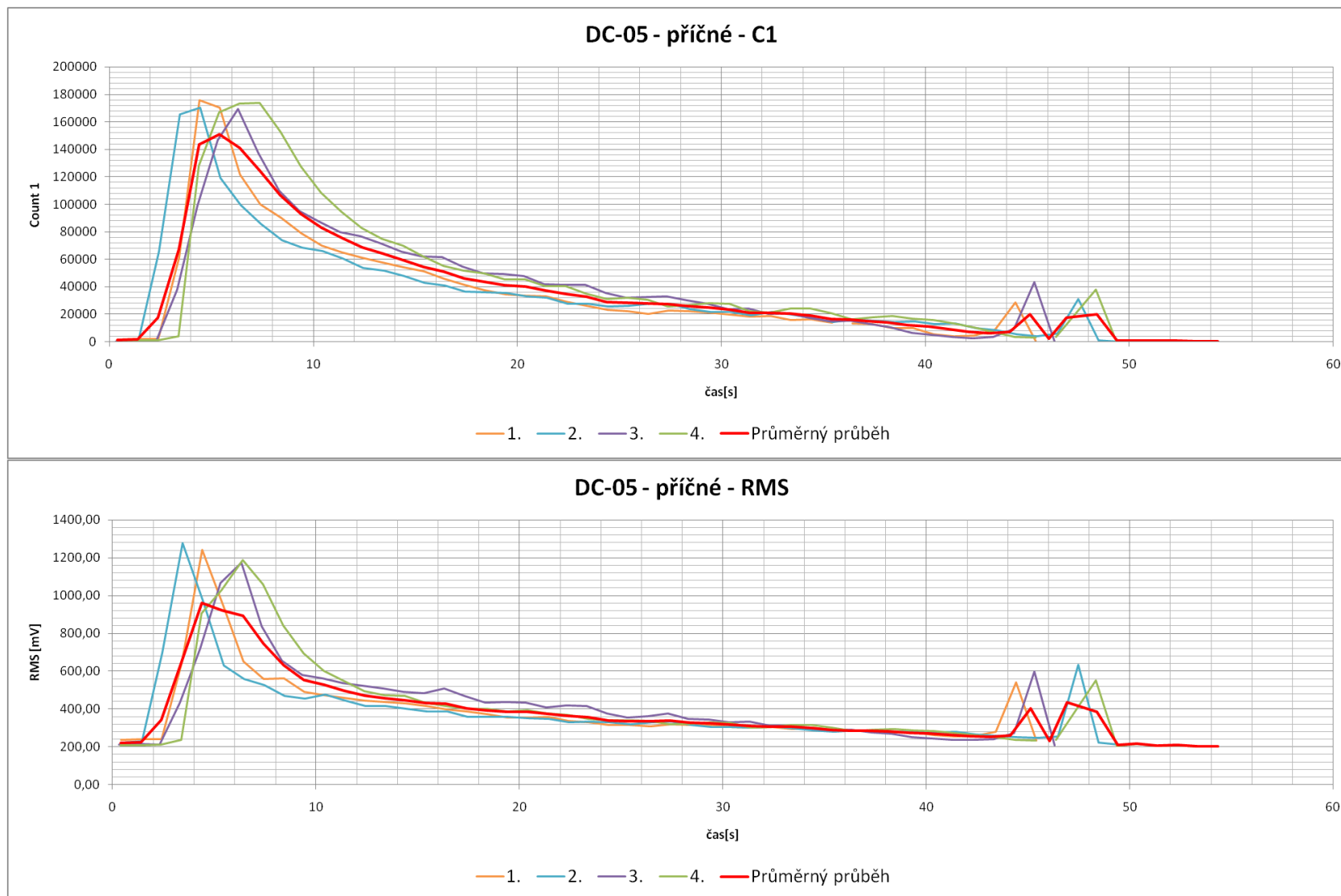
XVII.Záznam AE z tahové zkoušky materiálu HX340



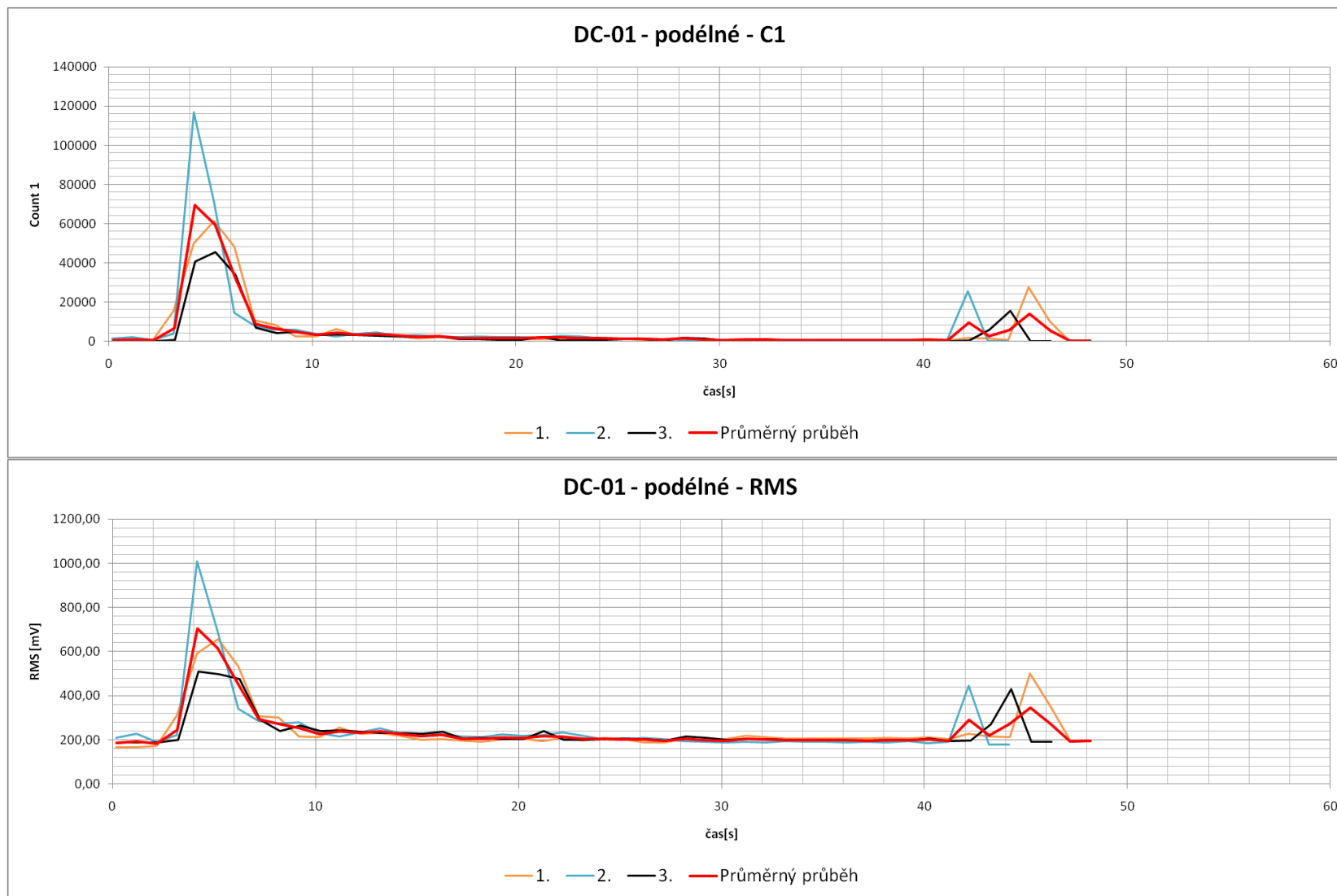
XVIII.Záznam AE z tahové zkoušky materiálu DC-05 tvářený v podélném směru



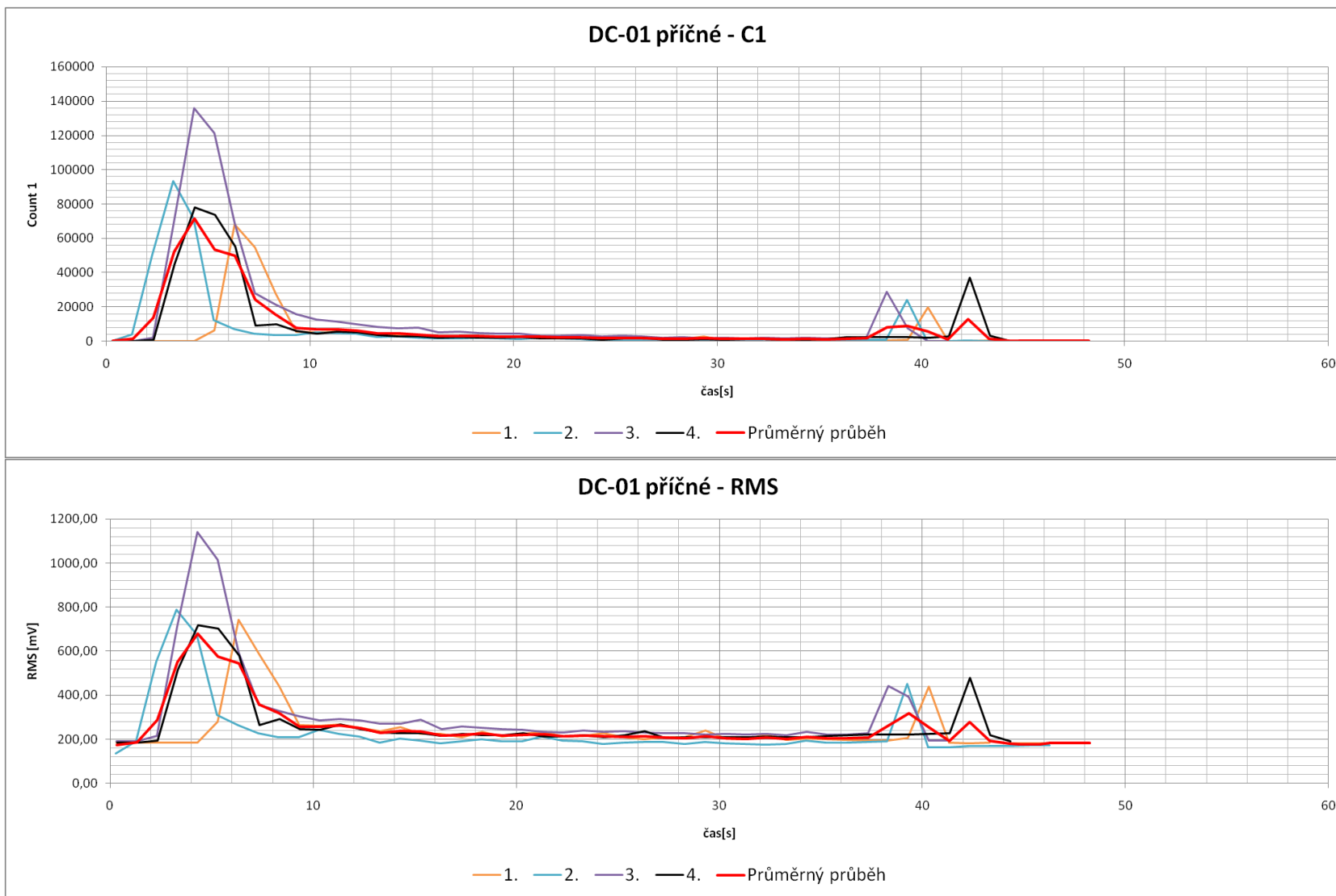
XIX.Záznam AE z tahové zkoušky materiálu DC-05 tvářený v příčném směru



