

# ZMĚNA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN TYPU AL-ZN-MG-CU PO SVAŘOVÁNÍ

Karel KOVANDA<sup>A</sup>, Ladislav KOLAŘÍK<sup>B</sup>, prof. Jan SUCHÁNEK CSc.<sup>C</sup>

<sup>A</sup>Ústav strojírenské technologie Ú12133, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6, 166 07, karel.kovanda@fs.cvut.cz, ladislav.kolarik@fs.cvut.cz, jan.suchanek@fs.cvut.cz

## Abstrakt

*V následujícím příspěvku jsou prezentovány výsledky experimentu, který byl proveden na oboustranném tupém svarovém spoji hliníkové slitiny EN AW 7022 a spočíval ve sledování změny tvrdosti v závislosti na čase po svaření. Hliníková slitina tohoto typu patří k vysoce pevným materiálům a svařováním může dojít k degradaci mechanických vlastností. Z tohoto důvodu byl změřen průběh tvrdosti ve svarovém spoji (v oblasti základního materiálu, svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti). Měření tvrdosti bylo provedeno 1., 7., 21., 70. a 175. den po svaření vzorku, experiment potvrdil nárůst tvrdosti vlivem procesu přirozeného stárnutí, jenž je v souladu s předpokládanými výsledky a s výzkumem ostatních autorů. Tvrdost ve svarovém kovu se zvýšila na 80 % původní hodnoty základního materiálu a v tepelně ovlivněné oblasti až na 93 % hodnoty základního materiálu. Elektronovou mikroskopií bylo zjištěno chemické složení svarového kovu a přechodové oblasti.*

**Klíčová slova:** Svařování, slitina EN AW 7022, mikrotvrdost, chemické složení

## 1. Úvod

Hliník a jeho slitiny jsou velmi vyhledávaným sortimentem pro konstrukční použití. Aby se daly vytvářet nové konstrukční prvky, je důležité zabezpečit dokonalé spojování těchto materiálů, to může být i značně problematické. Při způsobech spojování jakým může být pájení nebo tavné svařování, se však mohou vyskytnout značné problémy z hlediska změny mechanických vlastností nebo možnosti spojení. Jedna skupina slitin se může svařovat bez jakýchkoliv omezení bez změn mechanických vlastností, druhá skupina vyznačující se vysokými pevnostními vlastnostmi je naopak po svařování ztrácí. Tento nepříznivý jev se objevuje u vysoce pevných hliníkových slitin typu Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu. Uvedené hliníkové slitiny podléhají přirozenému vytvrzování, změna mechanických hodnot může znamenat určitá rizika při zatěžování svařovaných konstrukcí, například pokles pevnosti, tvrdosti apod. Z tohoto hlediska byla pro tento experiment vybrána hliníková slitina EN AW 7022 T651 (AlZn5Mg3Cu), svařovaná s přídatným materiálem AlMg5Cr.

## 2. Základní materiál

Základním materiálem byla zvolena hliníková slitina z řady 7xxx (značeno dle ČSN EN 573-1), konkrétně EN AW 7022 [AlZn5Mg3Cu]. Hliníkové slitiny řady 7xxx, se řadí mezi tzv. slitiny vytvrditelné, vyznačují se specifickým způsobem precipitace. Jedná se o druh hliníkové slitiny, kde hlavními legujícími prvky jsou zinek a hořčík. Chemické složení a mechanické vlastnosti experimentální slitiny jsou uvedeny v tabulce 1. Proces vytvrzení v těchto slitinách je podmíněn

přítomností intermetalických fází, jejichž vznik udává poměr zinku ku hořčíku. Pokud je poměr  $Zn:Mg > 2$  bude přítomna fáze  $MgZn_2$ , když bude poměr obrácený  $Zn:Mg < 2$  bude přítomna fáze  $Al_2Mg_3Zn_3$ . V případě, že je přítomno poměrně vysoké množství hořčíku může vznikat i komplexní fáze  $Mg_{23}AlZn_{49}$  [1,2]. Zpevňující složkou je hořčík nacházející se v tuhém roztoku hliníku. Přesycený tuhý roztok je dosti stabilní, takže i při malých rychlostech ochlazování zůstává přesycen a pak následuje přirozené vytvrzování doprovázené zvýšením mechanických vlastností. Celý proces je možné urychlit umělým stárnutím. Slitiny na základě tohoto systému se dodatečně legují mědí pro zvýšení odolnosti proti korozi pod napětím, která ovšem výrazně snižuje svařitelnost [1,3,4].

