

Závislost tvrdosti odlitků Al slitin na době stárnutí a průběhu tepelného zpracování

Jakub Kopecký

Vedoucí práce: Ing. Aleš Herman, Ph.D.

Abstrakt

Tato práce se zabývá závislostí tvrdosti odlitků z konkrétních hliníkových slitin, siluminů, na době jejich stárnutí a tepelném zpracování. Odlitky byly odlévány pomocí vysokotlakého lití do kovových forem. V práci je též ukázána a popsána mikrostruktura těchto slitin.

Klíčová slova

Siluminy, tvrdost, tepelné zpracování

1. Úvod

Hliník je po železe druhým nejčastěji odlévaným kovem. Používáme slitiny hliníku s mědí (duraly), hořčíkem (hydronaly), zinkem a křemíkem (siluminy). Slitiny, které jsme proměřovali, patří všechny právě do skupiny posledně jmenované, siluminů. U odlitků se sleduje mnoho vlastností, jako například mez pevnosti v tahu, tažnost, chemické složení a také tvrdost. Z měření provedených v této práci se pokusíme dokázat, že se u hliníkových slitin dochází v průběhu času zvýšení tvrdosti oproti tvrdosti měřené po lití.

2. Kovelis Hedvikov a.s.

Kovelis Hedvikov je největší tlaková slévárna hliníku v České republice. Odlévá ze šesti různých slitin hliníku (viz níže). Disponuje deseti tavicími pecemi, plynovými i elektrickými, šachtovými i kelímkovými, které mají celkovou tavicí kapacitu 4600kg/h. K dispozici je 25 licích strojů s uzavírací silou 250-1050t, z nichž 22 je plně automatizovaných, a jsou schopny produkovat odlitky od 10g do 8kg. Slévárna má vlastní obrobnu s CNC obráběcími centry a soustruhy, vlastní nástrojárnu a samozřejmě jsou i přístroje pro kontrolu a zajišťování kvality (spektrometr, rentgen, souřadnicový měřicí stroj atd.) [3]

3. Siluminy a jejich zpracování

3.1. Proč právě siluminy?

Siluminy jsou nejčastěji užívanou skupinou z hliníkových slitin. Je to hlavně díky přítomnosti křemíku ve slitinách, který má pozitivní účinek na mnoho slévárenských vlastností:

- zvyšuje zabíhavost slitin
- zmenšuje součinitel stahování během tuhnutí, snížení sklonu ke vzniku mikrostaženin
- snižuje se nebezpečí vzniku trhlin (za tepla) a prasklin (za studena)
- zmenšuje se tepelná roztažnost
- zvyšuje se korozní odolnost
- zužuje teplotní interval tuhnutí

Podle obsahu křemíku dělíme siluminy na:

- PODEUTEKTICKÉ s obsahem křemíku do 10% - jsou velmi dobře slévatelné, nejpočetnější skupina, z měřených slitin EN AC- AlSi9Cu3 , ADC12, EN AC- AlSi10Mg(Fe) .

- Eutektické s obsahem Si 12% mají nejvyšší mechanickou pevnost, úzký interval tuhnutí, vysokou zabíhavost, slabé tloušťky stěn, vysoká tažnost na úkor pevnosti, $AlSi12Cu1$, EN AC- $AlSi12(Fe)$.
- Nadeutektické s Si přes 12,5% jsou tvrdé, speciální, tyto slitiny měřeny nebyly.

Některé přísadové prvky ve slitinách Al-Si:

- měď - nejběžnější přísada. její obsah se pohybuje do 5%, má omezenou rozpustnost v tuhém roztoku $\alpha(Al)$, tvoří intermetalickou fázi $CuAl_2$ zvyšuje pevnost a tvrdost, ovšem na úkor tažnosti a zhoršuje korozní odolnost.
- hořčík - umožňuje provádět vytvrzování za tepla, přidává se v množství 0,3-0,7%. Protože je rozpustnost hořčíku v hliníku za vysokých teplot značně vysoká, platí, že čím vyšší obsah hořčíku, tím vyšších pevností se po vytvrzení dosahuje.
- železo - obvykle považováno za nečistotu. má neádoucí vliv na mechanické vlastnosti, při tlakovém lití snižuje lepení kovu na formu což prodlužuje životnost forem
- mangan - kompenzuje nepříznivý vliv železa [1], [2]

3.2. Tepelné zpracování slitin hliníku pro zvýšení tvrdosti

Většina hliníkových odlitků se tepelně nezpracovává. Pokud ano, obvykle se jedná o výrobky odlévaných do pískových forem, nebo o výrobky lité gravitačně do forem kovových, protože při jejich tuhnutí vzniká hrubší struktura. Při lití pod tlakem je struktura více homogenní a nedochází k výrazné změně vlastností vlivem tepelného zpracování.