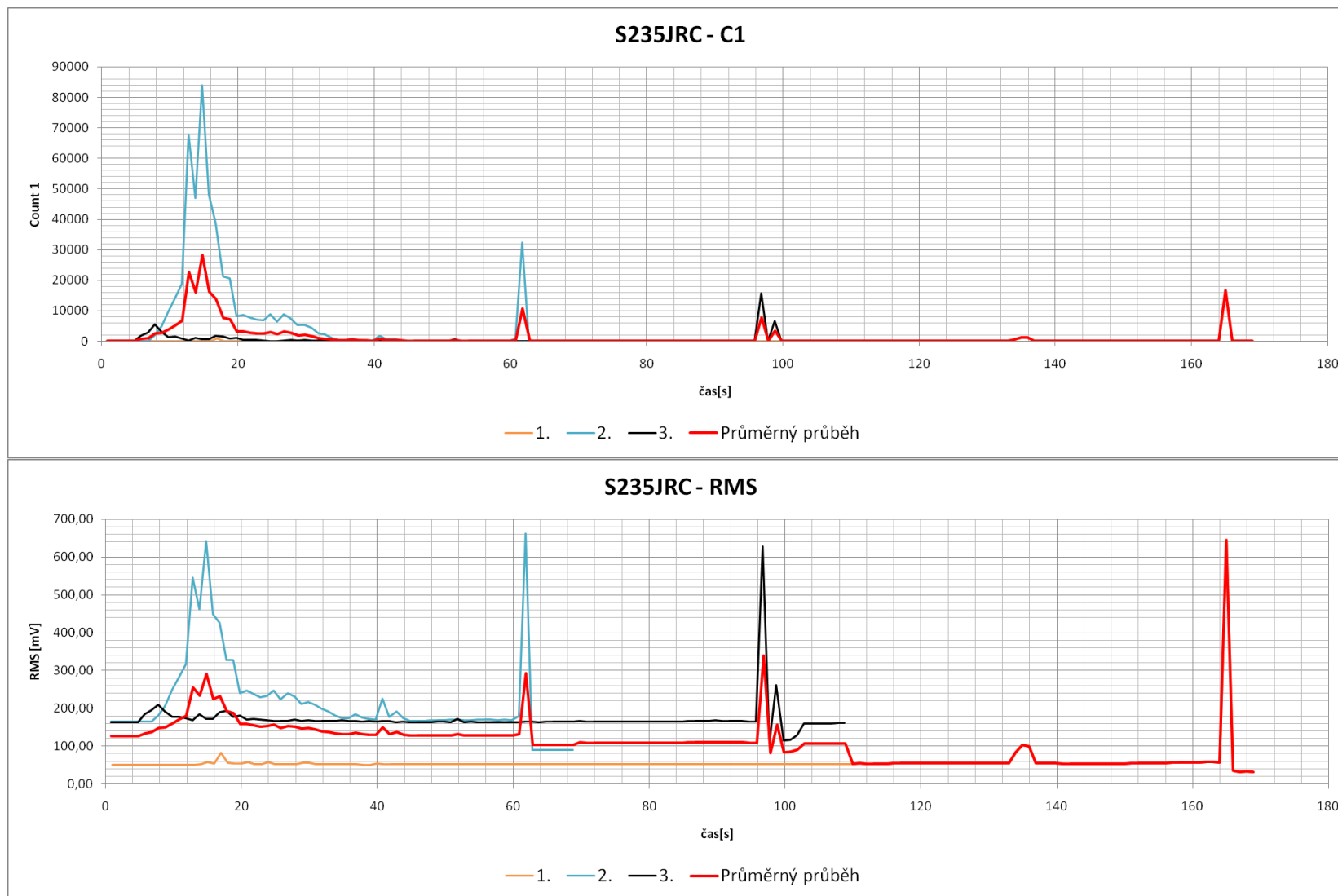
XX.Záznam AE z tahové zkoušky materiálu DC-01 tvářený v podélném směru



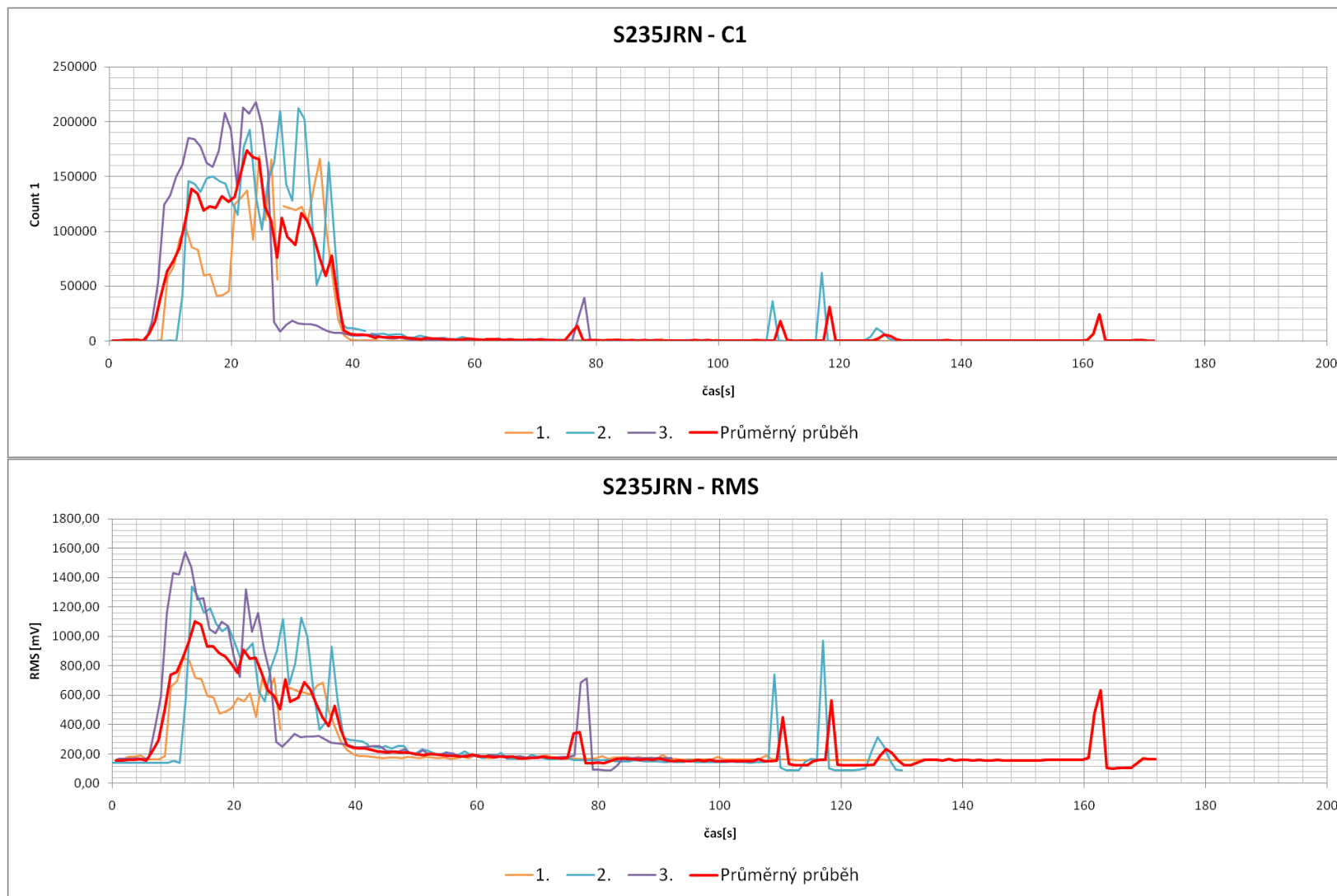
XXI.Záznam AE z tahové zkoušky materiálu DC-01 tvářený v příčném směru



