



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING

NEKONVEČNÍ METODY SVAŘOVÁNÍ TVÁŘENÝCH SLITIN HOŘČÍKU

UNCONVENTIONAL METHODS OF WELDING OF WROUGHT MAGNESIUM ALLOYS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. KATEŘINA KLIMČÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PAVEL DOLEŽAL, PH.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Kateřina Klimčáková

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Materiálové inženýrství (3911T011)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Nekonvenční metody svařování tvářených slitin hořčíku

v anglickém jazyce:

Unconventional methods of welding of wrought magnesium alloys

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Posouzení vhodnosti použití nekonvenčních metod pro svařování tvářených slitin hořčíku typu AZ a ZE metodou laserového svařování, elektronovým paprskem, frikčním svařováním i konvenčními metodami (Metal inert gas, Variable polarity plasma arc, Hybrid laser-arc, Activating flux tungsten inert gas, Friction stir, Laser, Electron beam).

Cíle diplomové práce:

Posouzení základních mechanických charakteristik a metalografické hodnocení dodaných tvářených slitin hořčíku. Aplikace konvenčních a nekonvenčních metod svařování dle dostupnosti technologií. Metalografické hodnocení a základní mechanické charakteristiky svarových spojů. Komplexní hodnocení z hlediska kvality a vzájemné srovnání použitých metod svařování.

Seznam odborné literatury:

- [1] LIU, L. Welding and joining of magnesium alloys. Woodhead Publishing Limited, 2010, 422 s. ISBN 1-84569-692-1.
- [2] JEFFUS, L. Welding: Principles and Applications. 5th ed. New York: Delmar Learning, 2004, 909 s. ISBN 1-4018-1046-2.
- [3] DRAPAL, J., et al. Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík - příměs. Ostrava : Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 2004, 172 s. ISBN 80-248-0579-0.
- [4] AVEDESIAN, M. M., BAKER, H. Magnesium and Magnesium Alloys. Materials Park OH: ASM International, 1999, 298 s. ISBN 0-87170-657-1.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Doležal, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 14.2.2011

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na posouzení možností svařování tvářených slitin hořčíku konvenčními i nekonvenčními metodami. Byly k dispozici tvářené slitiny hořčíku AZ31, AZ61, ZE10 a ZE41, které byly svařeny metodami Friction Stir Welding, pulzním pevnolátkovým a kontinuálním vláknovým laserem. Byl hodnocen vliv jednotlivých metod na mikrostrukturu a základní mechanické vlastnosti svarových spojů. Ke studiu bylo využito metod světelné a rastrovací elektronové mikroskopie, zkoušky tahem a měření mikrotvrdosti dle Vickerse. Z výsledků experimentu lze konstatovat, že z hlediska zachování meze pevnosti je nejvhodnější svařování metodou Friction Stir Welding. Z porovnání mikrostruktury a základních mechanických vlastností vyplývá, že pro svařování hořčíkových slitin je vhodnější kontinuální vláknový laser. V literatuře nebyly informace o svařování metodou FSW slitin skupiny ZE uvedeny, podobná situace nastává v případě svařovaných plechů o tloušťce 0,8 mm a 1,6 mm.

ABSTRACT

Master's thesis deals with consideration possibility of conventional and unconventional welding methods of wrought magnesium alloys. Methods of Friction Stir Welding, Pulsed Nd:YAG laser and Continuous Fiber laser was used to join magnesium alloy sheets AZ31, AZ61, ZE10 and ZE41. For studying influence of processing parameters on microstructure and mechanical properties were used methods of light microscopy, scanning electron microscopy, tensile tests and microhardness measurements. The results of tensile tests show that from the point of view of keeping ultimate tensile strength is the best methods for welding magnesium alloys Friction Stir Welding. Compared with Nd:YAG laser, fiber laser give better properties of welds. From comparing microstructure and mechanical properties . It wasn't found publications about Friction Stir Welding of magnesium ZE alloys or about FSW sheets with thickness only 0,8 mm and 1,6 mm.

KLÍČOVÁ SLOVA: tvářené hořčíkové slitiny, svařování, TIG, vláknový laser, Nd:YAG laser, Friction Stir Welding

KEYWORDS: wrought magnesium alloys, welding, TIG, fiber laser, Nd:YAG laser, Friction Stir Welding

KLIMČÁKOVÁ, K. *Nekonveční metody svařování tvářených slitin hořčíku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 156 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Doležal, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FSI VUT v Brně.

V Brně 27.5. 2011

Kateřina Klimčáková

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat všem pracovníkům ÚMVI, kteří mi pomáhali s tvorbou diplomové práce, jmenovitě Bc. Miroslavě Horynové, Ing. Drahomíře Janové, Ing Lence Klakurkové, Ph.D. a hlavně mému vedoucímu Ing. Pavlovi Doležalovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, trpělivost a množství cenných rad a připomínek. Děkuji také pracovníkovi VZLÚ a.s. Ing. Petrovi Bělskému za mnoho rad v oblasti frikčního svařování a RNDr. Liboru Mrňovi Ph.D. za rady v oblasti laserového svařování.

Dále bych chtěla poděkovat celé rodině, všem svým přátelům a mému příteli za podporu během studia.

OBSAH

1. ÚVOD.....	1
2. CÍLE PRÁCE.....	2
3. LITERÁRNÍ PŘEHLED PROBLEMATIKY.....	3
3.1 HOŘČÍKOVÉ SLITINY.....	3
3.1.1 Hořčík a slitiny hořčíku.....	3
3.1.2 Značení hořčíkových slitin.....	8
3.1.3 Technologie tváření hořčíkových slitin.....	10
3.2 SVAŘOVÁNÍ HOŘČÍKOVÝCH SLITIN.....	14
3.2.1 Svařitelnost hořčíku, základní metody.....	14
3.2.2 Svařování metodou TIG.....	15
3.2.3 Svařování laserovým paprskem.....	20
3.2.4 Svařování metodou Friction Stir Welding.....	25
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	30
4.1 ZÁKLADNÍ MATERIÁL.....	30
4.2 METODIKA A POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ.....	31
4.3 HODNOCENÍ ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU.....	32
4.3.1 Metalografické hodnocení základního materiálu.....	32
4.3.2 Napěťové a deformační charakteristiky základního materiálu.....	39
4.4 PŘÍPRAVA EXPERIMENTÁLNÍHO MATERIÁLU.....	42
4.5 VÝSLEDKY EXPERIMENTU.....	47
4.5.1 Svařování metodou Friction Stir Welding.....	47
4.5.2 Svařování pulzním pevnolátkovým laserem.....	56
4.5.3 Svařování kontinuálním vláknovým laserem.....	62
4.5.4 Komplexní hodnocení napěťových charakteristik svarových spojů.....	67
5. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	70
6. ZÁVĚRY.....	74
7. PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	79
8. POUŽITÁ LITERATURA.....	80
9. SEZNAM PŘÍLOH.....	85

1. ÚVOD

Hořčíkové slitiny nacházejí využití hlavně v automobilovém a leteckém průmyslu, díky vysoké měrné pevnosti, nízké hustotě a dobré obrobitelnosti. K negativním vlastnostem patří hlavně vysoká reaktivita s kyslíkem, nízká korozní odolnost v atmosféře obsahující sůl nebo vysokou vlhkost a špatná tvářitelnost způsobená hexagonální strukturou.