Nejčastěji používané tepelné zpracování hliníkových slitin je vytvrzování. Slitiny dělíme na vytvrzitelné a nevytvrzitelné. Aby byla slitina vytvrzitelná, je nutné, aby byl ve slitině přítomen prvek, jehož rozpustnost v tuhém roztoku Al se velmi výrazně mění se změnou teploty. Hlavními prvky zajišťujícími vytvrzitelnost jsou Cu a Mg, lze využít i Ni nebo Zn.

Vytvrzování se sestává ze tří kroků:

1. Rozpouštěcí žíhání – při teplotách nad křivkou rozpustnosti, rozpouštění intermetalických fází, získáváme homogenní tuhý roztok αAl ,
2. Rychlé ochlazení – cílem zamezit vyloučení intermetalické fáze z přesyceného roztoku, je velmi rychlé, vznikne tuhý přesycený roztok αAl a
3. Precipitační vytvrzování – dochází k rozpadu přesyceného roztoku, vzniká precipitát a zpevňuje se struktura. Může probíhat buď za tepla nebo za studena

Při vytvrzování za tepla je nezbytné přítomnost Mg v mezích 0,3-0,45%, ve vysokopevných slitinách je jej až 0,7%. Probíhá při teplotách 140-180°C (některé slitiny přes 200°C) po dobu 3-8 hodin. Při zvýšení teploty je nutné zkrátit dobu. Ovšem tato kompenzace je možná pouze do určité míry. Vytvrzování za studena podmiňuje především přítomnost Cu a Zn. Tato schopnost je navíc podpořena rostoucím podílem Mg. Konečných vlastností výrobek dosahuje po 100-150 hodinách – měření mechanických vlastností a obrábění až po uplynutí této doby.

Dalším možným tepelným zpracováním hliníku je žíhání. Na hliník a jeho slitiny je možné aplikovat následující typy žíhání:

- rekrystalizační žíhání - za studena tvářený kov, rozmezí 250 - 500°C
- žíhání na odstranění vnitřního pnutí - tepelné zpracování pod rekrystalizační teplotou, obvykle v rozmezí 300 - 400°C. Nutné je řízené ochlazování do teploty alespoň 200°C. Může dojít k poklesu pevnostních charakteristik.
- stabilizačního žíhání- stabilizace rozměrů výrobku, struktury, fyzikálních, chemických vlastností, pokud bude odlitek vystaven vysokým teplotám či jejich kolísání. Obvykle 240-350°C
- homogenizační žíhání - pokud potřebujeme odstranit chemickou heterogenitu. provádí se za vyšších teplot, než je teplota křivky rozpustnosti přiměsí v tuhém roztoku $\alpha-Al$
- žíhání na měkko [1], [2]

3.3. Tvrdost

Tvrdost slitin Al-Si se po odlití pohybuje v intervalu 60-80 HB. To odpovídá 21-40 HRB. Tvrdost se zvyšuje vytvrzováním, dosahuje pak i více 100 HB (55 HRB).

Tabulka 1- tvrdosti měřených slitin v HB a v HRB

Slitina	Vytvrzení	Tvrdost HB	Tvrdost HRB
EN AC- AlSi12Cu1(Fe)	nevytvrditelná slitina	70	31
ENAC- AlSi9Cu3(Fe), ADC12	vytvrditelná*	80	47
EN AC- AlSi12(Fe)	nevytvrditelná slitina	60	21
EN AC- AlSi10Mg(Fe)	vytvrditelná**	70	31