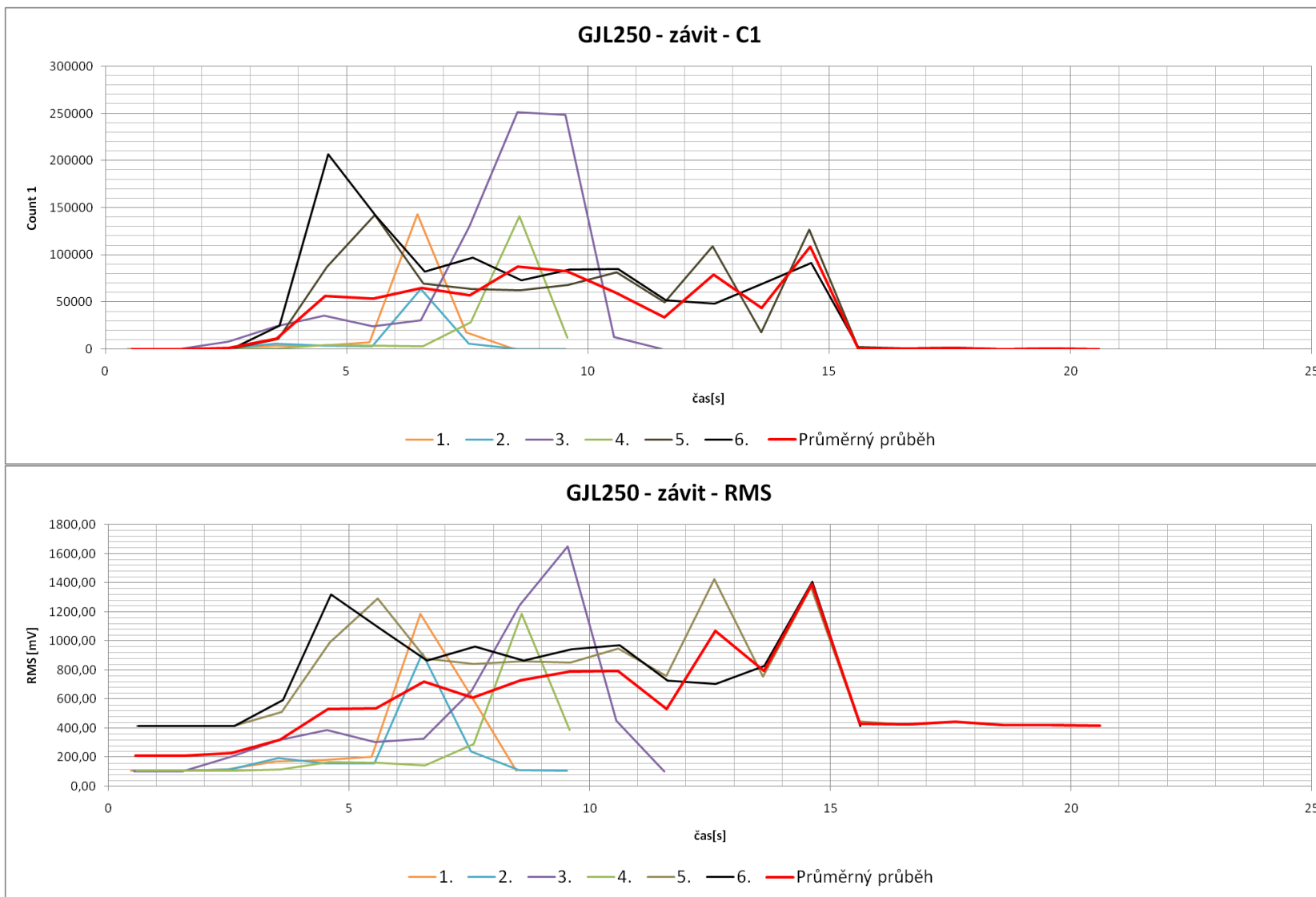
XXII.Záznam AE z tahové zkoušky materiálu S235JRC



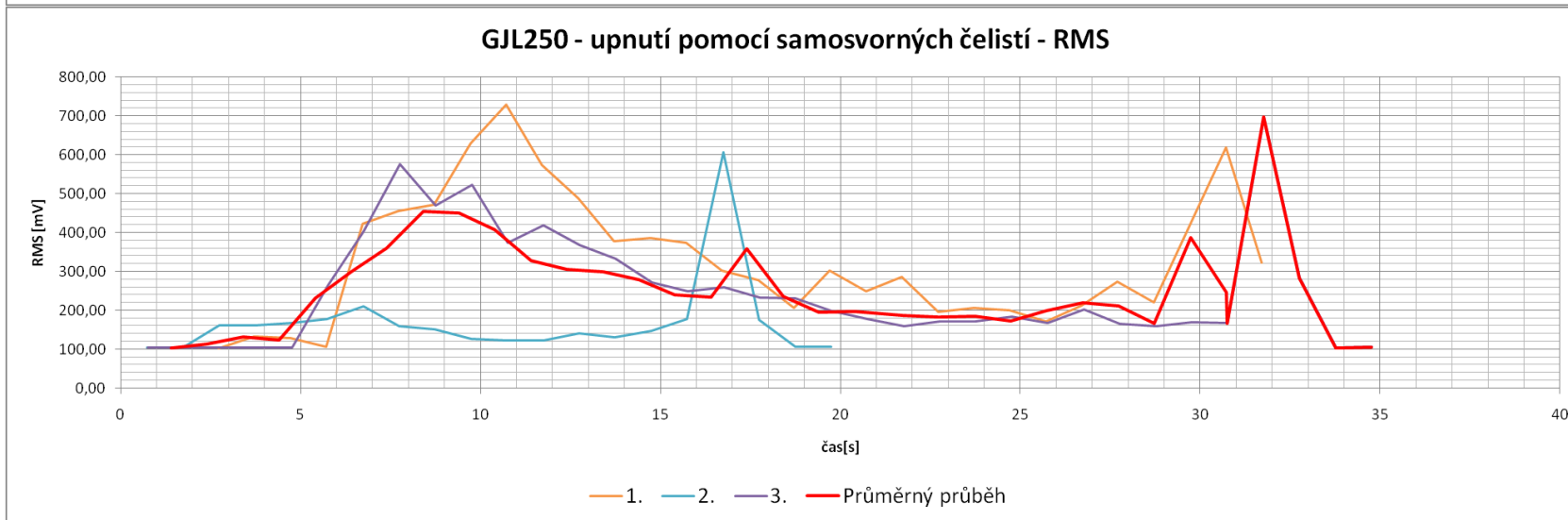
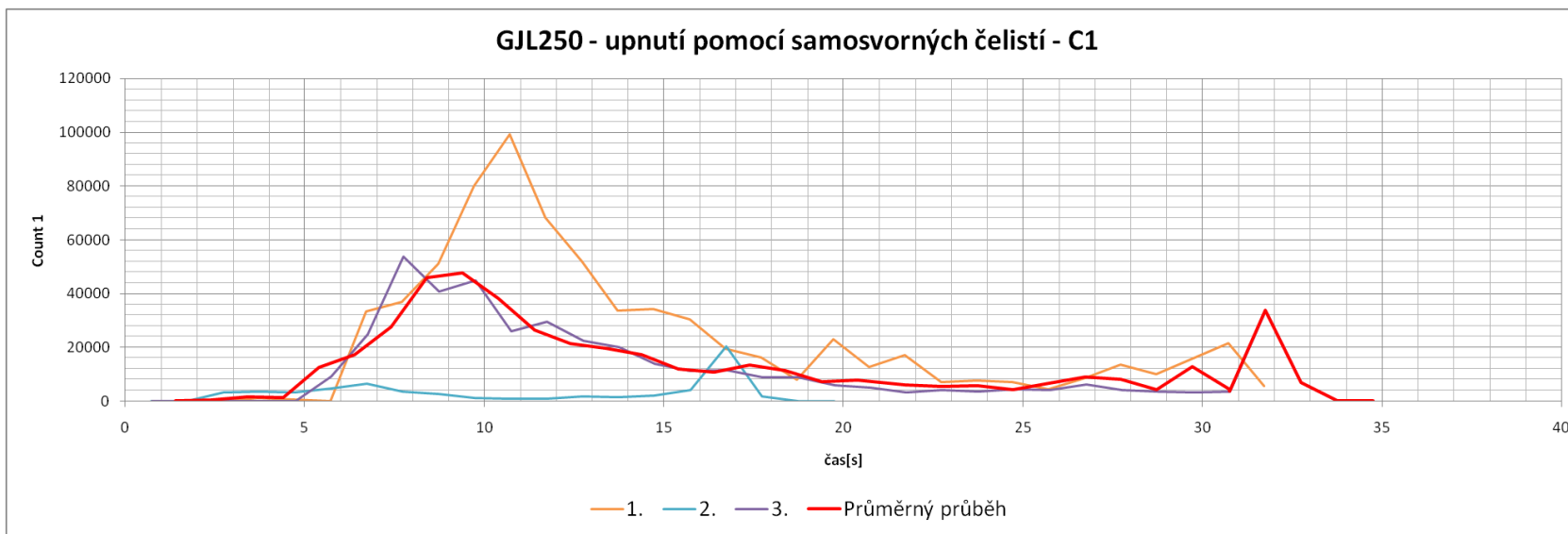
XXIII.Záznam AE z tahové zkoušky materiálu S235JRN