Slitiny hořčíku mají velmi široký rozsah použití a proto je nutné pro některé aplikace vyhledat vhodné svařovací metody. Pro nenáročné aplikace se používá tavné svařování metodou TIG a MIG, pro aplikace, kde je nutné zachovat pevnostní charakteristiky materiálu se používá metod vysokoenergiových (laserovým svazkem, elektronovým paprskem). V posledních letech se rozšiřuje svařování v pevném stavu – Friction Stir Welding [1, 2].

Svařování laserovým paprskem je díky nízkému vstupnímu výkonu, vysoké rychlosti svařování a úzkou tepelně ovlivněnou oblastí vhodnou metodou pro svařování hořčíkových slitin. Natavení materiálu a jeho následné tunutí může vést ke vzniku zbytkových vnitřních napjatosti. Studium změny mikrostruktury je tedy nutné k porozumění mechanickým vlastnostem svarového spoje [3]. Svařování laserovým paprskem se dle použitého zdroje záření dělí na plynové a pevnolátkové, dle literatury [2] je doporučováno svařovat hořčíkové slitiny pevnolátkovým laserem, jehož účinnost je v tomto případě mnohem vyšší než v případě použití laseru plynového.

Metoda svařování Friction Stir Welding je moderním způsobem svařování. Je založena na schopnosti tvářitelnosti materiálu za zvýšených teplot. Pohybující se svařovací nástroj vyrobený z nástrojové oceli je zanořen do svařovaného materiálu a vznikající tření uvádí materiál do plastického stavu. Hlavní výhodou metody je ta, že při jejím použití nedochází k natavení materiálu, tj. nedochází k propalu legujících prvků a menší oxidační reakci.

2. CÍLE PRÁCE

Charakteristikou problematiky diplomové práce je posouzení použití konvenčních i nekonvenčních metod svařování tvářených slitin hořčíku AZ31, AZ61, ZE10 a ZE41.

Jedním z cílů je na základě poznatků z literatury rešerše metody TIG, Friction Stir Welding a svařování laserovým svazkem ve vztahu ke svařování hořčíkových slitin.

Dílčím cílem diplomové práce bude metalografické hodnocení a posouzení základních mechanických charakteristik tvářených slitin hořčíku. K tomu bude využito metod světelné mikroskopie a rastrovací elektronové mikroskopie.

Dalším cílem je aplikace dostupných metod svařování pro dané typy hořčíkových slitin. Pro jednotlivé metody bude posouzen vliv vstupních parametrů na mikrostrukturu a základní mechanické vlastnosti svarového spoje. K tomu bude využito metod světelné a rastrovací elektronové mikroskopie, zkoušky tahem a měření mikrotvrdoosti dle Vickerse.

3. LITERÁRNÍ PŘEHLED PROBLEMATIKY

3.1 HOŘČÍKOVÉ SLITINY

3.1.1 Hořčík a slitiny hořčíku

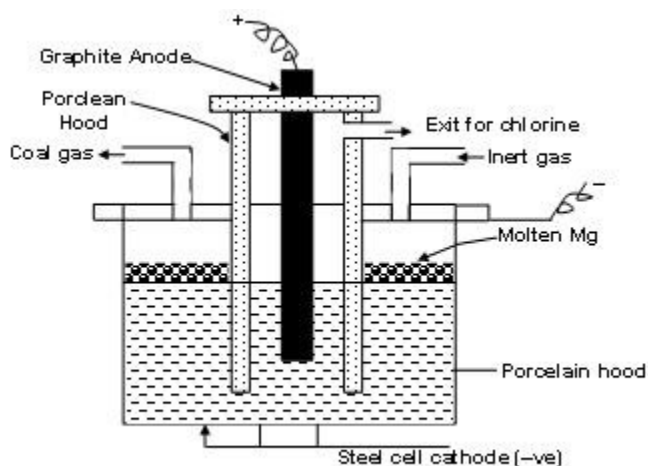
Hořčík (lat. magnesium) je jedním z kovů alkalických zemin. Nemá alotropickou přeměnu, vyskytuje se pouze v HCP struktuře. Čistý hořčík má velmi nízkou hustotu (1738 kg/m^3), nízkou teplotu tání ($650 \text{ }^\circ\text{C}$) a pevnost v tahu 190 MPa . Jako konstrukční kov je nevhodný, ale čistý hořčík se používá pro legování ostatních slitin (hlavně hliníkových), jako redukční činidlo při výrobě titanu a pro modifikaci grafitu litiny [4, 5].

Nevýhodou hořčíku (a jeho slitin) je nízká korozní odolnost, špatná tvářitelnost, obtížné svařování, nižší vrubová houževnatost a jeho vysoká reaktivnost s kyslíkem. Naopak výhodou je nízká hmotnost, vysoká specifická pevnost, dobrá obrobitelnost, vysoký útlum vibrací. Horší tvářitelnost hořčíku má za následek že 90 % výrobků z hořčíkových slitin jsou odlitky (převážně Mg-Al-Zn), ačkoliv tvářené slitiny dosahují lepších mechanických vlastností [4-6].

Metody výroby čistého hořčíku

Pro výrobu čistého hořčíku se používají dvě chemické sloučeniny: MgO nebo MgCl_2 . Téměř 80 % vyrobeného hořčíku pochází z MgCl_2 , který je získáván z mořské vody. Následný proces extrakce čistého hořčíku z této sloučeniny se děje pomocí tavné elektrolýzy. Pokud získáváme hořčík ze sloučeniny MgO (zdroj dolomit, magnezit), využíváme procesu termické redukce [5, 7].

- **Tavná elektrolýza** se skládá ze dvou nutných kroků. Nejprve je nutné připravit bezvodný chlorid hořečnatý. To je možné buď sušením MgCl_2 v HCl (proces AMAX-USA) nebo dojde k přeměně MgCl_2 na MgO a zpětně plynou chlorací na MgCl_2 (metoda Norsk Hydro – Porsgrunn, metoda Dow Chemical). Vzniklý chlorid je pak při teplotách $700\text{-}750 \text{ }^\circ\text{C}$ a napětí 5-7 V podroben elektrolýze na čistý hořčík a plynný chlor (obr. 3.1) [5, 7].



