

## ACOUSTIC EMISSION DURING TENSILE TESTING OF ALUMINIUM ALLOY SPECIMENS

AKUSTICKÁ EMISE PŘI ZKOUŠCE TAHEM U VZORKŮ AL SLITIN

**Lukůvka R., Filípek J., Varner D.**

Department of Engineering and Automobile Transport, Faculty of Agronomy, Mendel University in Brno, Zemědělská 1/1665, 613 00 Brno, Czech Republic

E-mail: xLukuvka@mendelu.cz

### ABSTRACT

The paper describes production, preparation and tensile testing of aluminium-based AlSi specimens. Total of 10 samples were tested with one half featuring previous exposition to intense corrosive environments. During the tensile test, loading force and acoustic emission (AE) signal were recorded. Experimental results indicate a significant influence on the corrosion degradation on the mechanical properties of the samples. Acoustic emission records show increased levels of internal damage processes in samples exposed to corrosive environments.

**Key words:** aluminium, acoustic emission, tensile test

## ÚVOD

Slévárenské slitiny hliníku typu AlSi jsou pro odlitky jedny z nejpoužívanějších. Existuje mnoho konkrétních typů, které se liší obsahem chemických prvků [1]. Dominujícím prvkem u slitin typu AlSi (siluminy) je křemík. Tento prvek dává slitině charakteristické vlastnosti. Mezi největší se řadí jednoznačně vynikající slévárenské vlastnosti, dále také mechanická pevnost materiálu a také velmi dobrá korozivzdornost. Pokud je slitina legována dalšími prvky jako Mg, je možno u odlitků používat následně tepelné zpracování, což je vytvrzování precipitací. Vliv na tento proces má obsah Mg, mezi universální slitiny z praktického hlediska patří jednoznačně typ AlSi7Mg0,3. Se vzrůstajícím obsahem křemíku u slitin AlSi však dochází k poklesu tažnosti [2]. Výrobky ze slitin s vysokým obsahem křemíku můžou překvapit křehkostí. Na výsledné mechanické vlastnosti dané slitiny má vliv i další spektrum činitelů jako například zpracování a ošetření taveniny během tavení a odlévání, celkové naplynění, rafinace taveniny, materiál licích forem, velikost odlitku, rychlost chladnutí, atd.

Akustická emise je fyzikální jev, při kterém plastickou deformačí kovů doprovází akustické popraskávání či akustický šum emitovaný uvnitř materiálu. Dle názvosloví normy CSN EN 1330-9 akustickou emisí nazýváme elastické napět'ové vlny generované dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř materiálu nebo procesem působícím vznik elastických napět'ových vln na povrchu tělesa. Metodou akustické emise pak nazýváme metodu detekce akustické emise, následně elektronické zpracování detekovaného signálu akustické emise a konečně též vyhodnocení parametrů detekovaného signálu akustické emise. První systematické práce jsou datovány do 50. let 20. století. Celý proces vzniku a detekce akustické emise zahrnuje několik fází: událost zdroje akustické emise, šíření napět'ových vln od zdroje ke snímači, detekce napět'ových vln snímačem a převod na elektrický signál a konečně vyhodnocení výsledného elektrického signálu akustické emise měřicím systémem [3].

V technické diagnostice je metoda akustické emise používána především při diagnostice rotačních objektů (tření a kavitace u ložisek, převodovek aj.), při detekci a lokalizaci vznikajících mikrotrhlin a jejich šíření, rozevírání a svírání ve stěnách tlakových nádob a potrubních systémů, u leteckých konstrukcí, mostů apod. Metoda akustické emise se také využívá při únavových materiálových zkouškách nebo destrukčních testech. Výhodou akustické emise oproti jiným defektoskopickým metodám je kontinuální monitorování objektu a úspora času v porovnání s postupným testováním jinými metodami. Nevýhodou této metody je, že příčinu vzniku akustické vlny přesně neznáme, neboť uvolněná energie je ovlivňována řadou faktorů jako je tvar a povrch tělesa, přenosová cesta vlny daná strukturou a homogenitou materiálu apod. [4][7].