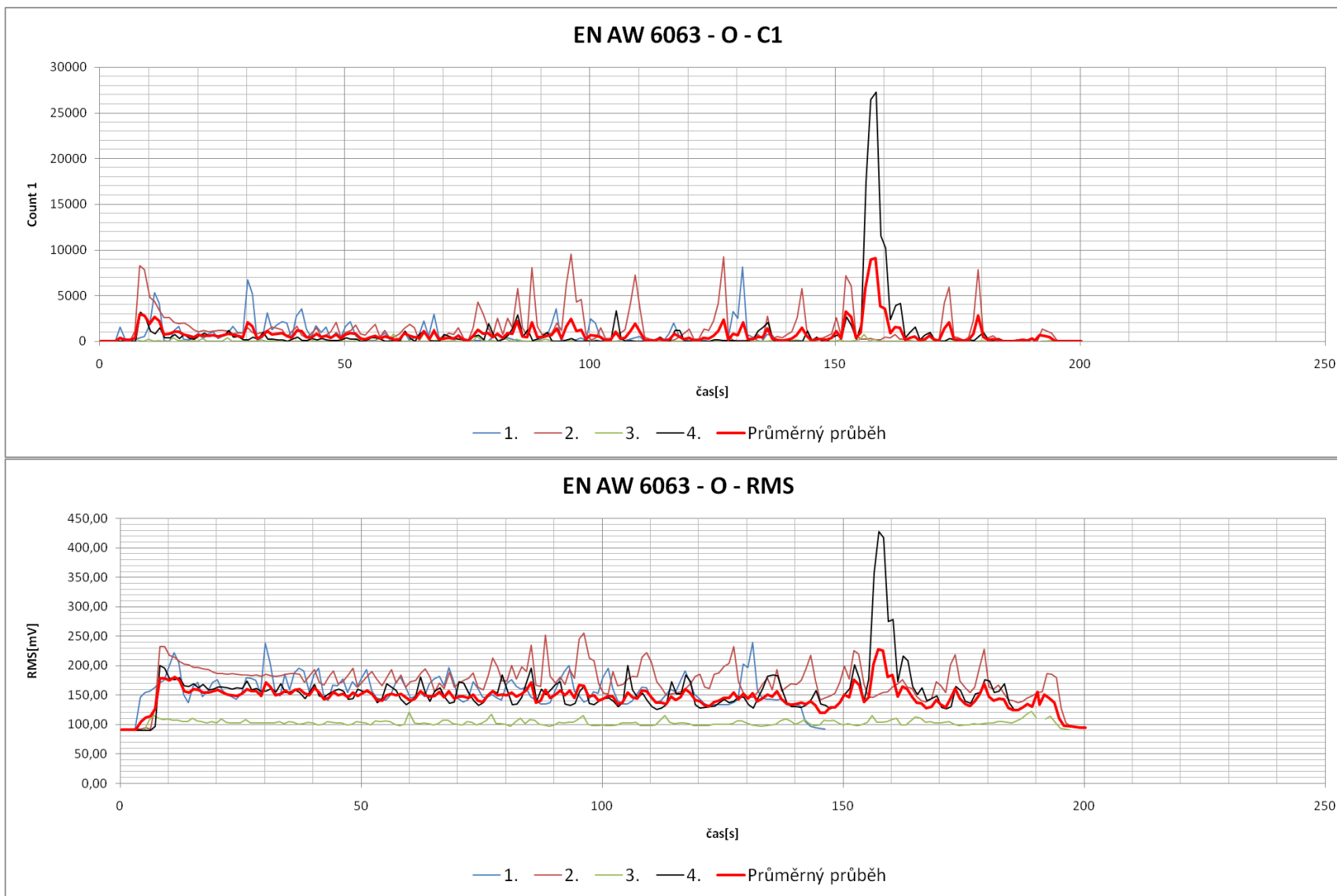
XXIV.Záznam AE z tahové zkoušky materiálu GJL250 – upnutí pomocí závitu



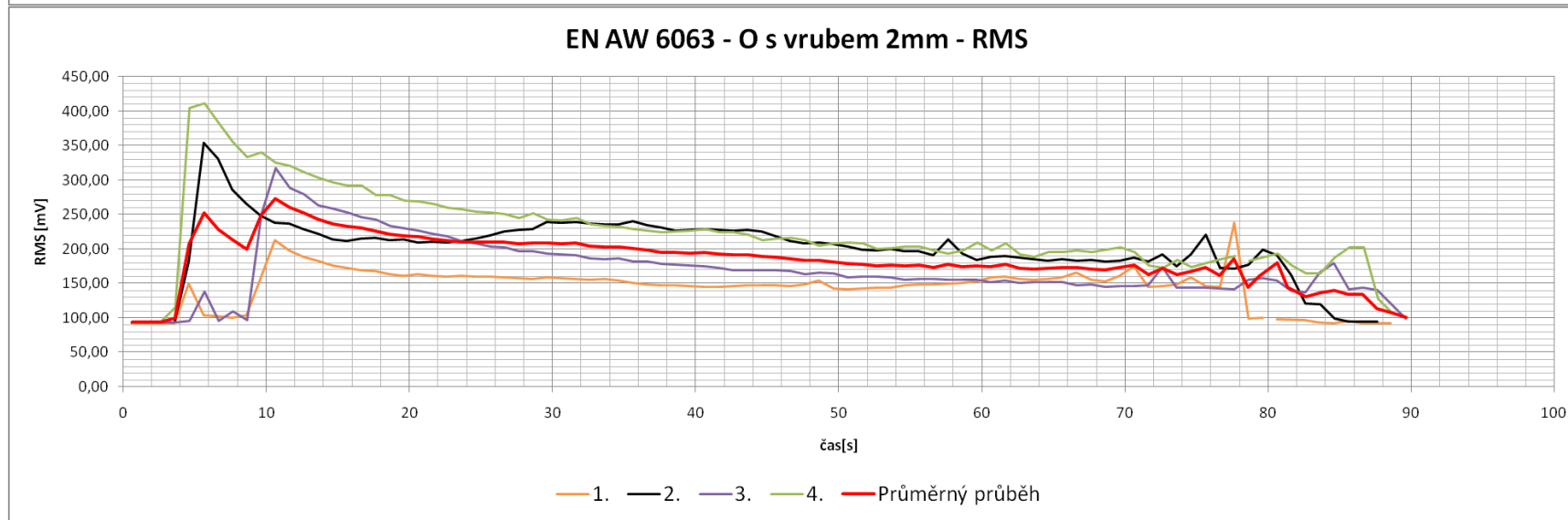
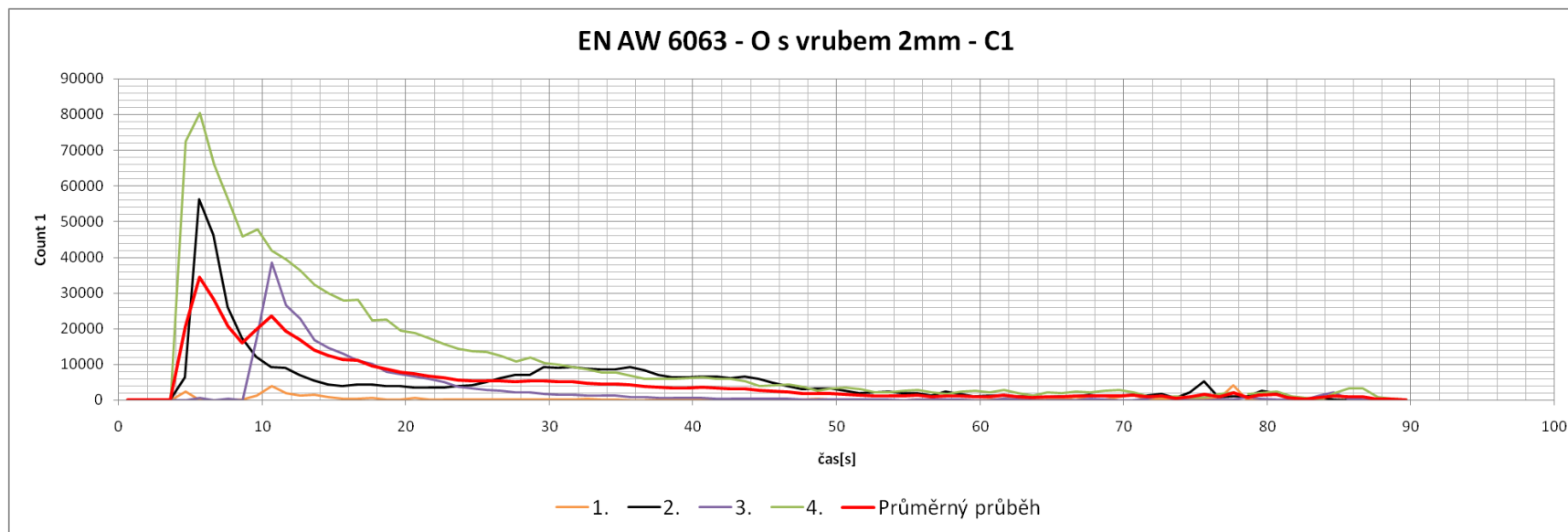
XXV.Záznam AE z tahové zkoušky materiálu GJL250 – upnutí pomocí samosvorných čelistí