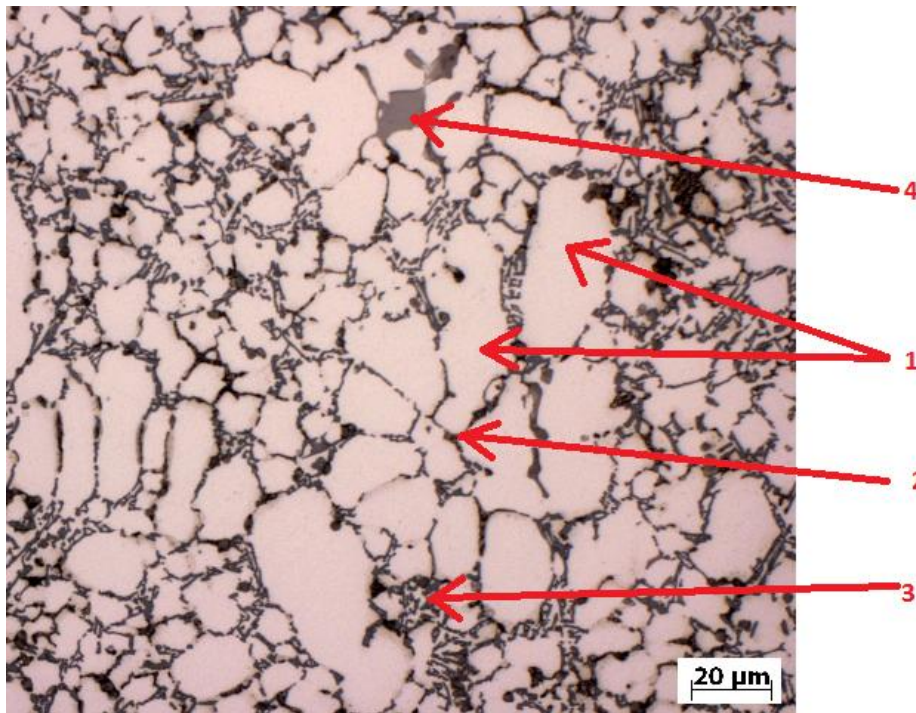
* používá se v litém stavu, díky vysokému podílu mědi dochází k samovolnému vytvrzování za studena

** EN AC-**AlSi10Mg(Fe)**- vytvrditelná slitina, vytvrzení:

Rozpouštěcí žíhání při teplotě 510-525°C po dobu 3-6h

Ochlazení ve vodě. Precipitační žíhání při teplotě 150-175°C po dobu 5-15h [2]

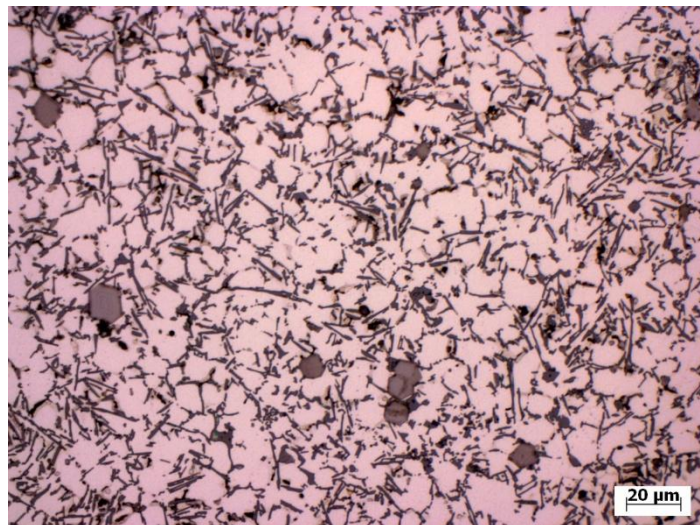
3.4. Struktura



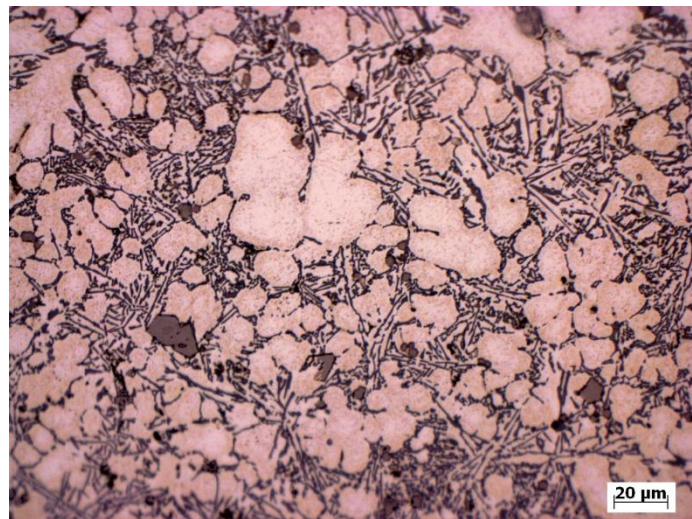
Obrázek 1- metalografický výbrus AlSi9CU, leptáno Nital, zvětšení 500x