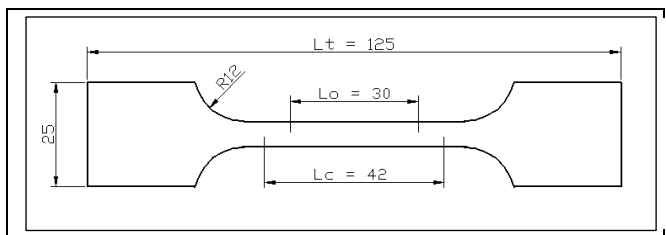
## MATERIÁL A METODY

Pro zkušební soubor vzorků trhacích tyčí byl navrhnout tvar a rozměr dle aktuální normy [5], která určuje podmínky a rozměry zkušebních těles pro zkoušku tahem. Tyče mají plochý průřez o počátečním rozměru 6x5 mm, viz nákres na obrázku č. 1. Materiál pro výrobu byla slitina na bázi AlSi o obsahu křemíku do 10 %. Jsou odlévané metodou vytavitelného modelu do keramické skořepiny. Testovací soubor vzorků pro ověření rozměrů, měřící charakteristiky a vyzkoušení vybrané metodiky byl vyroben na základě strojově obrobeneho modelu, z něhož byla vyrobena duplikační forma pro výrobu voskových modelů. Materiál formy je použit běžně dostupný kaučuk Lukopren N1522 [6]. Forma s předlohou a hotovým voskovým modelem je zobrazena na obrázku č. 2. Skořepina byla vyráběna konvenčně, obalovací břečka na vodní bázi, ostřívo v břečce mletý křemen, celkem aplikováno 5 vrstev, schnutí vždy 24 hodin mezi další aplikací. Po vytavení vosku žháná v peci na cca. 750-800 °C, při lité teplota skořepiny cca 550-600 °C. Tavenina byla ošetřena během tavby rafinační solí, po navázání strusky a její extrakci byla před litím odplyněna probubláváním dusíku. Lící teplota cca 740-750 °C. Tavenina nebyla modifikována, ani očkována.

Výsledné odlitky po odstranění keramiky viz obrázek č. 3. Je na místě zdůraznit, že odlitky mají kvalitní povrch, drsnost povrchu je velmi nízká, což potvrzuje všeobecný fakt, že při použití přijatelné kvalitních surovin a dodržení postupu výroby skořepiny dosahuje lití na vytavitelný model velmi kvalitních povrchů. Zkušební tyče nebyly nijak opracovány, pouze byly odřezány z licího stromečku. Při výběru tvaru byl upřednostněn plochý tvar, zejména pro snadnější uchycení snímače akustické emise (AE) a následně spolehlivému kontaktu mezi snímačem a zkušebním vzorkem. Ze souboru bylo vybráno 5 ks vzorků, které byly podrobeny působení korozního prostředí, viz tabulka č. 1. Jako etalon bylo 5 ks vzorků ponecháno vlivu okolní – běžné atmosféry při pokojové teplotě. Teplota v korozní komoře se pohybuje na hodnotě cca. 35 °C. Zkušební tyče byly namáhány tahem na zkušebním stroji, viz obrázek č. 4. Pro každé měření na vzorek byl uchycen piezoelektrický snímač akustické emise, viz obrázek č. 5.

Tab. 1 - Charakteristika a parametry vzorků

Vzorek	Typ prostředí	Doba působení [dny]
1	běžná atmosféra	90
2	běžná atmosféra	90
3	běžná atmosféra	90
4	běžná atmosféra	90
5	běžná atmosféra	90
06k	solná mlha	90
07k	solná mlha	90
08k	solná mlha	90
09k	solná mlha	90
10k	solná mlha	90

*Obr. 1 - Nákres s rozměry zkušební tyče*

Obr. 2 - Forma pro výrobu voskových modelů, mateřský model a hotový voskový model (foto R. Lukůvka)

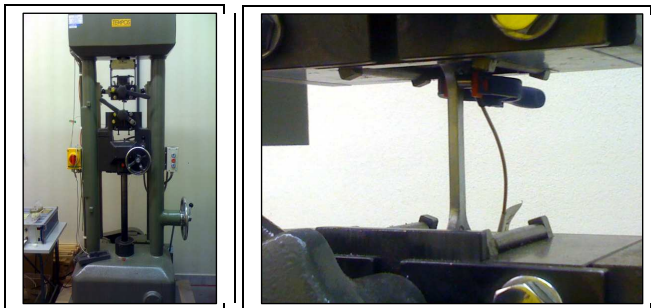


Obr. 3 - Hotové zkušební lité tyče ze slitiny AlSi (foto R. Lukůvka)