Ve vztahu výhodného poměru specifické měrné hmotnosti a meze kluzu se hliníková slitina EN AW 7022 T651 používá ve výrobě rámu jízdních kol a motocyklů, lehkých přenosných konstrukcí pro pódia, hledišť, sportovních zařízení, vstřikovacích forem pro plasty. Aby tyto materiály mohly být použity ve výše zmíněných aplikacích, je nutné hledat způsoby zabezpečující svaření s minimálním vlivem na zpevňující precipitáty, tj. bez poklesu mechanických vlastností [4,7].

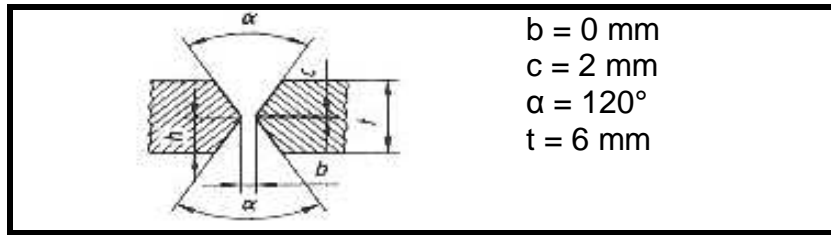
**Tab. 1:** Chemické složení a mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 7022 T651 [5]

EN AW 7022 T651 dle ČSN EN 573-3 (AlZn5Mg3Cu)							
Zn	Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Cr	Ti+Zr
4,3 – 5,2%	2,6 – 3,7%	0,5%	< 0,5%	0,1 - 0,4%	0,5 - 1,0%	< 0,3%	0,2%
Pevnost v tahu [MPa]		Mez kluzu [MPa]		Tažnost $A_{50}$ [%]		Tvrdość	Modul pružnosti v tahu [MPa]
Zaručená	Typická	Zaručená	Typická	Zaručená	Typická	Typická	
450	550	370	490	8	10	165HB	71000

### 3. Návrh experimentu

Experiment spočívá v porovnání průběhu tvrdosti na hliníkové slitině EN AW 7022 T651 po svařování metodou MIG. Byly svařeny desky s tupým oboustranným „V“ svarem (tzv. „X“ svar), vyhodnotila se jakost svarového spoje, tvar svaru a velikost tepelně ovlivněné oblasti (TOO), dále byly provedeny metalografické zkoušky a měření průběhu tvrdosti. Měření tvrdosti proběhlo 1., 7., 21., 70., a 175. den po svaření vzorků, a ukázalo rozdílný průběh tvrdosti s odstupem času.

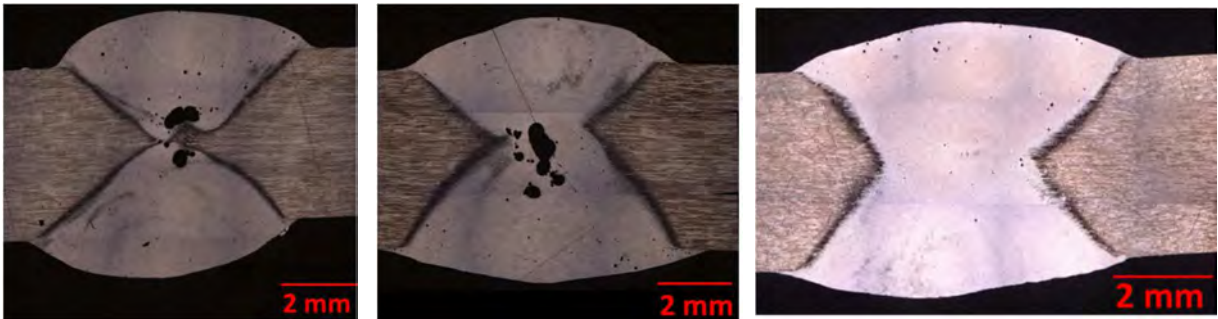
Tupý X svar vyžaduje vytvořit úkos na obou stykových plochách zkušební vzorku, na které bylo použito obrážení. V tomto případě je důležité, aby výsledný tvar úkosu byl symetrický. Úhel rozevření byl zvolen 120°, otupení 2 mm, díly sestaveny bez mezery, viz obr. 1. Poloha nastavení svařovacího hořáku v poloze vodorovné shora (PA), přídavný materiál dle označení fy ESAB OK Autrod 5356 (AlMg5Cr) o průměru 1,2 mm [8]. Ochranný plyn argon o čistotě 4.6, průtok 15 l.min<sup>-1</sup>. Hlavním požadavkem na svar je provaření v celé tloušťce základního materiálu, symetrie, pravidelnost svaru, geometrické rozměry vyhovující nejpřísnějšímu stupni jakosti dle EN ISO 10042.