- 1- primární roztok křemíku v hliníku $\alpha(\text{Al})$, dendridická forma
- 2- eutektikum-eutektický křemík - zrnité, tmavé lamely ve světlé ploše,
- 3- intermetalické formy obsahující Mn a Si (fáze $\text{Al}_{15}\text{Mn}_3\text{Si}_2$) a Fe (fáze $\alpha\text{-AlFeMnSi}$, tedy $\text{Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$) - kostrovité útvary
- 4- sedimentovaná primární fáze $\text{Al}_{15}\text{Mn}_3\text{Si}_2$

Na obrázcích níže je vidět změna po tepelném zpracování oproti litému stavu slitiny AlSi12Cu1(Fe).



Obrázek 2 - Struktura AlSi12Cu1(Fe) v litém stav, leptáno Nital, zvětšení 500x



Obrázek 3 - struktura AlSi12Cu1(Fe) po žhání 6h na 200°C, leptáno Nital, zvětšení 500x

4. Průběh měření

4.1. Chemické složení zkoušených slitin



Obrázek 4- Spektrometr

V následující tabulce je uvedeno požadované složení jednotlivých měřených slitin. Při měření jsme provedli i spektrální analýzu pro ověření chemického složení na přístroji Spektromax firmy Spektro, a naměřené hodnoty plně vyhovovaly požadovanému rozpětí. Pro ilustraci jsou uvedeny i licí parametry jednotlivých odlitků reprezentujících jednotlivé slitiny.

Tabulka 2-Chemické složení sledovaných slitin hliníku

slitina	Chemické značení	Chemické složení											
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb	Sn	Ti	Ca
EN AC-46000	EN AC- AlSi9Cu3(Fe)	8,0		2,7		0,1							
		10	1	3,7	0,6	0,3	1,2	0,5	0,05	0,2	0,2	0,2	
EN AC-43400	EN AC- AlSi10Mg(Fe)	9,0				0,2							
		11,0	1	0,1	0,55	0,5	0,15	0,15		0,15	0,05	0,2	
EN AC-47100	EN AC- AlSi12Cu1(Fe)	10,5		0,7									
		13,5	1,3	1,2	0,55	0,35	0,55	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	
EN AC-44300	EN AC- AlSi12(Fe)	10,5											
		13,5	1	0,1	0,55		0,15					0,15	
ADC 12		9,6	0,6	2,5		0,15							
		12	1,1	3,5	0,5	0,3	1	0,5	0,15	0,2	0,2	0,2	0,003