Obr. 3.1 Schéma výroby čistého hořčíku tavnou elektrolýzou [8]

Graphite anode – grafitová anoda, porcelain hood – porcelánový kryt, exit for chlorine – vývod chlóru, coal gas – karbonizační plyn, inert gas – inertní plyn, molten Mg – roztavený hořčík.

- Výroba hořčíku **termickou redukcí** je oproti tavné elektrolýze jednodušší proces. Existuje několik různých metod výroby, v závislosti na použitém redukčním činidle. Nejčastěji se využívá ferosilicium FeSi75 . Na redukcii se podílí pouze křemík, železo má funkci nosiče. Při chemické reakci (za teplot $1150\text{-}1200 \text{ }^\circ\text{C}$) vzniká plynný hořčík, který kondenzuje na určeném místě chlazeném vodou [5, 7].

Vliv legujících prvků na vlastnosti hořčíku

Pro konstrukční aplikace se čistý hořčík kvůli jeho špatným mechanickým vlastnostem prakticky nepoužívá. Zvýšení mechanických vlastností lze dosáhnout legováním vhodnými prvky, které ale musí splňovat Hume-Rotheryho faktory:

1. Velikostní faktor – rozdíl atomových poloměrů základního kovu a legujícího prvku se musí pohybovat v rozmezí $\pm 15\%$.
2. Elektrochemický faktor – elektronegativita prvků by měla být prakticky totožná, neboť s rostoucím rozdílem elektronegativit klesá schopnost tvorby tuhého roztoku [5, 9].

Vznik substitučního tuhého roztoku má pozitivní vliv na mechanické vlastnosti slitin. Dochází ke zvýšení meze pevnosti při zachování (nebo zlepšení) původní tažnosti. Pokud se ve slitině vytvoří intermetalické fáze, není možné slitinu tvářet [7].

Volbou vhodných legur je možné dosáhnout požadovaných vlastností slitiny – zlepšení korozní odolnosti, mechanických a technologických vlastností. Je třeba najít ideální kombinaci prvků, protože pokud dojde k zlepšení jedné vlastnosti, může dojít ke zhoršení druhé. Jedním z významných faktorů volby legujícího prvku je zachování nízké měrné hmotnosti slitiny [5].

- **Hliník** je nejvýznamnější legurou v hořčíkových slitinách. Jeho maximální rozpustnost činí 12,7 hm. %. Zlepšuje pevnost, tvrdost a slévatelnost slitiny. Pokud je jeho obsah nad 6 hm. %, jen možné slitinu tepelně zpracovávat. S hořčíkem tvoří vytvrzující fázi $Mg_{17}Al_{12}$.
- **Berylium** je do hořčíku přidáváno v malých obsazích (do 0,001 hm. %) a jeho účinek spočívá v snížení reaktivnosti hořčíku v nataveném stavu. Tj. snižuje oxidaci při svařování a odlévání. Při lití do pískových forem se jeho používání nedoporučuje, protože pod jeho účinkem dochází k hrubnutí zrna.
- **Vápník** se do slitin přidává z metalurgických důvodů. Pokud je přidán do slévarenských slitin, snižuje oxidaci povrchu při odlévání a následném tepelném zpracování. Dále zlepšuje tvářitelnost hořčíkových plechů. Při překročení koncentrace 0,3 hm. % začíná být slitina náchylná k vzniku trhlin v průběhu svařování. Zvyšuje creepové vlastnosti, zjemňuje zrno, ale má negativní vliv na korozní odolnost.
- **Měď** při koncentracích nad 0,05 hm. % snižuje korozní odolnost, ale zvyšuje pevnost za vyšších teplot. U slévarenských slitin zlepšuje slévatelnost a ze slitiny hořčíku legovaných mědí je možné vytvářet kovová skla.
- **Lithium** má poměrně vysokou rozpustnost v hořčíku (5,5 hm. %) a nízkou měrnou hmotnost, proto je pro legování velmi vhodný. Přidání lithia snižuje pevnost, zvyšuje reaktivitu slitiny, ale zlepšuje tvářitelnost. Okolo 11 hm. % lithia má za následek formování β fáze, která má BCC mřížku a lepší tvářitelnost než HCP struktura.
- **Mangan** má ve slitinách hořčíku poměrně nízkou rozpustnost (1,5 hm. %) a s přítomností hliníku se rozpustnost snižuje až na hodnotu 0,3 hm. %. Mangan se do slitin přidává na vyvážení škodlivých příměsí (železo a nikl). Vznikají intermetalické fáze, které zvyšují korozní odolnost ve sláném prostředí. Mangan lehce zvyšuje mez kluzu a creepové vlastnosti.
- **Křemík** se do slitin hořčíku přidává ke snížení viskozity pro odlévání. Pokud je ve slitině přítomno železo, snižuje křemík korozní odolnost.
- **Stříbro** zvyšuje mechanické vlastnosti u vystárnutých slitin a u slitin s přítomností prvků vzácných zemin zvyšuje creepovou odolnost. Má negativní vliv na korozní odolnost.