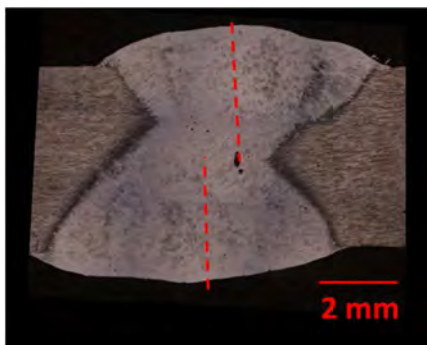
**Obr. 1:** Příprava svarových ploch dle normy ČSN EN ISO 9692-3 [6]

#### 4. Experimentální činnost

Nalezení vhodných parametrů svařování spočívalo především v dosažení průvaru v celém průřezu, zejména provaření kořene. Nízké parametry svařování způsobovaly neprovaření svařovaných vzorků a vznik pórů v kořenové části svaru, viz obr. 2. U symetrického oboustranného svaru je jednou z prvotních podmínek zachování symetrie svarových housenek po obou stranách. Ukázka asymetrie X svaru je uvedena na obr 3, tato asymetrie vzniká například nepřesným upnutím svařence.



**Obr.2:** Makrovýbrusy svarů při optimalizaci parametrů MIG svařování - X svar



**Obr. 3:** Asymetrie oboustranného svaru

Na obrázku 2 je ukázán i vzorek č. 5, který byl vyhodnocen jako vyhovující, splněny byly požadavky asymetrie svarového spoje, geometrické rozměry (převýšení, šířka svaru, průvar, a minimální pórovitost).

Parametry svařování včetně optimalizace jsou uvedeny v tab. 2, tučně označené hodnoty se jevily optimálními a proto byly použity při svařování zkušebních vzorků, které se dále vyhodnocovaly.

**Tab. 2:** Optimalizace MIG svařování – X svar

Vzorek č.	I [A]	U [V]	$V_{SV}$ [m·min <sup>-1</sup> ]	$V_{DR}$ [m·min <sup>-1</sup> ]	q [J·mm <sup>-1</sup> ]	Hodnocení
1	100 / 105	19,8 / 20,0	0,40	5,9 / 6,1	240 / 255	Nevyhovuje
2	105 / 110	20,0 / 20,2		6,1 / 6,4	255 / 270	Nevyhovuje
3	110 / 115	20,2 / 20,5		6,4 / 6,7	270 / 285	Nevyhovuje
4	115 / 120	20,5 / 20,7		6,7 / 7,0	285 / 300	Nevyhovuje
5	<b>120 / 125</b>	<b>20,7 / 21</b>		<b>7,0 / 7,3</b>	<b>300 / 315</b>	<b>Vyhovuje</b>