Obr. 4 – Zkušební stroj ZDM 5/51 pro namáhání tahem (vlevo, foto D. Varner)

Obr. 5 - Uchycení snímače AE během zkoušky tahem (vpravo, foto D. Varner)



Signály akustické emise byly při tahové zkoušce snímány jedním piezoelektrickým snímačem Dakel fixovaným v horní části vzorků pomocí svorky s pružinou. Kontaktní plocha snímače byla lehce potřena silikonovou pastou. U korodovaných vzorků byla v místě uchycení snímače brusným papírem odstraněna zoxidovaná vrstva. Měření akustické emise bylo provedeno pomocí aparatury Dakel XEDO. Konfigurace měřicí aparatury je uvedena v tabulce č. 2.

Tab. 2 - Konfigurace měřicí aparatury XEDO

Parametr AE	Hodnota
Vzorkovací frekvence	2 MHz
Zisk (aparatura)	30 dB
Zisk (předzesilovač)	0 dB
Rozsah hodnot	$\pm 2000$ mV

Bylo sledováno RMS signálu akustické emise (z anglického Root Mean Square). Tento parametr označuje tzv. efektivní hodnotu signálu. U střídavého napětí je RMS rovno hodnotě stejnosměrného napětí, které by při přiložení na odporovou zátěž dávalo stejný průměrný výkon. Jednotkou RMS je mV. Tato hodnota odpovídá o kvantitativní charakteristice naměřených událostí akustické emise (množství energie).

## VÝSLEDKY A DISKUZE

Pokud porovnáme oba soubory z pohledu provedeného namáhání tahem, zjistíme, že se výsledky liší. V grafu č. 1 jsou uvedeny hodnoty z průběhu měření pevnosti u nekorodovaných vzorků. Z průběhu jednotlivých křivek lze usuzovat, že jde celkově o materiál s nižší tažností. V grafech se nalézá náznak meze kluzu  $R_e$ , v rozmezí zatížení 1,2-1,3 kN, což odpovídá napětí v tahu přibližně 43 MPa. Tento pokles je relativně pravidelný u všech vzorků a vyskytuje se v určitém rozmezí síly.

Proto bylo usouzeno, že se nejedná o mechanický vliv přístroje, např. zploštění konců tyčí v čelistech během nárůstu zatěžovací síly, atp. Konce tyčí vykazují relativně slabý otisk samosvorných čelistí. Křivky mají poměrně strmou charakteristiku a nevykazují typický znak pro měkký materiál. Maximální dosažené síly pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tabulce č. 3.

Co se týká vzorků podrobených korozi, data jsou zpracována a vynesena do grafu č. 2. Maximální dosažené síly jsou opět v tabulce č. 3. Pokud srovnáme grafy s hodnotami ze zkoušky nekorodovaných a korodovaných vzorků, je patrné, že je mezi nimi patrný rozdíl.

V grafu. č. 3 lze vidět celkové dosažené síly pro jednotlivé skupiny vzorků. Jsou vyneseny v podobě jednotlivých bodů. Oblasti maximálních sil jsou zvýrazněny. U vzorků podrobených koroznímu prostředí jsou dosaženy menší maximální síly a oblast vrcholů je posunuta na ose vlevo. Což by mohlo pravděpodobně indikovat, že koroze ovlivnila mechanické vlastnosti materiálů.

Pokud se zaměříme na průměrné hodnoty nárůstu síly během zatěžování v grafu č. 4, zjistíme, že korodované vzorky vykazují strmější nárůst síly již krátce po začátku zatěžování. Průměrná maximální síla, čili mez pevnosti materiálu  $R_m$  při porušení nekorodovaných vzorků osciluje na hodnotě 5166,31 N, což odpovídá napětí v tahu 172,2 MPa. Kdežto u korozi degradovaných vzorků dosahuje průměrná síla hodnoty 4614,54 N, což odpovídá napětí v tahu 153,8 MPa.