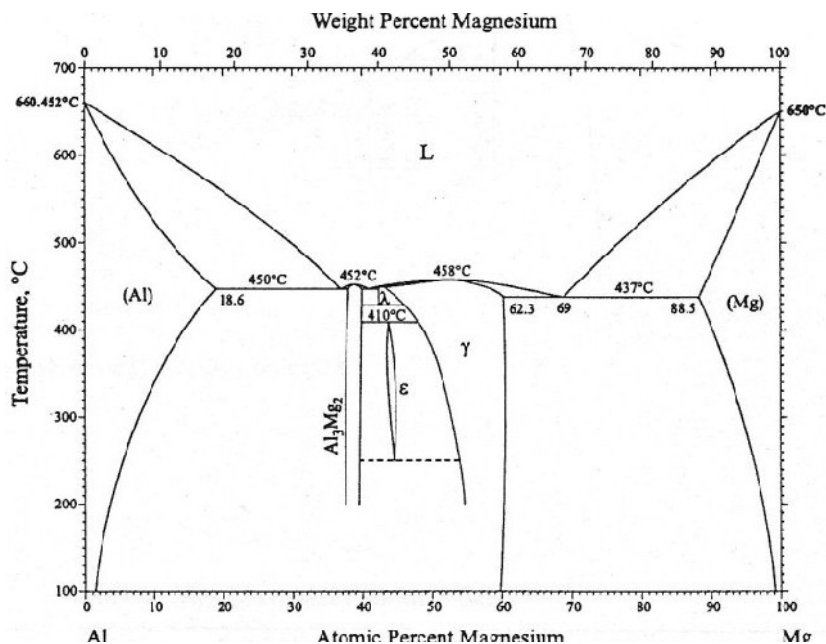
- **Thorium** se jako legující prvek přestává používat pro jeho radioaktivitu. Jeho použití zlepšuje svařitelnost slitin s vysokým obsahem zinku a creepovou pevnost hořčkových slitin používaných nad teplotou 370 °C.
- **Cín** snižuje pravděpodobnost vzniku trhlin při tváření ze tepla zvýšením tvářitelnosti.
- **Zinek** je po hliníku druhý nejvyužívanější prvek pro legování hořčkových slitin. Jednak v kombinaci s hliníkem zvyšuje pevnost za normální teploty, v kombinaci se zirkoniem, prvky vzácných zemin nebo thoriem vytváří precipitačně vytvrditelné slitiny. Pokud jeho obsah přesahuje 1 hm. %, zvyšuje křehkost za vyšších teplot, což nepříznivě ovlivňuje svařitelnost slitin.
- **Zirkonium** zjemňuje zrno, ale nemůže být přidáváno do slitin obsahujících hliník nebo mangan, protože s těmito prvky tvoří stabilní sloučeniny. Na zjemnění zrna se podílí jen tak část zirkonia, která je rozpuštěna v tuhém roztoku.
- **Yttrium** má vysokou rozpustnost v hořčíku (12,4 hm. %) a je do slitin přidáváno společně s prvky vzácných zemin a zvyšuje creepovou odolnost až do teplot 300 °C.
- **Prvky vzácných zemin** se do slitin hořčíku přidávají buď ve formě didymu (směs 85 hm. % neodymu a 15 hm. % praseodymu) nebo ve formě mischmetalů (50 hm. % ceru, zbytek je tvořen směsí lanthanu a neodymu). Přidáním prvků vzácných zemin se zvyšuje pevnost, slévatelnost, odolnost proti trhlinám při svařování a dochází ke snížení porozity u odlitků. Slitiny je možné precipitačně vytvrzovat ze pokojových i zvýšených teplot, což má za následek zlepšení mechanických a creepových vlastností za vyšších teplot.
- **Železo** je považováno za škodlivou příměs a už ve velmi malých množstvích (nad 0,005 hm. %) výrazně snižuje korozní odolnost.
- **Nikl** je stejně jako železo nežádoucí příměs a jeho obsah je nutné snížit pod 0,005 hm. %, aby nesnižoval korozní odolnost. S pomocí této legury je možné vyrábět kovová skla [5, 7, 10].

Slitiny hořčíku

Hořčkové slitiny se používají ve formě odlitků anebo tvářených výrobků. Používané slitiny mají stejné chemické složení, liší se však výslednou mikrostrukturou. Dle použitých legujících prvků můžeme slitiny hořčíku rozdělit do jednotlivých skupin [11]:

- **Mg-Al-Zn.** Maximální rozpustnost hliníku v hořčíku je 12,7 % při eutektické teplotě 437 °C a postupně klesá až na hodnotu 2 %. V tepelně nezpracovaných odlitcích se nachází fáze $Mg_{17}Al_{12}$. Rozpouštěním žháním na teplotu 430 °C se většina γ -fáze rozpustí. Tato slitina není ale vhodná pro precipitační vytvrzování, neboť stárnutím se nevytvoří GP zóny ani přechodné precipitáty, ale dochází přímo k tvorbě rovnovážných precipitátů $Mg_{17}Al_{12}$. Slitiny na odlitky obsahují většinou 6-10 % hliníku, slitiny ke tváření max. 8 % hliníku a max. 1,5 % zinku (vyšší obsah zinku by vedl k trhlinám za tepla). Tyto slitiny nejsou vhodné pro použití za zvýšených teplot, neboť fáze $Mg_{17}Al_{12}$, která precipituje na hranicích zrn, je i za nižší teplot poměrně měkká a neposkytuje tak pevnou vazbu mezi zrna.

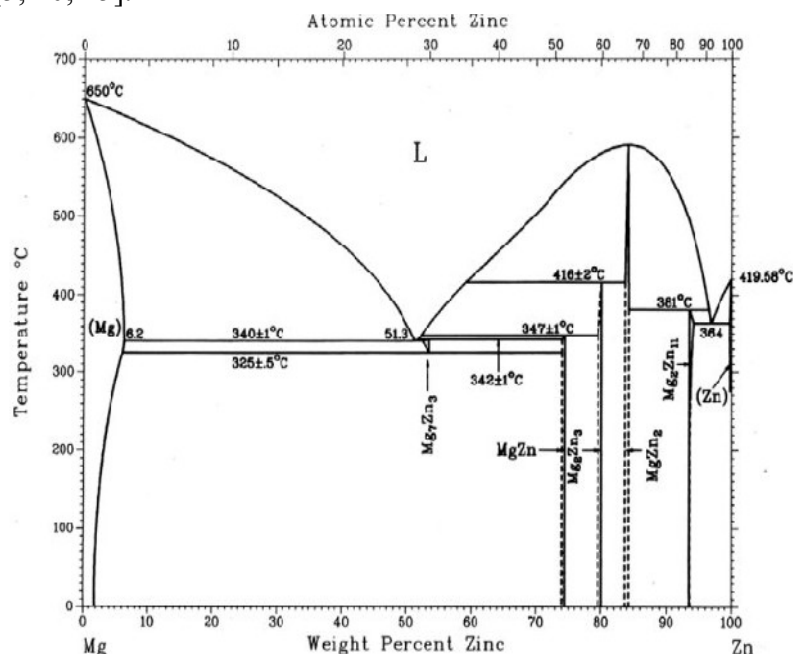
Binární diagram Mg-Al je uveden na obr. 3.2. Mikrostruktura odlité slitiny se skládá z tuhého roztoku a fází γ ($Mg_{17}Al_{12}$), která se vylučuje po hranicích zrn, $Mg_{21}(Al, Zn)_{17}$ a vměstcích na bázi AlMn (Al_4Mn , $Al_{11}Mn_4$, Al_8Mn_5 , AlMn) [12]. Intermetalická fáze γ se vyznačuje malou teplotní stabilitou a v procesu tváření a přidavných tepelných zpracování dochází k jejímu postupnému rozpouštění do tuhého roztoku. U tvářených slitin hořčíku se tak ve struktuře nachází tuhý roztok, vměstky na bázi manganu, velmi malý podíl fáze γ , velikost zrna se výrazně zmenšuje [13].