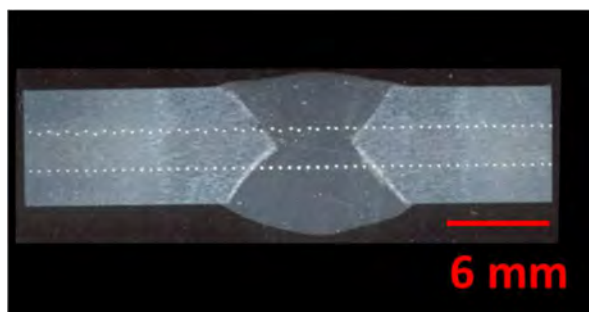
Pozn.: Hodnota uváděná před lomítkem platí pro 1. vrstvu, hodnota za lomítkem pro 2. vrstvu.  
Použité zkratky: I – proud, U – napětí,  $V_{SV}$  – rychlost svařování,  $V_{DR}$  – rychlost podávání drátu, q – tepelný příkon

- **Metalografické zkoušky**

Z vytvořených metalografických výbrusů se hodnotila šířka TOO a velikost plochy svarového kovu. Z naměřené velikosti ploch bylo stanoveno promíšení svaru, které dosahovalo 48%. Naměřené geometrické rozměry převýšení, šířka svaru, tepelně ovlivněná oblast, plocha svaru jsou uvedeny v tab. 3.

Tab.3 Geometrie tvaru svarů MIG svařování

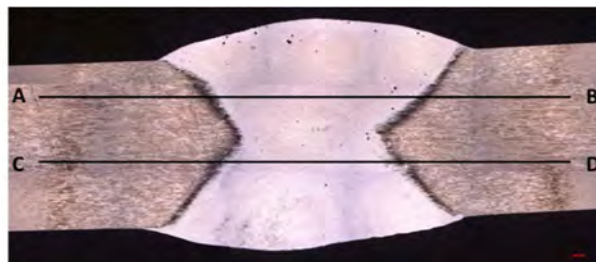
Druh svaru	Převýšení svaru [mm]		Šířka svaru [mm]		Šířka TOO [mm]	Plocha svaru [mm <sup>2</sup> ]	Promíšení [%]
	líc	kořen	líc	kořen			
X-svar	1,5	1,3	10	10	16	57	48

**Obr. 4:** Metalografické vzorky MIG svařování - X svar

- **Zkouška tvrdosti**

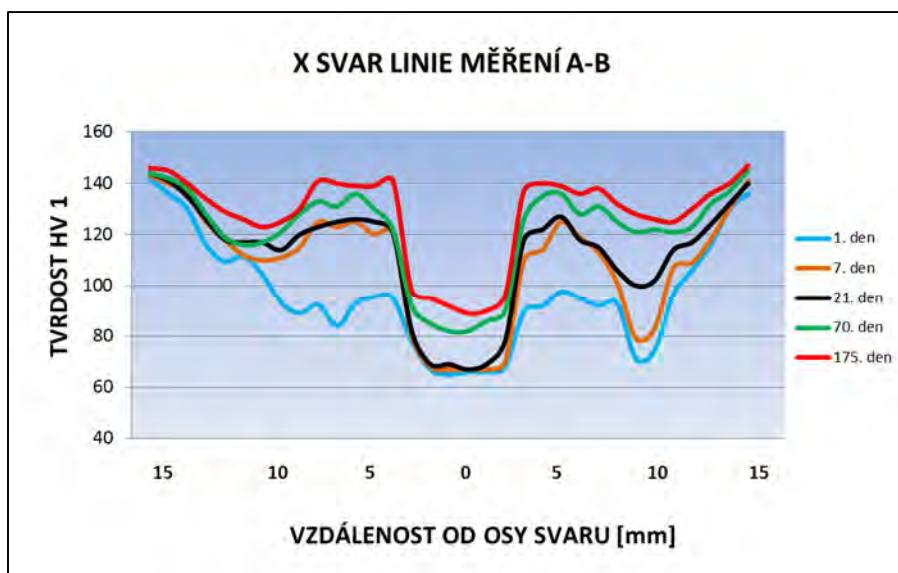
Z mechanických vlastností, byla na provedených vzorcích měřena tvrdost. Zkouška (mikro) tvrdosti dle Vickerse byla provedena na zařízení značky Bühler typ Indentamet 1000, parametry měření: zatížení 1 kg, po dobu 12 s, krok mezi jednotlivými vpichy byl zvolen 1 mm. Průběh tvrdosti se měřil s časovým odstupem několika dnů po svařování, měření proběhlo ve dvou řadách, v kořenové a krycí oblasti 2 mm od povrchu vzorků, viz obr. 5. Tupý X svar se vyznačuje osovou symetrií a není tudíž nutné měřit obě linie zároveň a porovnávat je, k tomuto porovnání došlo pouze při prvním měření, kdy tvrdost dosahovala stejných hodnot.