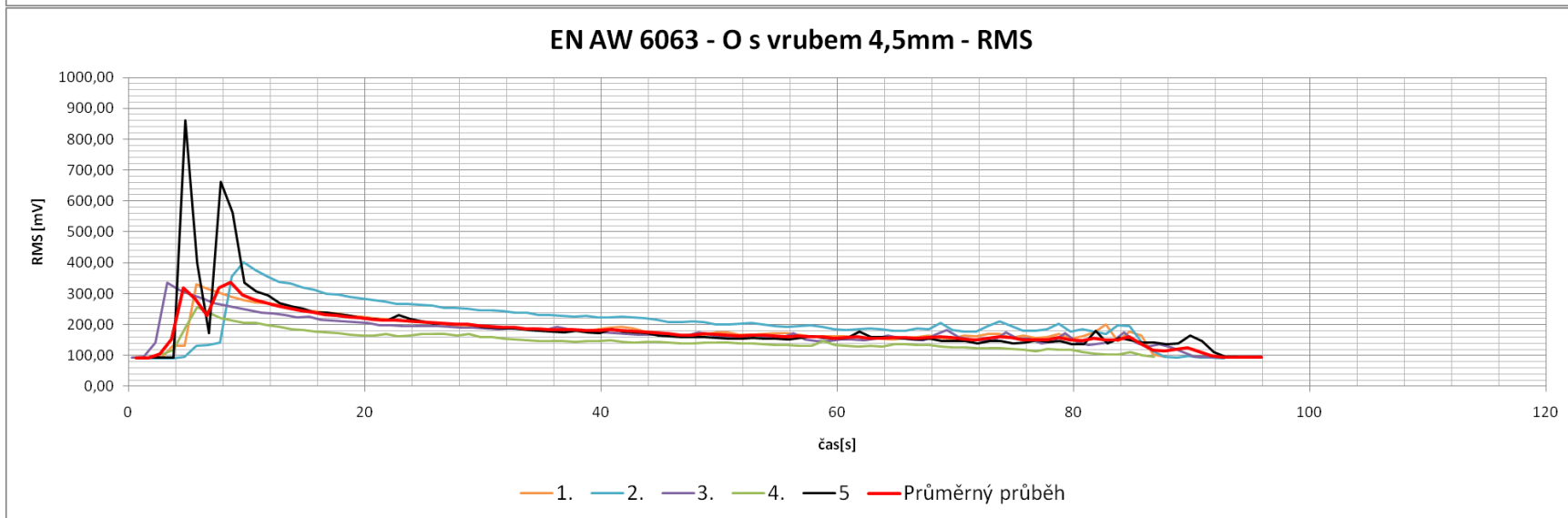
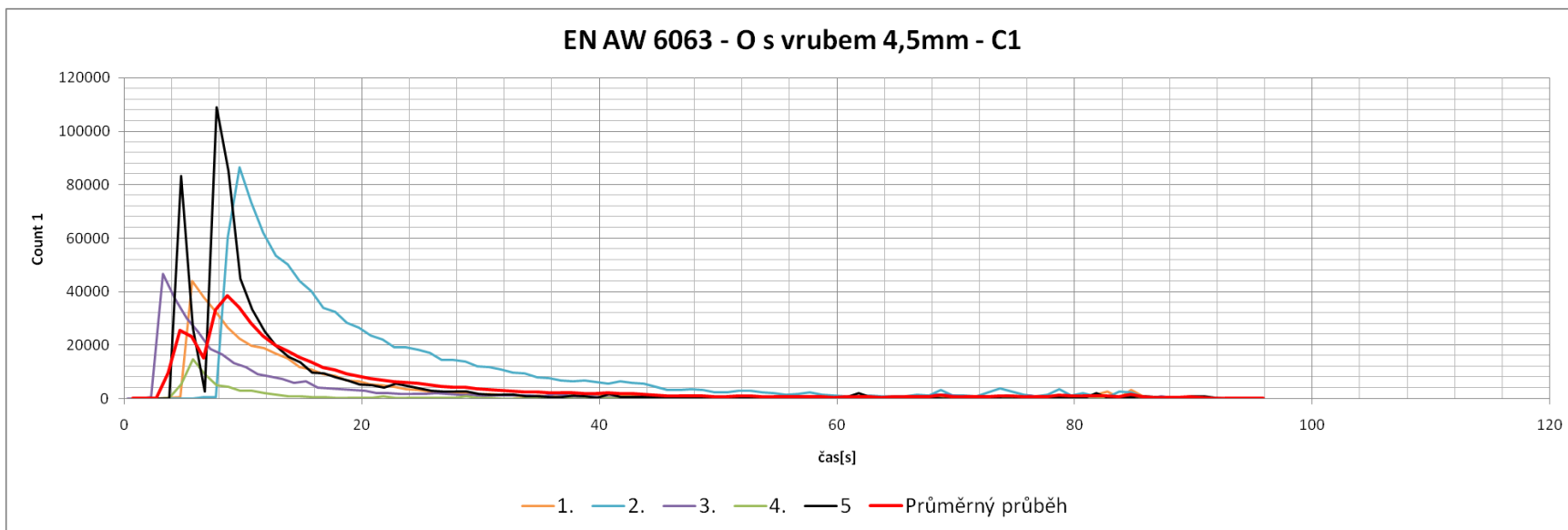
XXVI.Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – O



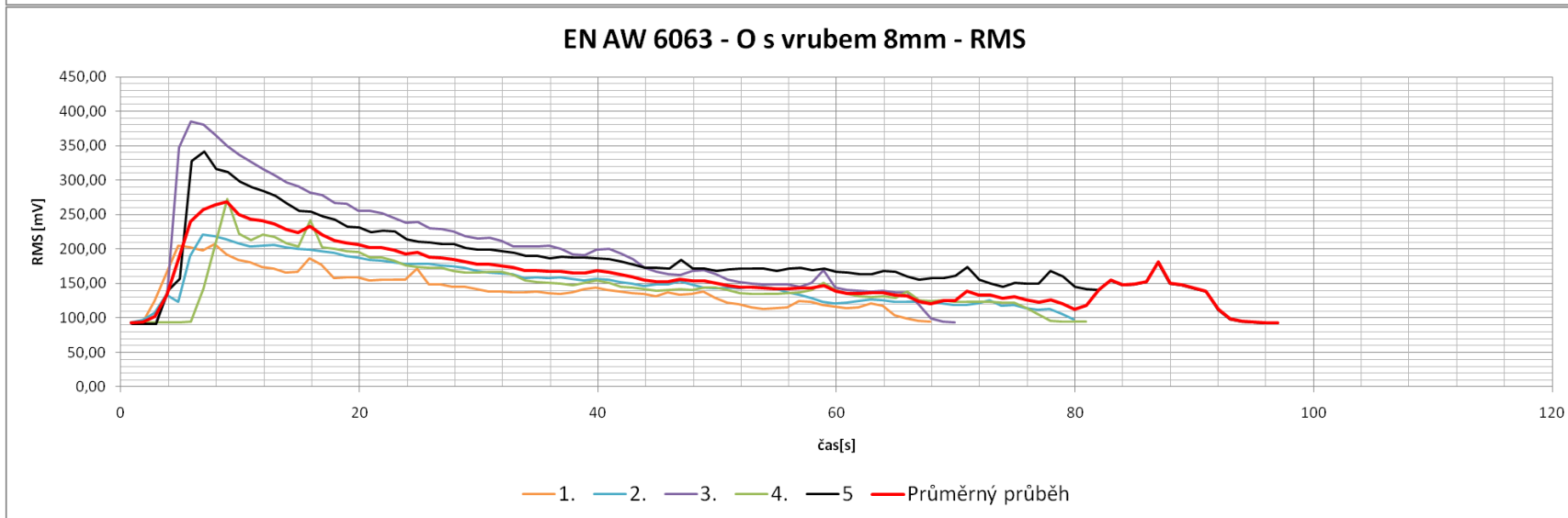
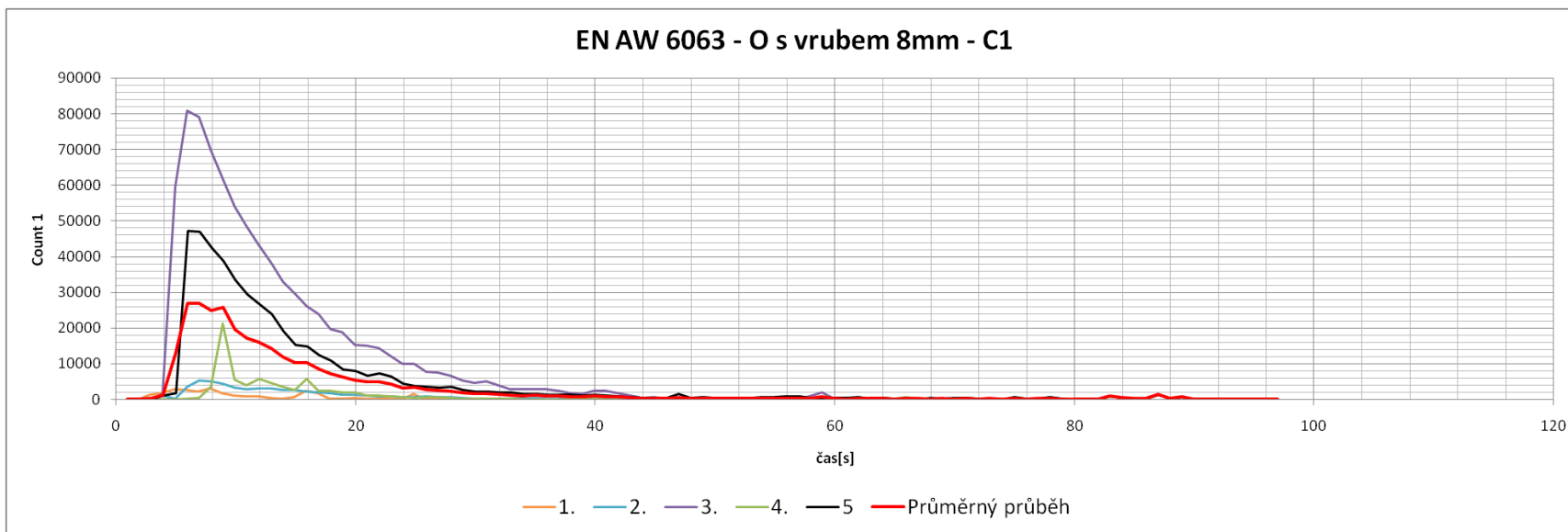
XXVII.Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – O s vrubem 2mm