Obr. 3.2 Binární diagram Mg-Al [5]

Weight percent magnesium – hm. procenta hořčíku, temperature – teplota, atomic percent magnesium – at. procenta hořčíku

- Mg-Zn-Zr-RE.** Prvky vzácných zemin vytvářejí na hranicích zrn substitučního tuhého roztoku nízkotavitelné eutektikum, které je podle [14] tvořeno T-fází Mg_7Zn_3RE (ortorombická mřížka) a $Mg_{12}RE$. Toto eutektikum potlačuje mikroporozitu, takže tyto slitiny mají dobrou slévatelnost. Uvnitř zrn se může nacházet nerozpuštěný Zr. Pokud se nechají uměle vystárnout, vyprecipitují uvnitř zrn drobné precipitáty na bázi ZnZr, které společně s fázemi na hranicích zrn zvyšují creepovou odolnost. Slitina EZ33 si zachovává dobré pevnostní charakteristiky až do teplot 250 °C. Přidané zirkonium zjemňuje zrno, proto jsou např. slitiny ZE41 vhodné k odlévání a po vystárnutí mají střední pevnost, slitina ZE10 je pak doporučována ke tváření [5, 10, 15].



Obr. 3.3 Binární diagram Mg-Zn [5]

Atomic percent Zinc – at. procenta zinku, temperature – teplota, weight percent zinc – hm. procenta zinku.

V případě tvářených slitin ZE41 a ZE10 dochází k přeměně diskontinuální fáze β na drobné částice, nerozpuštěný Zr může být částečně zachován. Binární diagram Mg-Zn je uveden na obr. 3.3 [14, 15].

- **Mg-Al-Si.** Creepové vlastnosti mohou být zlepšeny snížením obsahu hliníku a přidáním křemíku. Tím dojde ke snížení množství fáze $Mg_{17}Al_{12}$. Křemík tvoří s hořčíkem velmi tvrdou fázi Mg_2Si , která precipituje na hranicích, ale která má sklony k hrubnutí. Toto nežádoucí chování lze potlačit přidáním 0,1 % Ca. Slitiny AS21 a AS41 byly úspěšně aplikovány u motorů modelu Volkswagen Beetle.
- **Mg-Al-RE.** Tyto slitiny se používají hlavně za zvýšených teplot. Vyrábí se výhradně odléváním a je nutné zajistit rychlé ochlazení odlitku, aby docházelo k precipitaci jemné fáze $Al_{11}RE_3$. Bylo pozorováno, že během creepu dochází k formování fáze Mg_2Ce , která brání pokluzu po hranicích zrn. Za vyšších teplot (okolo 175 °C) dochází ale k rozkladu fáze $Al_{11}RE_3$ na Al_2RE , čímž dojde k uvolnění hliníku a ke vzniku daleko měkčí fáze $Mg_{17}Al_{12}$.
- **Mg-Zn-Cu.** Studie ukazují, že přidání mědi do binárního systému Mg-Zn zvyšuje tvářitelnost a účinky precipitačního vytvrzení. Vyšší koncentrace mědi zvyšuje eutektickou teplotu, což umožňuje použít vyšší teploty pro rozpouštěcí žíhání a dosáhnout tak většího rozpuštění zinku a mědi. Po vystárnutí (180-200°C/16-24h.) se ve struktuře vyskytují dva druhy precipitátů β'_1 a β'_2 .
- **Mg-Zn-Zr.** Slitiny legované zirkoniem mají jemnější zrna, proto jsou vhodné jak pro odlévání (např. ZK51, ZK61), tak pro tváření (např. ZK21, ZK31, ZK40). Protože vyšší obsah zinku zhoršuje svařitelnost hořčíkových slitin a pro jejich sklon k vyšší mikroporozitě, je jejich praktické využití omezené [5, 7, 10].

3.1.2 Značení hořčikových slitin

Značení podle ASTM

Norma American Society for Testing and Materials je pro označování hořčikových slitin nejpoužívanější. Skládá se z čtyř částí:

1. Na prvních dvou místech je písmenné označení dvou hlavních legujících prvků (tab. 3.1)
2. Procentuální obsah dvou hlavních legujících prvků zaokrouhlen na celá čísla
3. Doplňující označení, rozlišující slitiny se stejným množstvím hlavních legur, ale rozdílným obsahem ostatních prvků (X pro slitiny ve vývoji)
4. Druh tepelného zpracování (tab. 3.2) [5, 7]

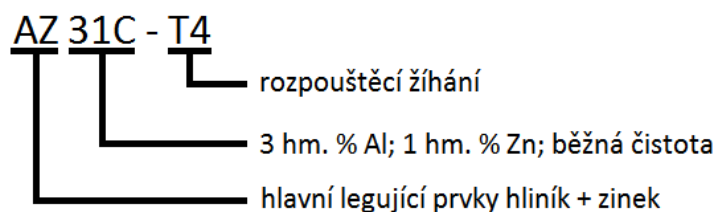
Tab. 3.1 Písmenné označení hlavních legujících prvků [7]

Písmenné označení	A	C	E	H	K	L	M	Q	S	W	Z
Legující prvek	Al	Cu	RE	Th	Zr	Li	Mn	Ag	Si	Y	Zn

Tab. 3.2 Označení použitého tepelného zpracování [7]

F	Dle výroby	T1	Ochlazení a přirozené stárnutí
O	Žihání, rekrytalizace (tvářené slitiny)	T2	Žihání (pouze odlitky)
H	Deformační zpevnění	T3	Rozpouštěcí žihání a deformace za studena
T	Tepelně zpracováno-dosaženo jiného stavu než F, O,H	T4	Rozpouštěcí žihání
W	Rozpouštěcí žihání	T5	Ochlazení a umělé stárnutí
H1	Deformační zpevnění	T6	Rozpouštěcí žihání a umělé stárnutí
H2	Deformační zpevnění a částečné žihání	T7	Rozpouštěcí a stabilizační žihání
H3	Deformační zpevnění a stabilizační žihání	T8	Rozpouštěcí žihání, deformace za studena a umělé stárnutí
		T9	Rozpouštěcí žihání, umělé stárnutí a deformace za studena
		T10	Ochlazení, umělé stárnutí a deformace za studena

Příklad značení hořčikové slitiny dle normy ASTM:



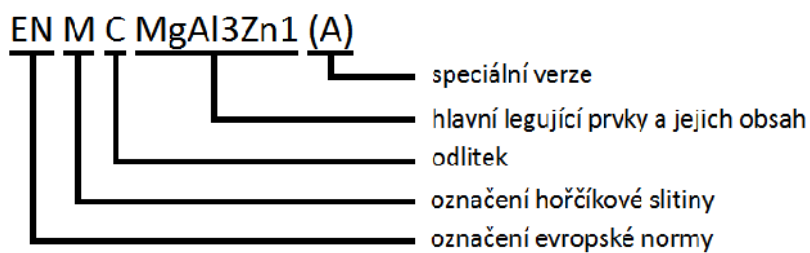
Značení podle EN

Značení hořčkových slitin podle EN norem bylo převzato z norem německých (DIN).