Při svařování hliníkových slitin typu Al-Zn-Mg-Cu dochází k výraznému snížení mechanických hodnot, tj. pevnosti a tvrdosti v tepelně ovlivněné a přechodové oblasti. Mechanické vlastnosti se u těchto slitin, vlivem přirozeného vytvrzování, v průběhu času vracejí na původní hodnoty základního materiálu. Nárůst hodnot tvrdosti je zachycen v tab. 4 a grafický průběh je zachycen na obr. 6.



**Obr. 5:** Měření tvrdosti v jednotlivých liniích

Kořenová oblast svaru: tvrdost svarového kovu dosahuje 1. den po svařování 64 HV v liniích A-B a C-D. První den po svařování byla tvrdost ve svarovém kovu o 46% nižší nežli v základním materiálu, který dosahuje 150 HV. Tvrdost měřená 7. a 21. Den byla prakticky totožná jako první den po svařování cca 68 HV. Při měření 70. den po svařování byla tvrdost 82 HV, k dalšímu nárůstu tvrdosti již nedocházelo, jak potvrzuje měření 175. den po svařování, kdy tvrdost dosahovala téměř 90 HV.



**Obr. 6:** Grafický průběh tvrdosti - X svar

Tepelně ovlivněná oblast: ukazuje pokles tvrdosti přibližně na 93 HV, s časovým odstupem však postupně vzroste až na 140 HV. Největší nárůst tvrdosti byl zjevný po sedmi dnech od svařování, kde tvrdost stoupla z 61 % na 80 % hodnoty základního materiálu. Po 21. dnech od svařování se tvrdost zvýšila pouze na 83%. Měření po 70. dnech se vyznačuje zvýšením tvrdosti na 130 HV, což je 90% z původních hodnot před svařováním. Delší časová prodleva 175. dnů, během které působil proces přirozeného vytvrzování, ukázala schopnost této hliníkové slitiny dosáhnout hodnoty tvrdosti téměř 140 HV. Jedná se o návrat tvrdosti až na 93% hodnoty tvrdosti základního materiálu.

Snížení tvrdosti je způsobené účinkem tepelného příkonu svařování, dochází k ovlivnění základního materiálu, ve kterém se rozpouštějí precipitační

fáze. Díky působení procesu přirozeného vytvrzování, se navrácí mechanické vlastnosti na původní hodnoty dané slitiny.

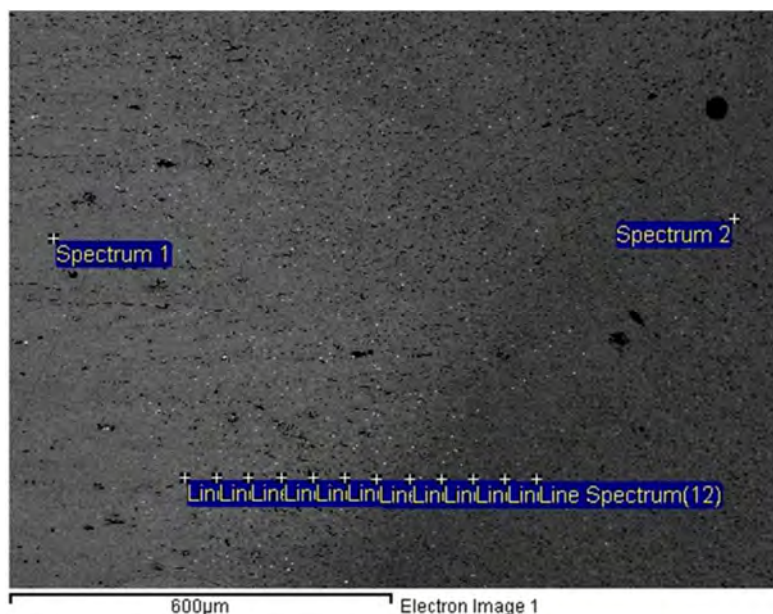
**Tab. 4:** Střední hodnota tvrdosti hliníkové slitiny EN AW 7022 T651 svařovaného metodou MIG s přidavným materiálem AlMg5Cr