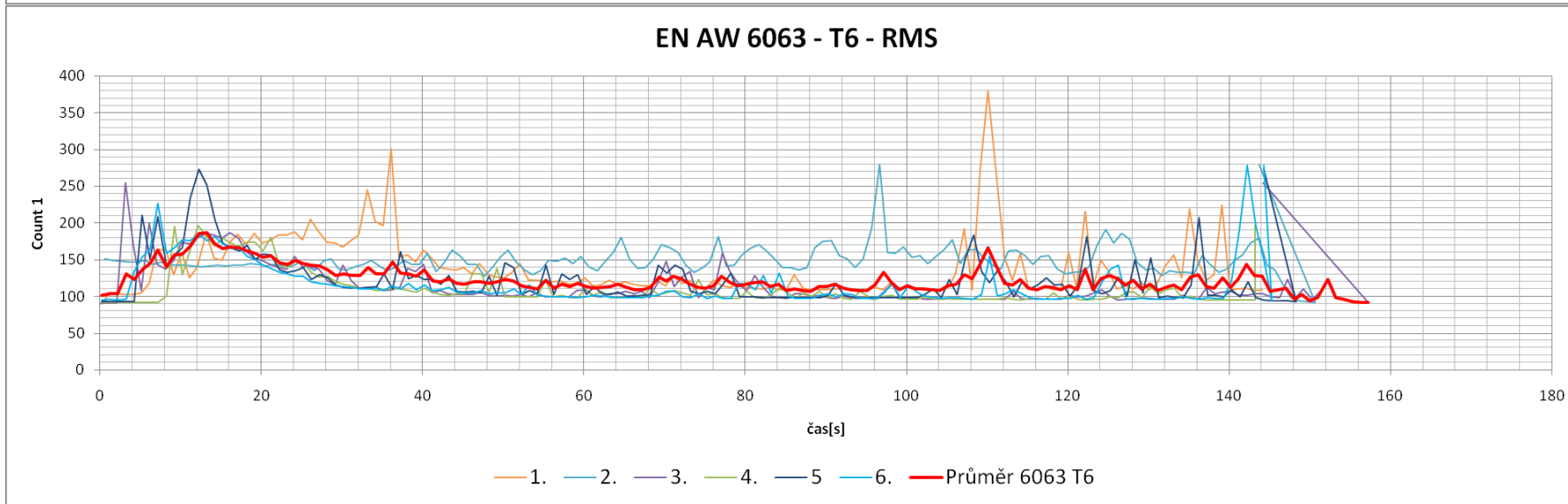
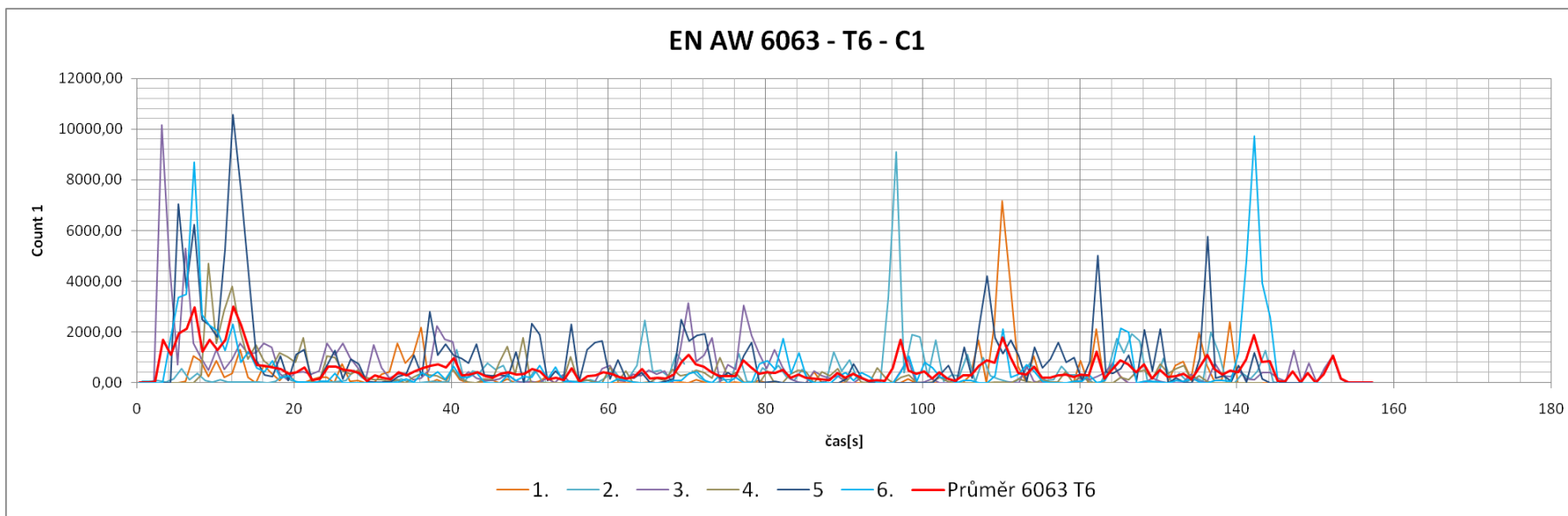
XXVIII.Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – O s vrubem 4,5mm



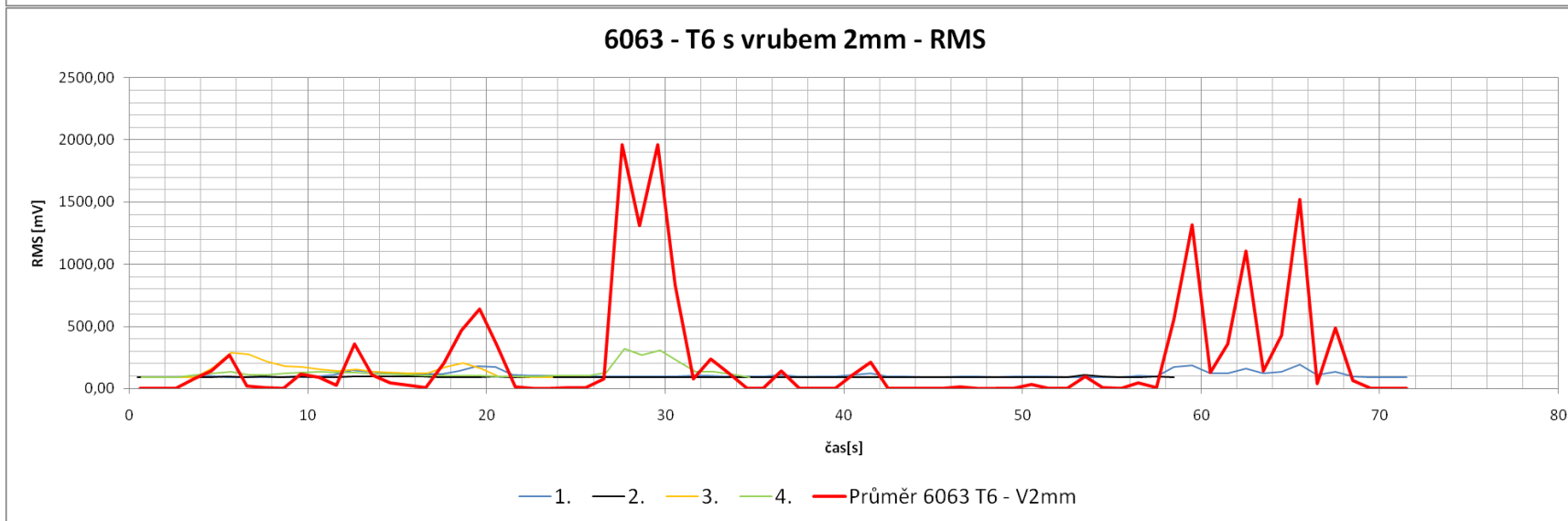
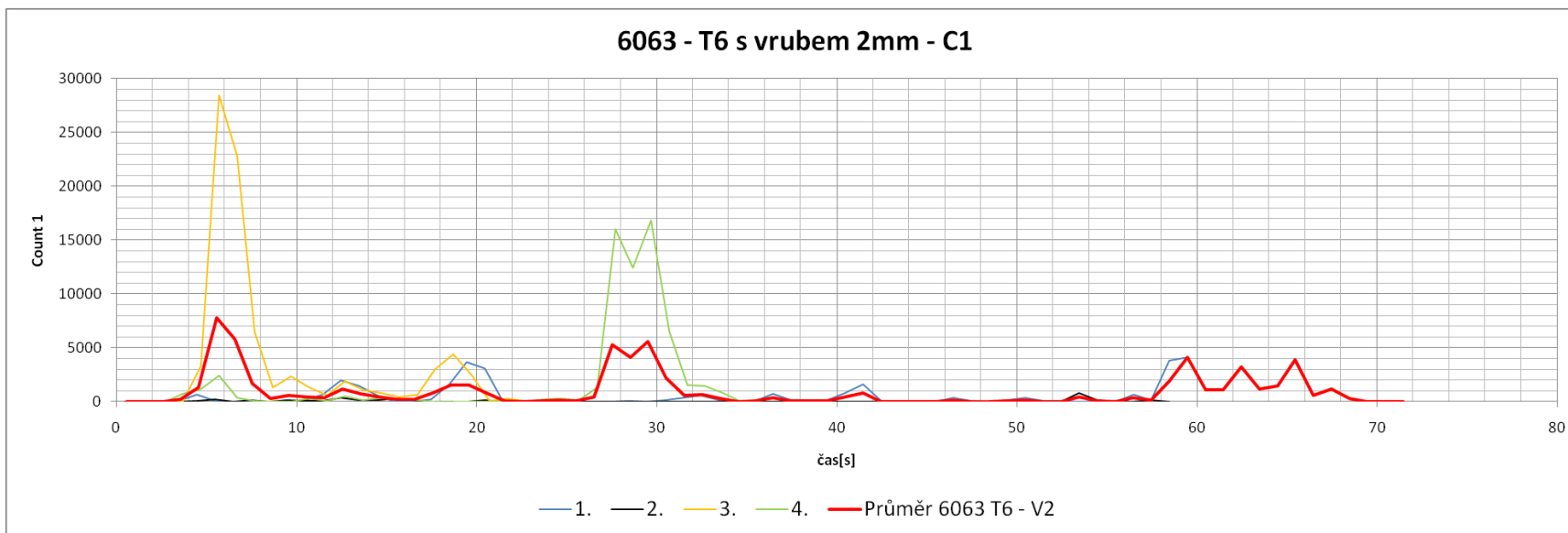
XXIX.Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – O s vrubem 8mm