Skládá se z pěti částí:

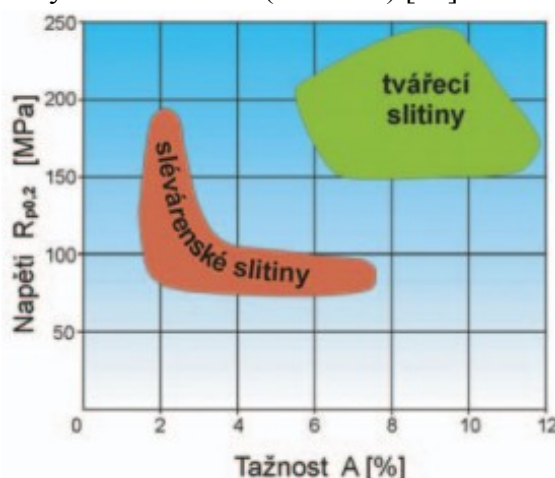
1. Označení normy
2. Označení hořčkové slitiny
3. Druh polotovaru (C-odlitek; B-ingot)
4. Hlavní legující prvky a jejich procentuální množství
5. Příp. označení speciální verze slitiny (A) [7]

Příklad značení hořčkové slitiny dle normy EN:



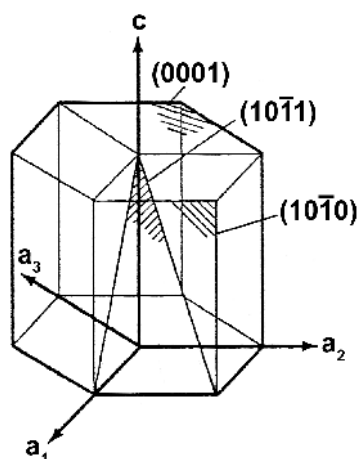
3.1.3 Technologie tváření hořčíkových slitin

Podle statistiky firmy IMA tvořil v roce 2002 podíl tvářených slitin hořčíku pouze 2,5 % z celkového množství vyrobeného hořčíku (pro srovnání – u slévárenských slitin je to 35 %). Slévárství umožňuje výrobu složitých odlitků, které ale proti tvářeným slitinám disponují horšími mechanickými vlastnostmi (obr. X.X) [16].



Obr. 3.4 Mechanické vlastnosti slévárenských a tvářecích slitin [16]

Hořčík krystalizuje v hexagonální soustavě, což činí jeho tváření za studena obtížným. Za pokojové teploty jsou aktivní pouze dva skluzové systémy: primární v rovině (0001) a ve směru $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ a sekundární v rovinách $\{10\bar{1}0\}$ a směrech $\langle 11\bar{2}0 \rangle$. Při zvýšených teplotách (nad 250 °C) se aktivuje třetí skluzový systém v rovinách $\{10\bar{1}1\}$ ve směru $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ (obr. 3.5). Pokud je skluz dislokací obtížný, nastává deformace dvojčatením (v rovinách $\{10\bar{1}2\}$ a směrech $\langle 10\bar{1}1 \rangle$). Děje se tak za nízkých teplot tváření nebo vysokých rychlostech deformací. Velikost deformace mřížky při tvorbě dvojčat je malá, tj. celková deformace produkovaná dvojčatením není výrazná. Hlavní přínos dvojčatení je změna orientace části mřížky. Tím může nastat lepší orientace skluzového systému vůči aplikovanému napětí a dojít ke skluzu. S rostoucím podílem legujících prvků se tvářitelnost ještě zhoršuje [5, 17, 18].



Obr. 3.5 Skluzové roviny v hexagonální mřížce [5]

Zlepšení tvářitelnosti lze dosáhnout volbou vhodného technologického postupu (tváření za tepla, tváření za všestranného tlaku), změnou chemického složení (snížení obsahu legujících prvků), příp. změnou krystalické struktury. Zmenšením velikosti zrna hořčíkové slitiny na rozměry 50-200 μm a se vytvoří jemnozrná a homogenní struktura a významným

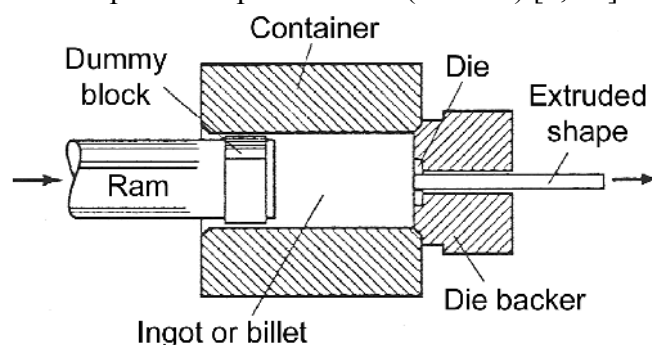
způsobem se zvýší tvářitelnost materiálu. Takové struktury můžeme dosáhnout např. výrobou slitin pomocí práškové metalurgie, ECAPem, protlačováním za tepla, příp. válcováním za tepla s rekrytalizačním žiháním. Tváření se nejčastěji provádí za teplot 200-350 °C, kdy dojde k aktivaci třetího skluzového systému [16, 19].

Kování

Možnost kování hořčíkových slitin je dána několika fyzikálními faktory – velikostí zrna, teplotou solidu a rychlostí deformace. Obvykle se kovací teploty pohybují 55 °C pod teplotou solidu. Je snahou kování co nejvíce zkrátit, protože při dlouhé výdrži na vysoké teplotě dochází k hrubnutí zrna. Nejčastěji se pro kování používají hydraulické lisы nebo pomaloběžné mechanické lisы, kování bucharem se, pro větší pravděpodobnost vzniku trhlin, nepoužívá. Z důvodu vysoké tepelné vodivosti hořčíkových slitin je nutný přehřev zápusťky na teplotu jen o málo nižší, než je teplota kovací. Výkovky se tepelně nezpracovávají, výjimečně se nechají uměle vystárnout [5, 16].