Interval měření	Svarový kov	TOO	Přechodová oblast TOO/ZM
1. den	65	93	89
7. den	66	120	110
21. den	68	125	114
70. den	82	130	116
175. den	89	139	123

### **Analýza chemického složení svarového spoje**

Z metalografických vzorků oboustranného V svaru (X svar) je vidět typická struktura základního materiálu a svarového kovu. Na obr. 7 je vidět mikrostruktura svarového spoje, kde jsou označeny jednotlivé body měření chemického složení. Bod jedna (Spectrum 1) představuje základní materiál, bod dva (Spectrum 2) svarový kov. Přechodová oblast mezi základním materiálem a svarovým kovem (měřeno zleva doprava-Spectrum 1 až 12) charakterizuje změnu zastoupení hlavních legujících prvků zinku a hořčíku, jak je vidět z tab. 5. Měření proběhlo na elektronovém mikroskopu JOEL JSM – 70001 F s krokem po 50 µm, v délce 550 µm.

Měření chemického složení v přechodové oblasti ze základního materiálu do svarového kovu je možné pozorovat zvýšení obsahu hořčíku o 100%, které je způsobeno použitým přidavným materiálem, jenž obsahuje až 5% hořčíku. Hořčík během svařování vyhořívá a dochází k jeho odpařování. Zinek má naopak klesající tendenci a ve svarovém kovu se prakticky nevyskytuje, při svařování sice dochází k promíšení svarového kovu se základním materiálem, ale jeho množství klesá ze 4,6% na velmi nízkou hodnotu 1,5%. Přidavný materiál obsahuje zinek prakticky do 0,1%. Zinek má velmi nízkou teplotu tání 410° C, v porovnání se základním materiálem, a díky ní dochází k jeho vypařování a vyhořívání ze svarové lázně.



**Obr. 7:** Mikrostruktura svarového spoje-linie měření chemického složení

Hlavní roli při dosažení vysokých hodnot mechanických vlastností hraje podmínka vytvoření hlavních precipitačních fází, především nestabilní  $\eta'$  fáze. Přirozené vytvrzení v těchto slitinách je podmíněno přítomností intermetalických fází, jejichž vznik udává poměr zinku a hořčíku (viz kapitola 2). Tyto vytvrzující fáze mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti (pevnost v tahu, tvrdost, tažnost atd.).

**Tab.5:** Chemická analýza X svaru

Pozice	Mg	Zn	Al
Spectrum 1 – základní materiál	2.76	4.60	92.64
Spectrum 2 – svarový kov	5.61	1.73	92.65
Line Spectrum(1) základní materiál	2.62	4.71	90.23
Line Spectrum(2)	2.69	3.87	90.79
Line Spectrum(3)	2.86	<b>4.71</b>	92.44
Line Spectrum(4)	2.41	4.57	93.02
Line Spectrum(5)	<b>2.07</b>	3.41	94.53
Line Spectrum(6)	2.65	3.77	93.58
Line Spectrum(7)	3.01	2.75	94.24
Line Spectrum(8)	<b>5.37</b>	2.22	92.42
Line Spectrum(9)	3.41	0.94	95.66
Line Spectrum(10)	3.00	0.88	96.12
Line Spectrum(11)	4.70	1.55	93.75
Line Spectrum(12) svarový kov	3.48	<b>0.73</b>	95.80

## 5. Závěr

Nejdůležitějším předpokladem vytvoření jakostního svarového spoje se jeví realizace optimalizace svařovacích parametrů. Po kontrole geometrie svarového spoje byly provedeny metalografické vzorky, které sloužily k hodnocení makro a mikrostruktury, tak i pro měření tvrdosti. Vzhledem k použité hliníkové slitině EN AW 7022 T651, která umožňuje přirozené vytvrzování, byly průběhy tvrdosti měřeny v pěti časových odstupech.