4.2. Měření tvrdosti

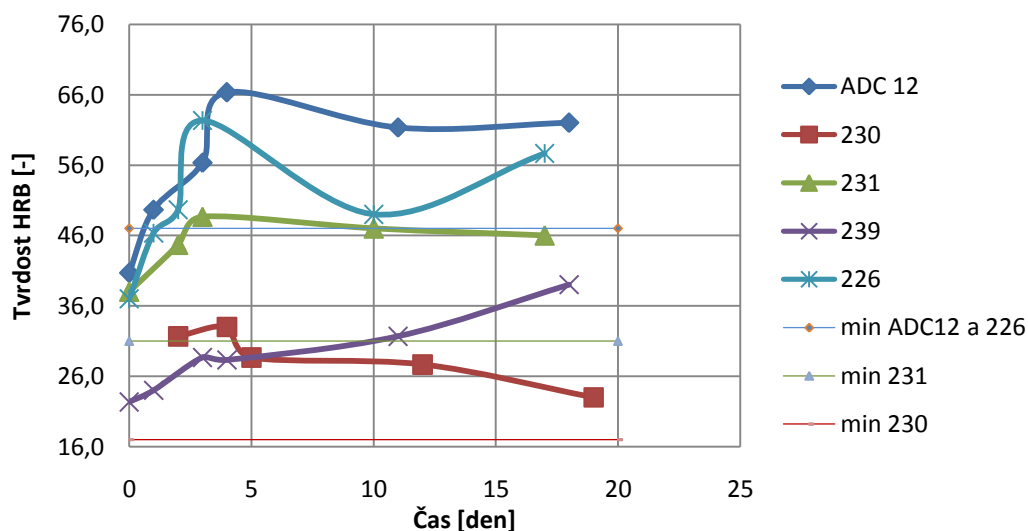


Obrázek 5 - Tvrdoměr

Tvrdost jsme měřili na tvrdoměru Kavid Press (obr.3). Tvrdost byla měřena v jednotkách HRB (kalená kulička o průměru 1,6 mm, zatěžováno silou 1000N). Protože veškeré údaje o tvrdosti hliníkových slitin jsou uvedené v jednotkách HB, převedl jsem tyto hodnoty pomocí převodové tabulky na HRB. Měření se na jednotlivých odlitcích bylo provedlo vždy celkem třikrát, hodnoty zanesené do grafů jsou vždy průměrem z těchto tří měření. V prvním případě (obr.4) se měřil odlitek bez tepelného zpracování, ve stavu, v jakém vypadne z licího stroje. V grafu je též zaznamenána slabou čarou minimální uváděná hodnota tvrdosti tlakově odlévaných slitin.

Další měření (obr.6) ukazuje naměřené hodnoty po tepelném zpracování, konkrétně po žihání na 250°C po dobu 2,5h, jak je vidět z příloženého protokolu (obr.5) z žihací pece firmy Realistic, typ CAE. Jak je z grafu vidět, proces tepelného zpracování proběhl bez narušení.