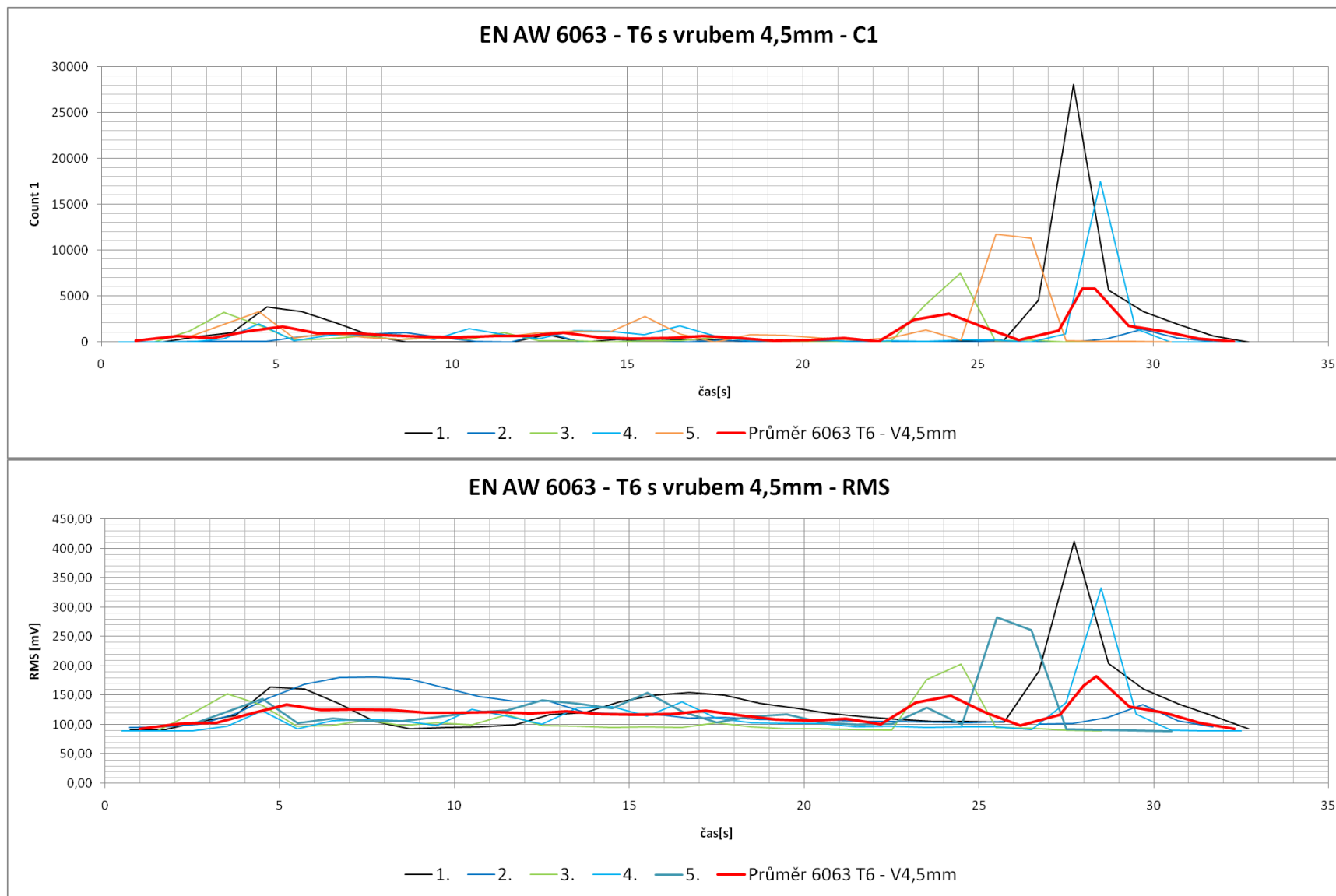
XXX.Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – T6



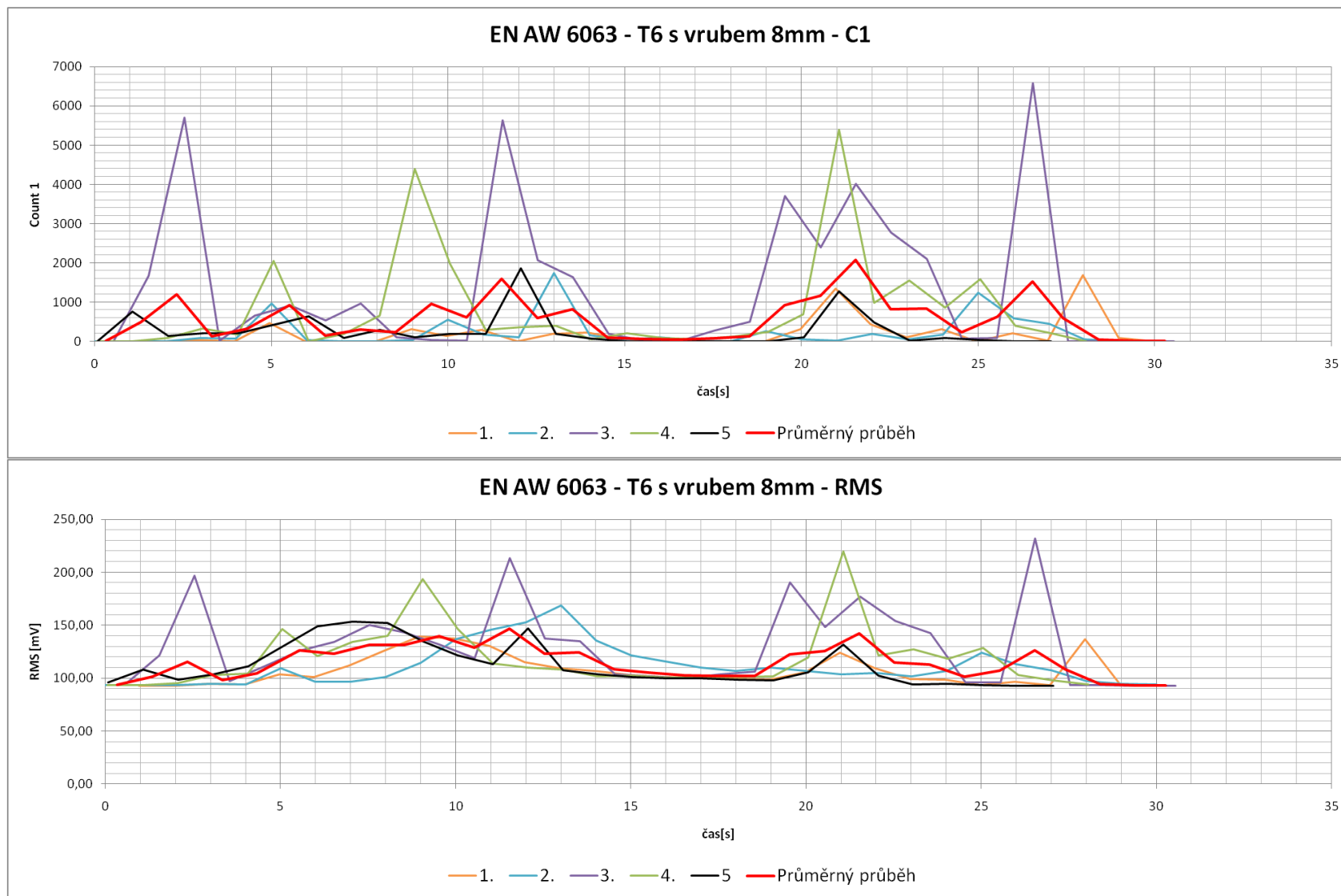
XXXI.Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – T6 s vrubem 2mm