Po svařování byla tvrdost ve svarovém kovu o 46% nižší nežli v základním materiálu, který dosahuje tvrdosti 150 HV. Největší nárůst tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti byl zjevný po 7. dnech od svařování, kde tvrdost stoupla z 61 % na 80 % hodnoty základního materiálu. Měření po 70. dnech se vyznačuje zvýšením tvrdosti na 130 HV, což je 90% z původních hodnot před svařováním. Hodnoty naměřené 175. dnů po svařování dosahovaly 140 HV, tj. 93% hodnoty tvrdosti základního materiálu. Tepelným účinkem dochází k rozpuštění precipitátů, které se s časovým odstupem opět vytvoří a dojde tak k nárůstu hodnot mechanických vlastností.

Měření chemického složení v přechodové oblasti ze základního materiálu do svarového kovu je možné pozorovat zvýšení obsahu hořčíku o 100%, které je způsobeno použitým přídatným materiálem, jenž obsahuje až 5% hořčíku. Zinek má naopak klesající tendenci a ve svarovém kovu se prakticky nevyskytuje, při svařování sice dochází k promíšení svarového kovu se základním materiálem, ale jeho množství klesá ze 4,6% na velmi nízkou hodnotu 1 až 2%. K dosažení požadovaných mechanických vlastností, zde hraje roli podmínka vytvoření hlavních precipitačních fází, především nestabilní  $\eta'$  fáze. Přirozené vytvrzení v těchto slitinách je podmíněno přítomností intermetalických fází.

Naměřené hodnoty a průběhy tvrdosti potvrzují teoretické předpoklady uváděné v literatuře. Velikost tepelného příkonu během svařování má vliv na šířku tepelně ovlivněné oblasti a tím i změny mechanických vlastností u slitin typu Al-Zn-Mg-Cu. K eliminaci poklesu mechanických vlastností je proto důležité vzít v úvahu metodu, parametry a způsob svařování.

## LITERATURA

- [1] Ma, T. ; Ouden, G.: *Softening behaviour of Al-Zn-Mg alloys due to welding*, Materials science and engineering A 266, 1998 Elsevier, p. 198-204
- [2] CHEMINGUI, M. et al. *Characterization of the mechanical properties changes in an Al-Zn-Mg alloy after a two-step ageing treatment at 70°C and 135°C*. *Materials and Design* [online]. 2010, 31, [cit. 2009-12-23]. Dostupné z: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), ISSN 0261-3069
- [3] KOU, S. *Welding metallurgy 2nd ed.*. New Jersey, CANADA: John Wiley and Sons, 2003. 466 s. ISBN 0-471-43491-4.
- [4] Kolařík, L., Kovanda, K., Vondrouš, P., Dunovský, J. *Houldcroft Weldability Test of Aluminium Alloy EN AW 6082 T6*. *Scientia Agriculturae Bohemica* [online]. 2012, vol. 43, no. 1, p. 14-21. Internet: <http://sab.czu.cz/?r=5595&mp=sab.detail&sab=47#254>. ISSN 1211-3174.
- [5] Fürbacher, I.; Macek, K.; Seidl, J. a kolektiv: *Lexikon technických materiálů*, svazek 4., Praha: Verlag Dashöfer, 2001
- [6] ČSN EN ISO 9692-3. *Svařování a příbuzné procesy-Příprava svarových ploch: Část 3: Obloukové svařování hliníku a jeho slitin tavící se elektrodou v inertním plynu a wolframovou elektrodou v inertním plynu*. Praha: Český normalizační institut, 2002.



- [7] ČSN EN ISO 10042. *Svařování - Svarové spoje hliníku a jeho slitin zhotovené obloukovým svařováním: Určování stupňů jakosti*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [8] Kovanda, K., Kolařík, L., Válová, M., Kopřiva, J. *Vliv ochranných plynů při GMAW svařování hliníkové slitiny EN AW 7022*, Strojírenská technologie. 2011, roč. XVI, č. 4, s. 25-32. ISSN 1211-4162.