Protlačování

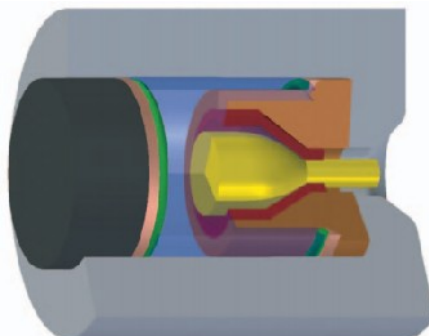
Tváření hořčíkových slitin metodou protlačování je opět závislé na použité teplotě (pohybuje se v rozmezí 300-450 °C) a rychlosti deformace. Vyrábět lze jak polotovary, které budou dále zpracovávány, tak finální profily (duté, plněné). Pro protlačování hořčíkových slitin se nejčastěji používá dopředného protlačování (obr. 3.6) [5, 16].



Obr. 3.6 Schéma dopředného protlačování [5]

Container – zásobník, dummy block - čelní nástroj, ram - píst, ingot or billet – ingot nebo polotovar, die – forma, die backer – vyztužení formy, extruded shape – protlačený tvar.

Speciálním postupem je pak protlačování hydrostatické (obr. 3.7). Při něm je přímý kontakt mezi průtlačníkem a materiálem nahrazen kapalinou, která působí na volný povrch tvářené součásti. Tvářený polotovar je přehřán na teplotu 250-350 °C a vložen do zásobníku s kapalinou. Pohyb pístu přenáší tlak na nestlačitelnou kapalinu, která tlačí materiál přes tvářecí dutinu. Výhodou této metody je eliminace tření mezi průtlačníkem a výrobkem, laminární tečení materiálu a rozměrová přesnost. Nevýhodou je, že vysokotlaká kapalina ulpívá na povrchu výrobku a je třeba ji po tváření odstranit [16].



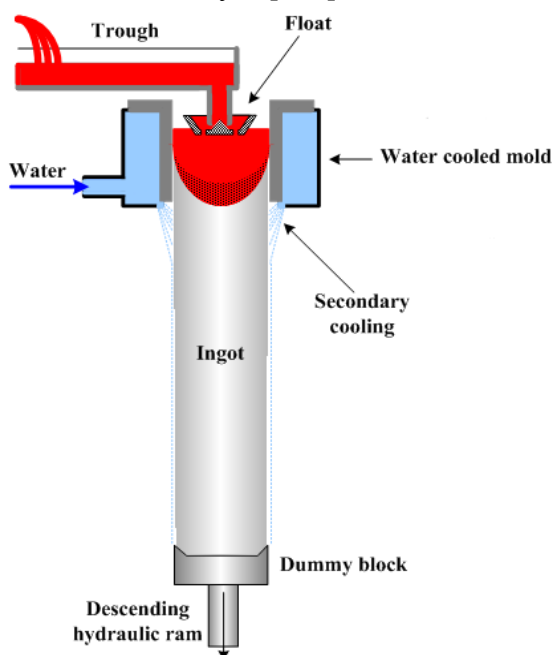
Obr. 3.7 Schéma hydrostatického protlačování [16]

Válcování

Hořčíkové plechy jsou velmi perspektivní materiál pro výrobu např. automobilové karoserie a dalších součástí. Pro zachování stejné pevnosti v ohybu jako při použití oceli je sice potřeba plech o tloušťce 1,7krát větší, ale finální úspora hmotnosti je celých 62 %. Rozšíření používání hořčíkových slitin brání jejich náročnější výroba ve srovnání s oceli či hliníkovým slitinami a s tím spojené vyšší náklady na výrobu a vyšší konečná cena [19].

Dříve se hořčíkové plechy válcovaly rovnou z odlitého kovu. Někdy byl odlitek nejprve protlačen anebo prokovan v lisu za účelem změny struktury po odlití. Dnešní metodám válcování předchází tepelné zpracování odlitku [6].

Jedním z moderních způsobů výroby hořčíkových plechů je tváření z ingotů odlitých metodou Direct Chill Casting (obr. 3.8). Jedná se o vertikální semi-kontilitu používané pro neželezné kovy. Principem je odlévání roztaveného kovu do vodou chlazené formy, kde dochází k vytvoření pevné licí kůry. I když dochází k prudkému ochlazení odlévaného kovu, je průměrná velikost zrna v odlitku poměrně velká (v závislosti na licích podmínkách a velikosti odlitku). Hořčíkový ingot se odlévá na rozměr 30×100×200 cm. Dále následuje homogenizační žihání (u slitiny AZ31 při teplotě 480 °C) a několikanásobně válcování za tepla na tloušťku 6 mm. Válce jsou lubrikovány kapalinou za účelem snížení množství ulpívajících oxidů, které vznikají vlivem vyšší teploty tváření. Po dokončení prvního stupně válcování dochází k novému ohřevu desky na teploty 315-370 °C, vyžihání a dokončovacímu válcování na požadovaný rozměr. Pokud je potřeba dosáhnout tloušťky méně než 2 mm, je do operace zařazován dodatečný ohřev. Celkem je zapotřebí okolo 12-18 průchodů a 2-3 ohřevy. To činí válcování hořčíku finančně náročným [5, 6].

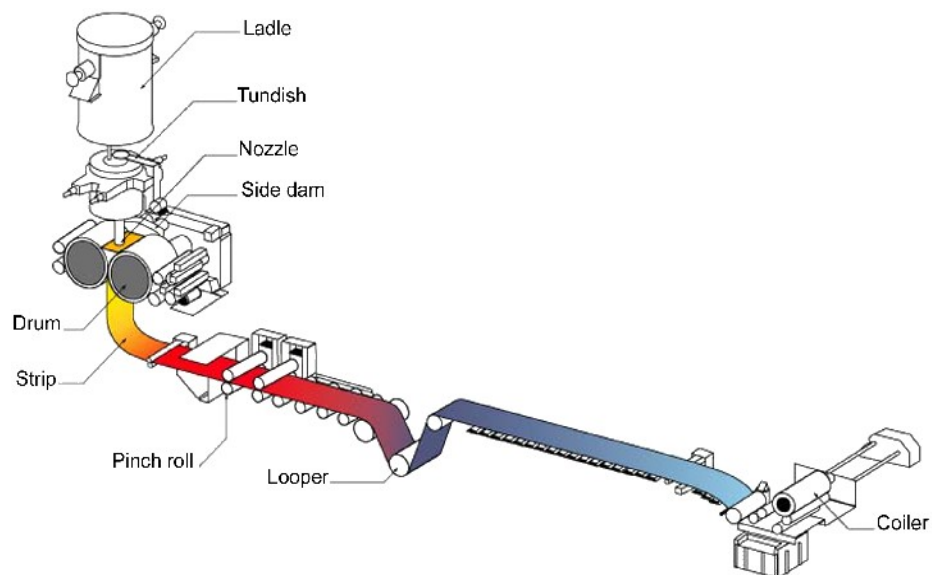


Obr. 3.8 Schéma metody Direct Chill Casting [20]