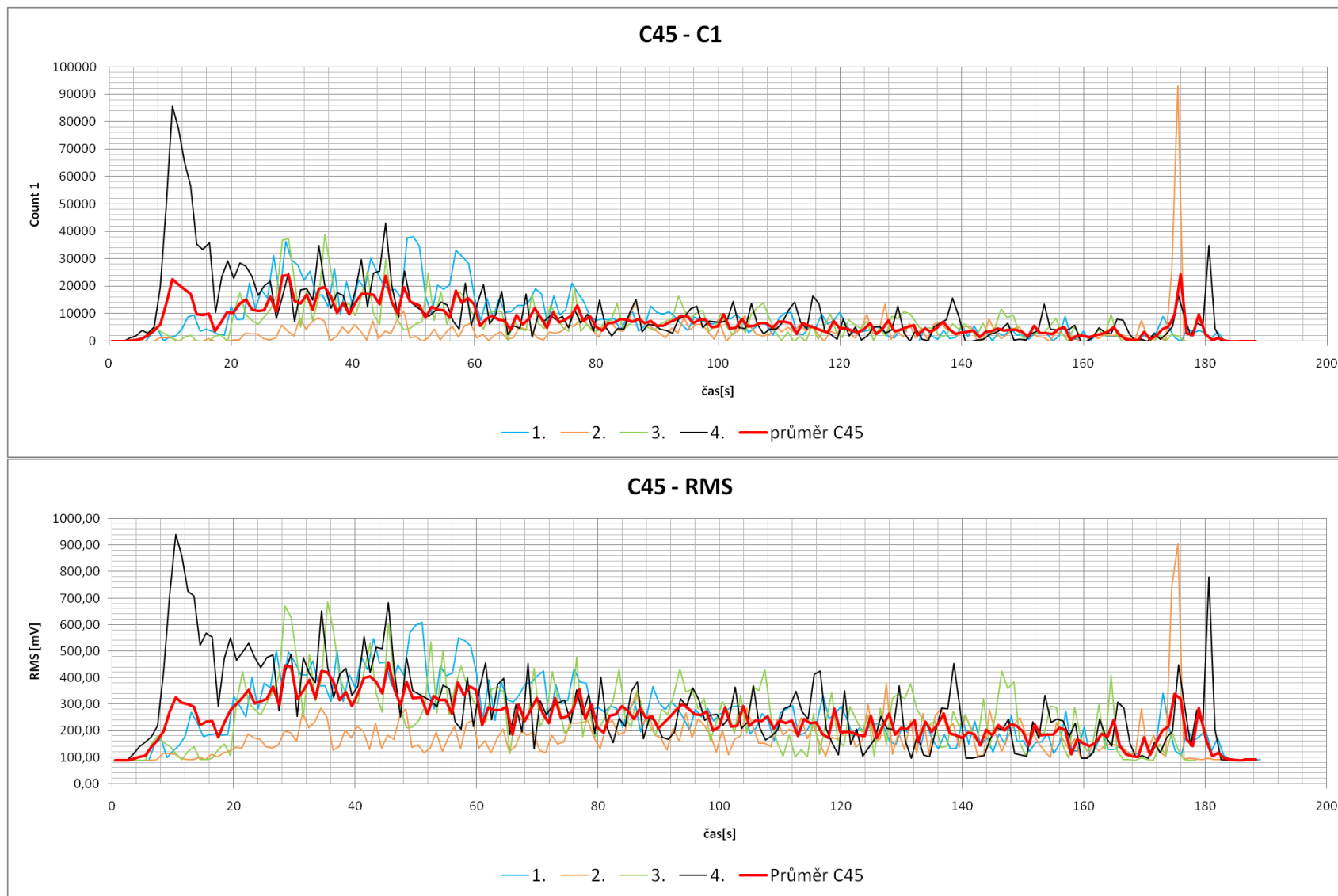
XXXII.Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – T6 s vrubem 4,5mm



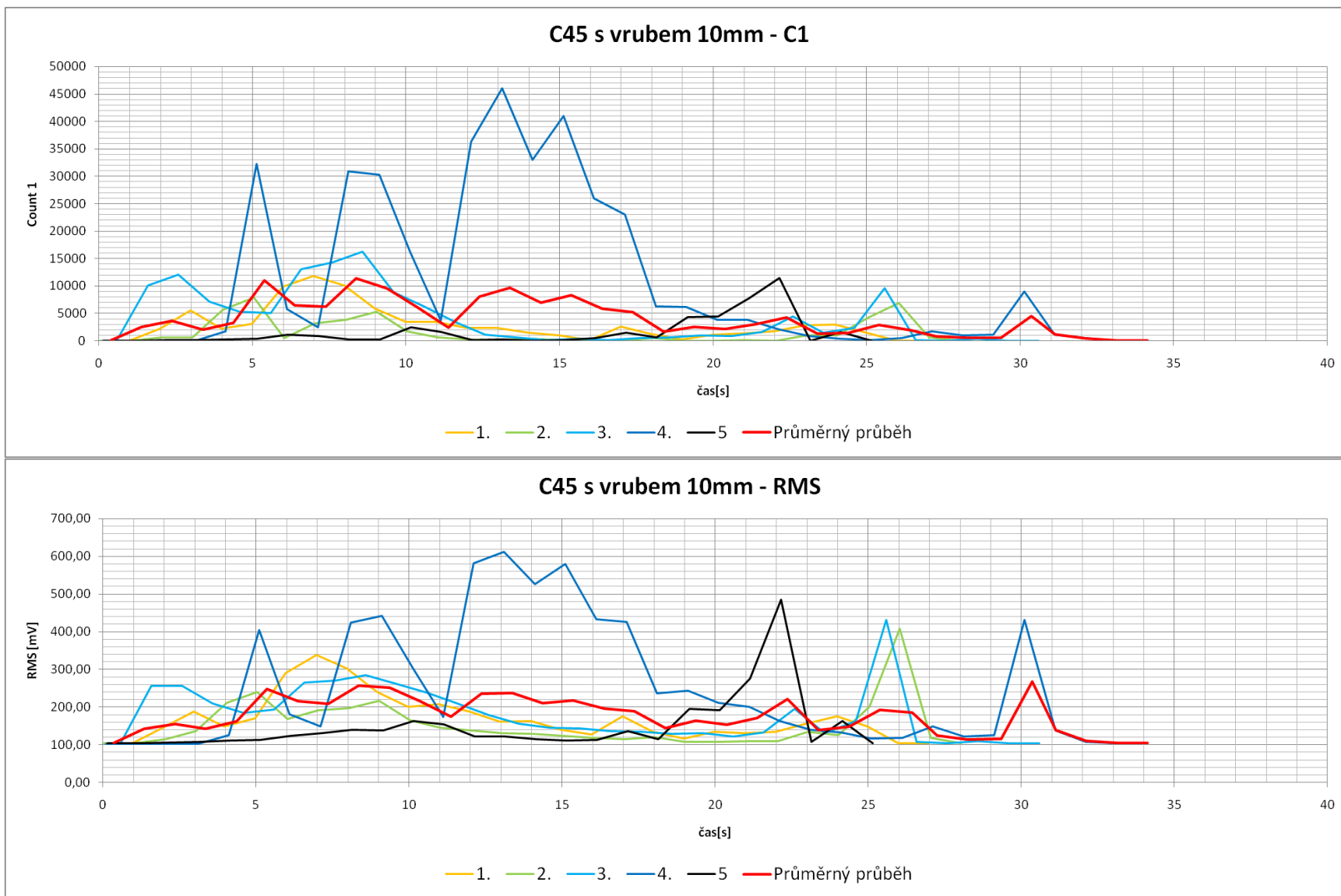
XXXIII.Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu EN AW 6063 – T6 s vrubem 8mm



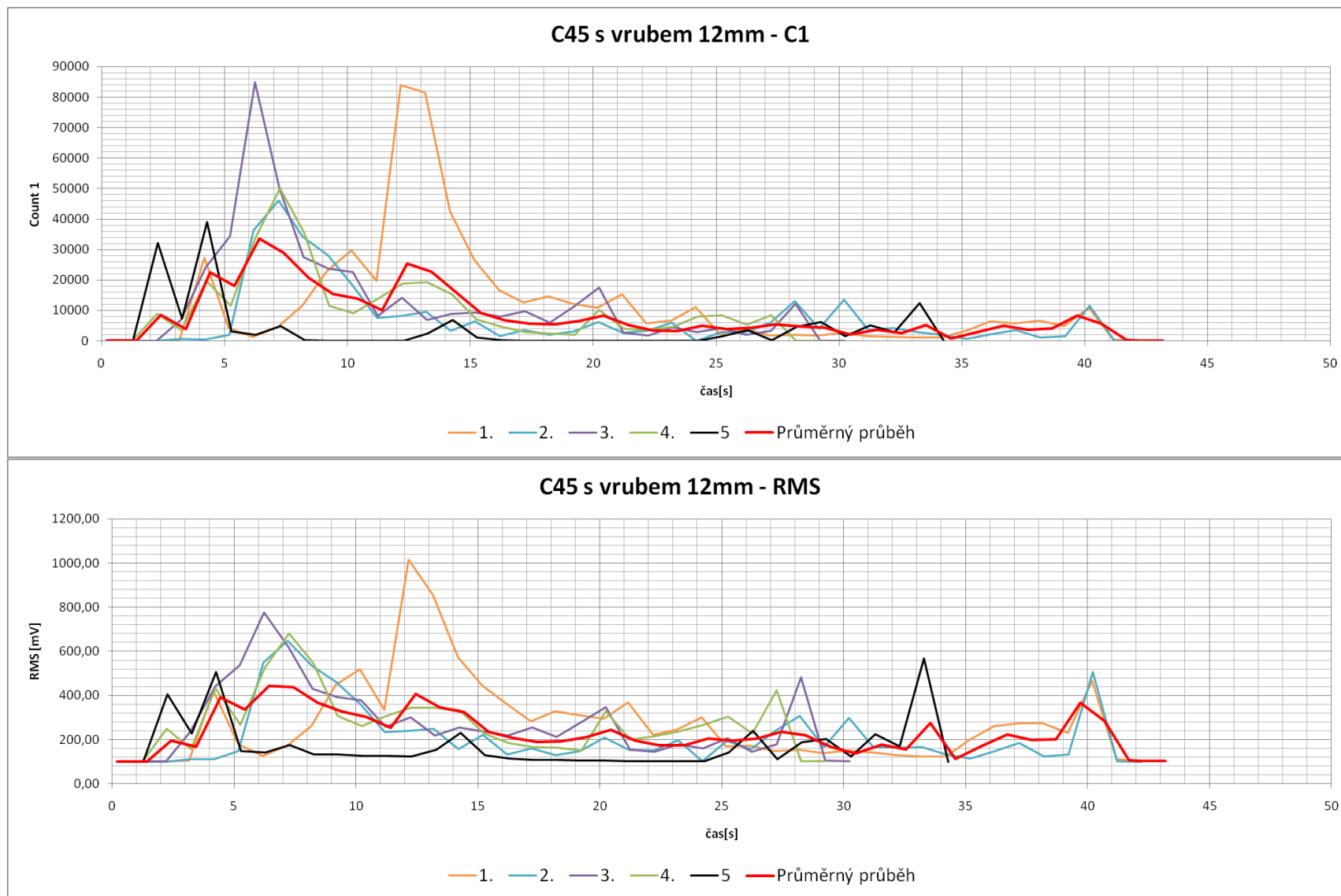
XXXIV.Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu C45



XXXV.Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu C45 s vrubem 10mm



XXXVI.Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu C45 s vrubem 12mm



XXXVII.Záznam AE z ohybové zkoušky materiálu GJL250