Další grafy ukazují výsledky měření akustické emise u nekorodovaných a korodovaných vzorků, průměrné křivky u obou sad jsou přehledně uvedeny v grafu č. 7. Pilotní experiment jednoznačně prokázal, že navržená metodika měření nevykazuje závažné nedostatky a je použitelná pro pozdější výzkum zahrnující větší soubor namáhaných vzorků. Snímač AE byl fixován jednoduchým a přitom účinným způsobem. Konfigurace měřicího řetězce byla zvolena správně s ohledem na očekávanou charakteristiku signálu AE. Byly eliminovány možné vlivy externích zdrojů AE (zatěžovací stroj, uchycení vzorků). U všech vzorků byl spolehlivě zachycen signál AE vyvolaný porušováním namáhaných vzorků.

Na prvním místě je jistě třeba pochopit vliv korozivního procesu na samotný jev vzniku akustické emise a jeho měření. Jelikož můžeme předpokládat, že degradační procesy v solné komoře působily především na povrchu sledovaných vzorků (do určité hloubky), jsou výraznější změny ve vnitřním uspořádání struktury vzorků nepravděpodobné. Skutečné vnitřní zdroje akustické emise tedy lze považovat za identické v obou sadách vzorků. Rozdíly v povaze signálů AE je možné vyvodit z odlišných podmínek na trase emitované vlny k povrchu materiálu a při jejím pohybu ve formě povrchové vlny směrem ke snímači. Zde by se již mohl uplatnit vliv degradované vrstvy.

To, že bezprostřední okolí snímače bylo ošetřeno broušením a „zbaveno“ korodované vrstvy, nemá pravděpodobně na mechanismus propagace vln uvnitř a na povrchu vzorku větší význam.

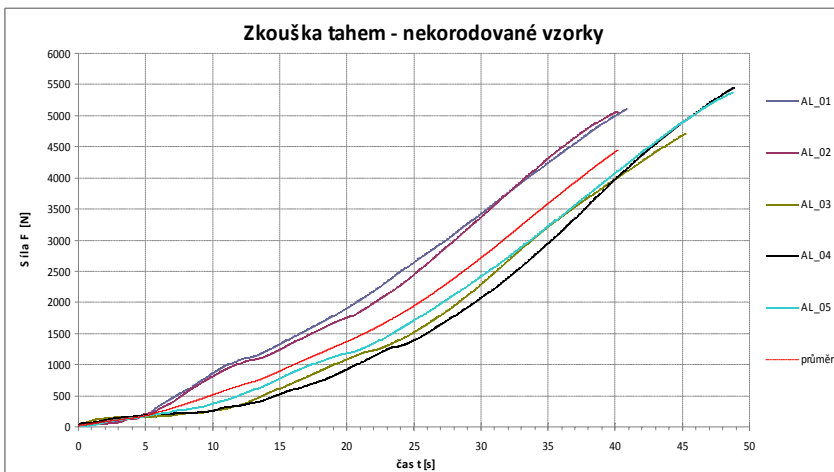
Předběžné výsledky naznačují (viz grafy č. 5, 6 a 7) rozdílné chování nekorodovaných a korodovaných vzorků. Na všech grafech je dobře viditelný extrém na začátku záznamu, který představuje pravděpodobně jediný parazitický signál během měření a odpovídá impulzu sepnutí pohonu zkušebního stroje. Je zřejmé, že selhání korodovaných vzorků provázela slabší emisní

aktivita zdrojů AE a současně došlo k selhání vzorků v kratším časovém úseku. Tato situace je dobře dokumentována v grafu č. 7, kde finální nárůst RMS signálu akustické emise nastal dříve a k selhání vzorků došlo za podstatně slabší úrovně RMS. Selhání vzorku odpovídá ukončení křivky RMS, které indikuje zastavení měřicího stroje při dosažení maximální zatěžovací síly. Na druhé straně vzorky nekorodované selhaly později a za mnohem vyšších hodnot RMS signálu AE.