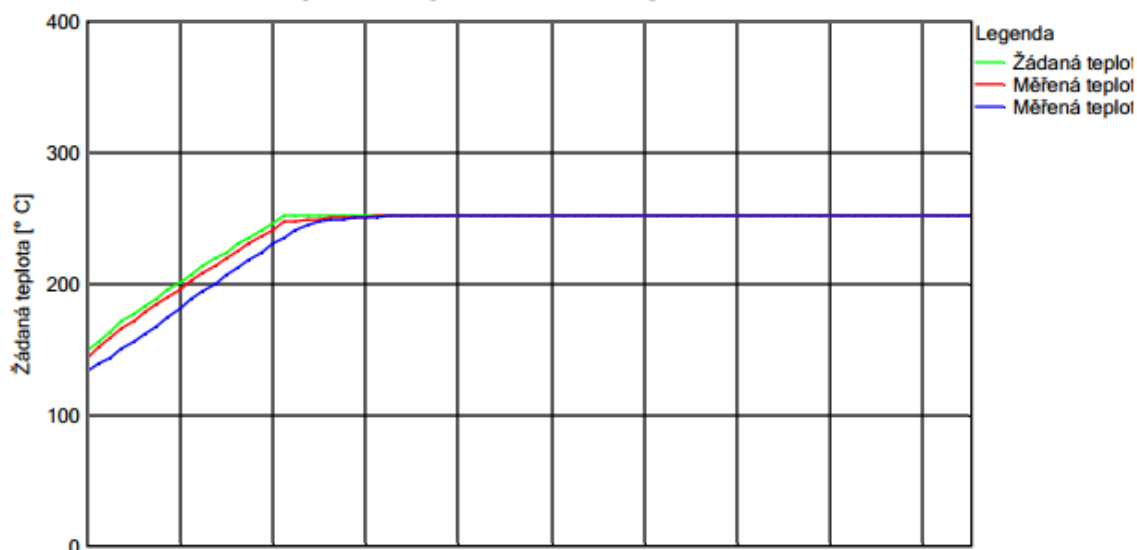
Závislost tvrdosti odlitků na čase



Obrázek 6 - Závislost tvrdosti odlitků na čase

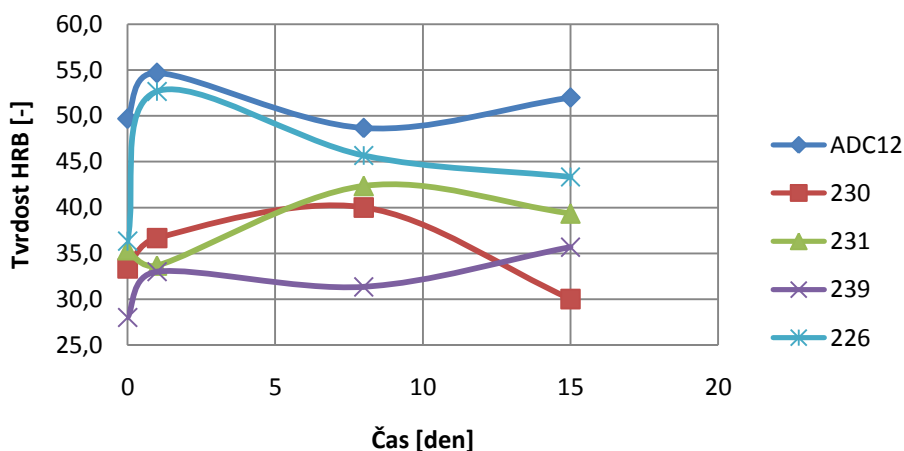
Protokol průběhu tepelného zpracování ev. č. 20130702A02					
Datum :	7.2.2013	Čas :	19:02:04	Číslo výr. příkazu	SV120156
Č. tavby	20135	Č. položky	65804/0	Počet ks	432
Č. programu	8	Zpracoval	ZAVADIL		
k překročení m. teploty 1 = 255 °C	došlo	0x	maximální teplota = 250 °C		
k překročení m. teploty 2 = 255 °C	došlo	0x	maximální teplota = 251 °C		
doba náběhu	00:34	doba žíhání	02:32		
doba výdrže	01:58				

Graf tepelného průběhu vsázky ev. č. 20130702A02



Obrázek 7 - Protokol žíhací pece Realistic

Závislost tvrdosti TZ odlitků na čase



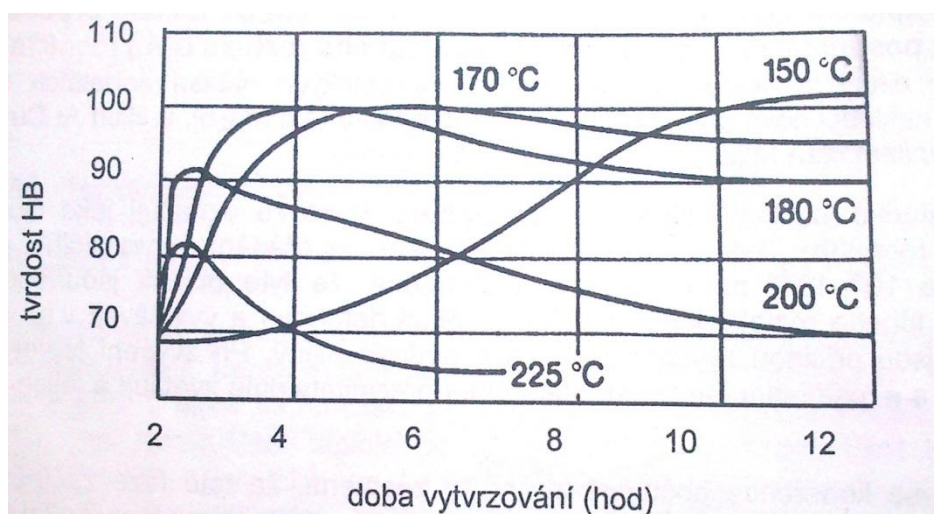
Obrázek 8- Graf tvrdostí tepelně zpracovaných odlitků

V tabulce níže jsou porovnány hodnoty tvrdosti u odlitků žíhaných na 250°C po dobu 2,5h a stejných odlitků žíhaných na 200°C po dobu 6h. Hodnoty jsou uvedeny v HRB.