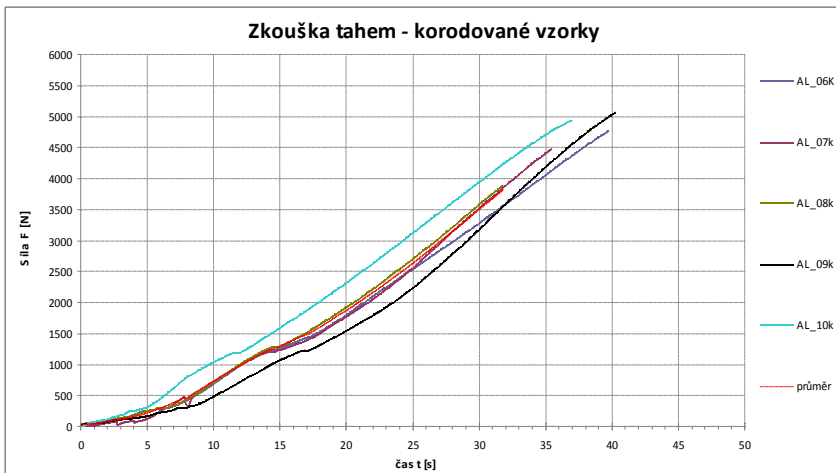
Dalším jevem, který si jistě zaslouží pozornost při dalším pokračování tohoto zajímavého experimentu, je vlastní průběh RMS během zkoušky tahem. Na několika místech totiž dochází k lokálnímu snížení úrovně RMS, které indikuje změnu v jinak globálně stoupajícím trendu aktivity AE. Je možné, že v těchto okamžicích docházelo v namáhaném materiálu ke změně fyzikálních vlastností (zpevňování, změny krystalografického charakteru, variabilní rychlost posunu kluzných pásů apod.), které by žádnou jinou metodou nebyly zjistitelné.

Jako u řady jiných aplikací metody akustické emise platí tedy i zde, že nedestruktivní měření akustické emise poskytuje neocenitelné informace o dějích uvnitř zkoumaného materiálu a zároveň staví před řešitele nelehký úkol interpretace těchto ne vždy zcela jasných indicií.

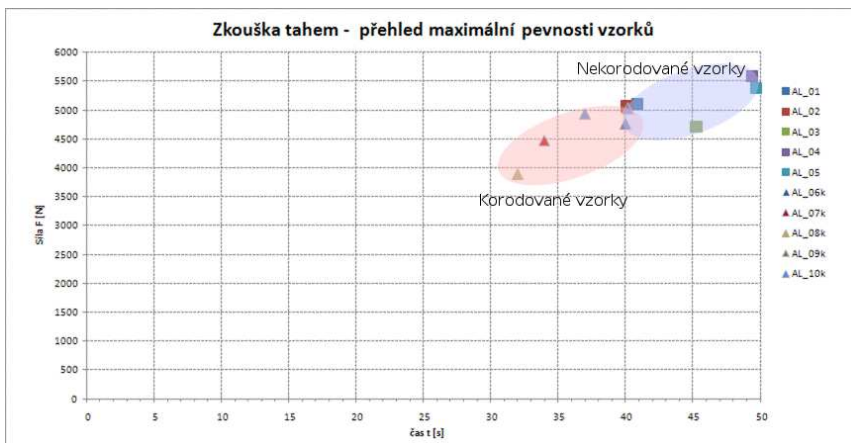
Graf. 1: Výsledky zkoušky tahem - nekorodované vzorky



Graf. 2: Výsledky zkoušky tahem - korodované vzorky

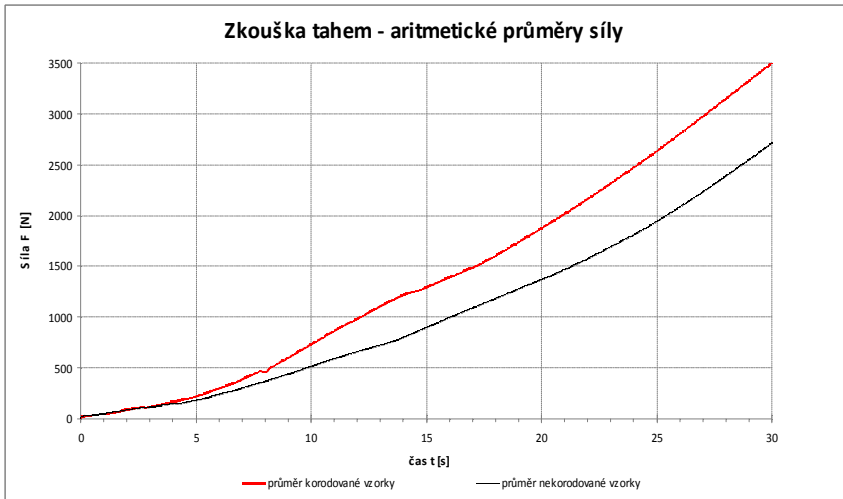


Graf. 3: Výsledky zkoušky tahem - přehled maximální pevnosti vzorků

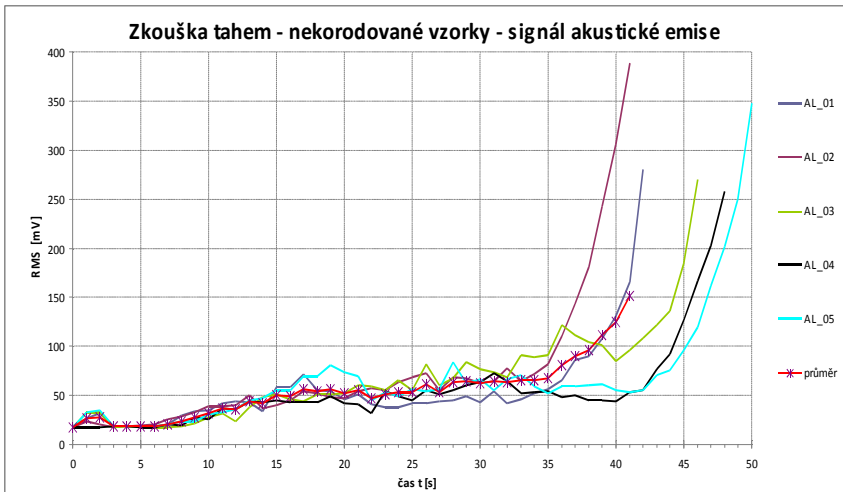




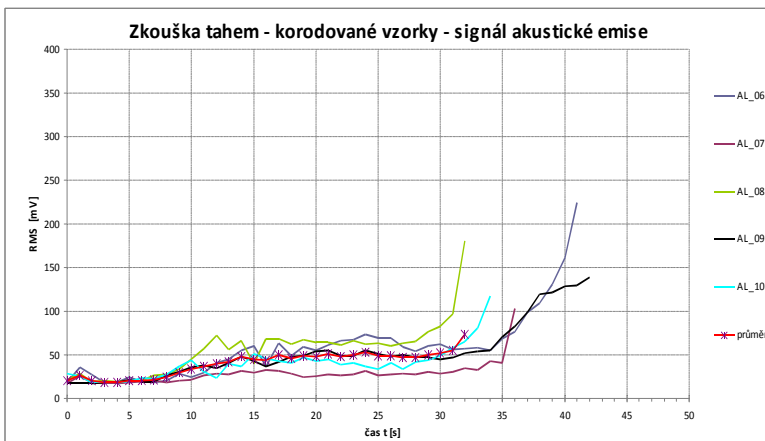
Graf. 4: Výsledky zkoušky tahem - průměrné síly



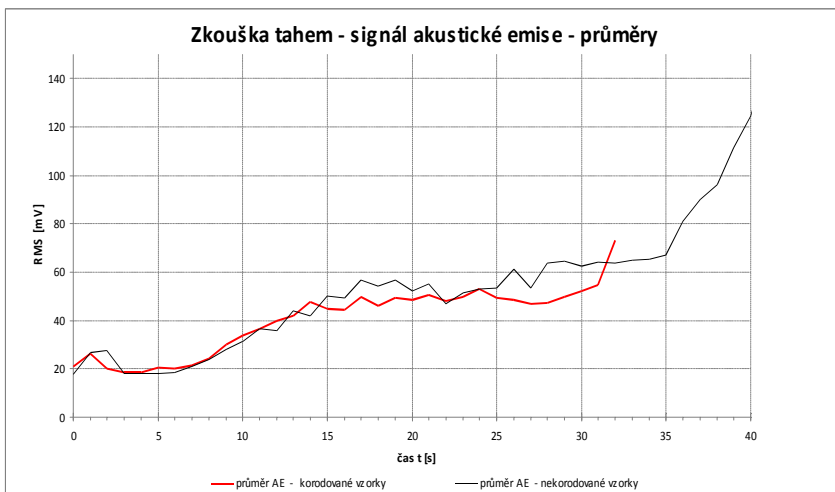
Graf. 5: Výsledky zkoušky tahem - akustická emise, nekorodované vzorky