Tabulka 3- porovnání hodnot HRB pro různé způsoby žíhání

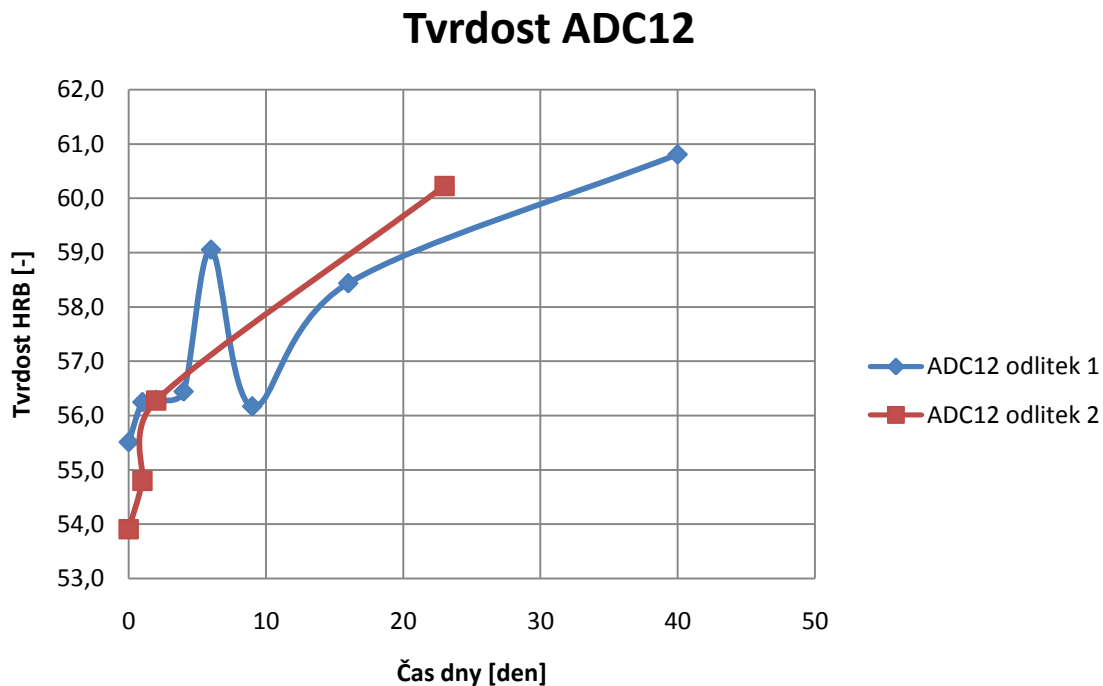
Slitina	250°C/2,5h	200°C/6h
ADC12	54,7	58,2
EN AC- $AlSi12(Fe)$	36,7	42,5
EN AC- $AlSi12Cu1(Fe)$	33,7	40,8
EN AC- $AlSi9Cu3(Fe)$	52,7	57,8
EN AC- $AlSi10Mg(Fe)$	33	56,3

Je zde vidět rozdíl, i když se jedná o měření pouze v jednom dni. Při nižší teplotě a delší době žíhání odlitek dosahuje vyšší tvrdosti, než při žíhání intenzivnějším a kratším. Vysvětlení by mohl přinést následující graf (obr.7), který uvádí právě v souvislost výdrži na teplotě. Graf je udělán přímo pro slitinu $AlSi10Mg$. A právě u této slitiny je rozdíl v tvrdosti v závislosti na teplotě nejzřetelnější.



Obrázek 9- Závislost tvrdosti slitiny $AlSi10Mg$ na době vytvrzování [2]

Pro slitinu ADC12, což je pouze upravená slitina ENAC- AlSi9Cu3(Fe) , byly k dispozici i data z delšího časového úseku, a tedy možnost sestavení následujícího grafu (obr.8). V grafu jsou uvedeny měření na dvou různých odlitcích, ovšem oba dva jsou z materiálu ADC12.



Obrázek 10 - graf tvrdostí ADC12

5. Závěr

Z měření tvrdosti slitin ADC12 a 226 je vidět, že je opravdu nutné měření tvrdosti (a tedy i dalších mechanických vlastností) neprovádět hned po odlití, ale počkat několik dní, než se odlitek se "ustálí". Je také vidět, že měření konečná tvrdost je u těchto dvou slitin vždy větší, než tvrdost počáteční, že opravdu se odlitek v čase vytvrdí. U všech odlitků i přes kolísání hodnot tvrdostí byly vždy splněny v tabulkách uváděné minimální hodnoty HB. Co se týče předpokladu zvyšování tvrdosti, pouze u slitiny EN AC- AlSi12(Fe) došlo ke snížení tvrdosti. Ostatní slitiny svou pevnost s časem zvýšily. Je nutno říci, že v těchto 4 slitinách je zvýšený podíl Cu nebo Mg, které jsou předpokladem pro proces vytvrzování.

seznam symbolů:

<i>HB</i>	tvrdost podle Brinella	(-)
<i>HRB</i>	tvrdost podle Rockwella	(-)

Seznam použité literatury

- [1] MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Vladivoj OČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Jaromír DRÁPALA, Heinz SCHNEIDER a Andrea MIŠKUFOVÁ a kol. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. ISBN 80-890-4188-4.
- [2] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [3] *Kovolis Hedvikov* [online]. [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://www.kovolis-hedvikov.cz/>