Graf. 6: Výsledky zkoušky tahem - akustická emise, korodované vzorky



Graf. 7: Výsledky zkoušky tahem - akustická emise, průměry hodnot



Tab. 3 - Výsledky zkoušky tahem – dosažená maximální síla

Vzorek	maximální dosažená síla [N]	Typ prostředí	Doba působení [dny]
<b>1</b>	5103,1	běžná atmosféra	90
<b>2</b>	5061,2	běžná atmosféra	90
<b>3</b>	4708,35	běžná atmosféra	90
<b>4</b>	5586,3	běžná atmosféra	90
<b>5</b>	5372,6	běžná atmosféra	90
<b>06k</b>	4761,7	solná mlha	90
<b>07k</b>	4468,1	solná mlha	90
<b>08k</b>	3883,7	solná mlha	90
<b>09k</b>	5023,75	solná mlha	90
<b>10k</b>	4935,45	solná mlha	90

## ZÁVĚR

Z pilotního experimentu vyplývá řada nových poznatků. Bylo zjištěno, že tvar vzorků vyhovuje jak po stránce maximální síly, se kterou bylo při návrhu kalkulováno, aby nebyl stroj zbytečně namáhán, tak po stránce uchycení snímače AE a jejího následného měření.

Vzorky během namáhání vykazují zřejmé odchylky hodnot, pro potřeby zjištění statistické průkaznosti by bylo potřeba počet navýšit aspoň na dvojnásobek. Rozměrová přesnost odliťků získaných poměrně snadným způsobem byla vyhodnocena jako přijatelná. Tento parametr je velmi důležitý, protože každá změna průřezu vzorku před zahájením namáhání ovlivní negativně celkový výsledek.

Na výsledné hodnoty pevnosti materiálu mají vliv i další faktory. V odliťku se může vyskytnout naplynění, při špatné rafinaci taveniny se můžou vyskytnout vměstky, atp. Všechny tyto vlivy mají dopad na výsledné hodnoty a jsou krajně nežádané u jakéhokoliv odliťku, dvojnásob platí u vysoce namáhaných odliťků. Z výsledků vyplynulo, že koroze má do jisté míry přímý vliv na mechanické vlastnosti materiálu.

Měření akustické emise prokázalo použitelnost navržené metodiky a poskytlo zajímavý náhled na chování zdrojů AE uvnitř materiálu během zkoušky tahem. Je zřejmé, že degradace povrchu vzorků v solné komoře neovlivnila samotné zdroje akustické emise uvnitř vzorku, ale modifikovala mechanismus propagace vln během porušování. Z tohoto předpokladu bude vycházet i další použití této moderní nedestruktivní diagnostické metody v průběhu navazujícího výzkumu vlastností slévarenských slitin hliníku typu AlSi.

## PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují společnosti Dakel ZD Rpety za podporu při instrumentaci měření akustické emise.

## LITERATURA

- [1]VOJTĚCH, D. Kovové materiály. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-7080-600-1.
- [2]JOSEPH R., DAVIS. Aluminum and Aluminum Alloys . Vyd. 5. J. R. Davis & Associates, ASM International. Handbook Committee. ASM International, 1993. ISBN 087170496X
- [3]KOPEC, B. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: Nauka o materiálu IV. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2008. 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [4]KREIDL, M.; ŠMÍD, R. Technická diagnostika. 1. vyd. Praha : Nakladatelství BEN - technická literatura, 2006. 406 s. ISBN 80-7300-158-6
- [5]ČSN EN ISO 6892-1, kovové materiály – zkoušení tahem. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha 2010. 64 stran.
- [6]LUKŮVKA, R. -- FILÍPEK, J. -- VOTAVA, J. Kaučukové formy při malosériové výrobě voskových modelů. In Kvalita a spolehlivost' technických systémov - Zborník vedeckých prác. ISBN 978-80-552-0595-3.
- [7]BARÁK, J.; BROUZDAL, P. Proč se to nepovedlo tak, jak jsme doufali. Plant, Soil and Environment, 2004. 40(8): 253-256.