Trough - pánev, float - , water - voda, water cooled mold – vodou chlazená forma, secondary cooling- sekundární chlazení, ingot – ingot, dummy block – neprůchodná forma, descending hydraulic ram – klesající hydraulické rameno

Nejmodernějším způsobem výroby hořčíkových plechů je tzv. Strip Casting (obr. 3.9). Výhodou je redukce počtu průchodů ingotu válcovací stolicí. Hořčík ve formě plechu je získáván přímo z taveniny, která je pod ochranou atmosférou lita mezi dva válce (metoda Twin-Roll Casting) a po této operaci je tloušťka plechu 3-8 mm. Následuje dokončující válcování, které snižují tloušťku plechu až na požadovaný rozměr. Rychlost ochlazování taveniny mezi válci dosahuje hodnot až několik tisíc stupňů za sekundu a umožňuje nám tak

dosáhnout jemnozrné struktury a snížit heterogenitu materiálu. Ve speciálních případech je dosaženo takové struktury, že materiál se při zvýšených teplotách chová superplasticky [6, 10, 19].



Obr. 3.9 Schéma metody výroby plechů Strip casting. [21]

Ladle – lící pánev, tundish – mezipánev, nozzle – lící tryska, side ram – boční píst, drum – válec, strip – plech, pinch roll – přitlačný a unášení válec, looper – zatahovací válec, colier - navíječ

3.2 SVAŘOVÁNÍ HOŘČÍKOVÝCH SLITIN

3.2.1 Svařitelnost hořčíku, základní metody

Hořčík a jeho slitiny mají specifické fyzikální a chemické vlastnosti, které významně ovlivňují svařitelnost materiálu. Jedná se o nízkou teplotu tavení a varu (pro čistý hořčík 649 °C resp. 1107 °C), nízké povrchové napětí, vysoký koeficient tepelné vodivosti ($156 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ v případě čistého hořčíku, který se ale s množstvím a druhem legur významně mění: pro AZ61 = $79 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, AZ31 = $84 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, ZE41 = $113 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a vysoký koeficient teplotní roztažnosti ($26 \times 10^{-6} \text{ K}$). Tyto vybrané vlastnosti jsou podobné hliníkovým slitinám, proto jsou podmínky pro svařování prakticky totožné [5, 22-24].

Hořčík je velmi reaktivní kov, slučuje se s kyslíkem a zvláště za vysokých teplot dochází k vysoké rychlosti oxidace. Teplota tavení oxidů na povrchu materiálu je vyšší, než teplota tavení hořčíku, a proto je nutné ji před svařováním odstranit a svařovat v inertní atmosféře (argon, helium). Z důvodu vysoké tepelné vodivosti hořčíkových slitin je pro jejich svařování nutné používat zdroj o velmi vysokém výkonu, což může vést k nadměrnému hrubnutí zrna. Vysoká tepelná vodivost má dále za následek vznik teplotních napěťových polí, které mohou vést k deformaci svarového spoje. Přítomnost nízkotavitelných eutektik, které se formují na hranicích zrn, zvyšuje náchylnost k trhlinám za tepla. Po svařování je doporučeno provést tepelné zpracování pro snížení vlastní vnitřní napjatosti, čímž dojde ke zvýšení korozní odolnosti svarů [5, 23].

Obecně jsou pro svařování vhodnější slitiny tvářené. Slitiny Mg-Al-Zn s obsahem hliníku do 10 % jsou pro svařování vhodné, protože přísadou hliníku lze zjemnit mikrostrukturu. Obsah zinku nad 5-6 % svařitelnost hořčíkových slitin zhoršuje, protože zvyšuje náchylnost ke vzniku staženin [23, 25].

Pro svařování hořčíkových slitin lze použít většinu konvenčních (TIG, odporové svařování) i nekonvenčních svařovacích metod (svařování výbuchem, ultrazvukové svařování, elektronový paprsek, laserový paprsek, Friction Stir Welding). Svařování metodou TIG má řadu nevýhod: malé rychlosti svařování, vysoká vnitřní napjatost, poměrně velký propal prvků. Tato metoda se používá na opravu odlitků nebo pro svařování materiálu určených pro nenáročné aplikace. Odporové svařování se nejvíce využívá v automobilovém průmyslu. Je velmi citlivé na stav povrchu a před samotným svařováním je nutné důkladně odstranit ze svařovaného materiálu oxidickou vrstvu [1, 26].

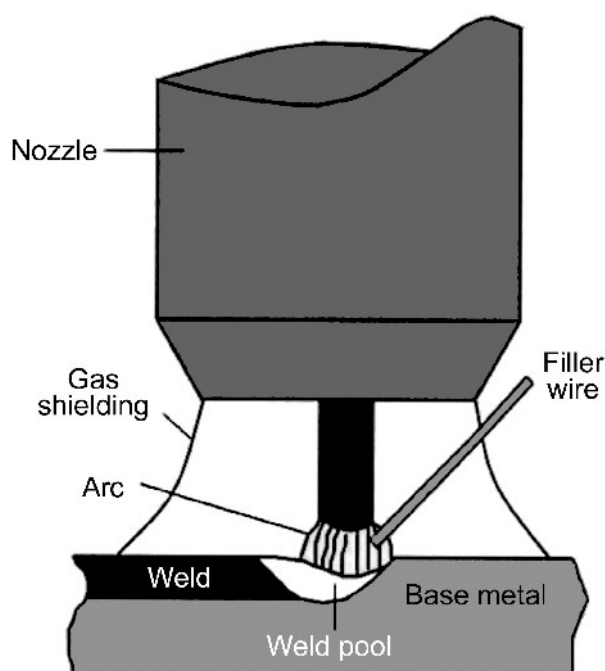
Vysokoenergieové metody (laserový a elektronový paprsek) jsou charakteristické vysokou hustotou energie, nízkým výkonem a velkou rychlostí ochlazování svařeného materiálu, které má za následek jemnozrnnou strukturu svaru. V posledních letech se zvláště v souvislosti se svařováním lehkých slitin kovů začíná rozvíjet metoda Friction Stir Welding. Svary mají vysokou pevnost v tahu, plynoucí z nižší svařovací teploty [2, 27].

3.2.2 Svařování metodou TIG

Metoda TIG je pravděpodobně nejrozšířenější metodou pro svařování hořčíkových slitin. Její výhodou je cena, rychlost svařování a univerzálnost. Je možné svařovat materiál tlouštěk 0,5-9,375 mm. Při správně provedeném svaru lze dosáhnout meze pevnosti až 90% hodnoty základního materiálu [22, 28, 29].

Svařování hořčíkových slitin metodou TIG (obr. 3.10) je podobné svařování jako u slitin hliníku. Používá se buď střídavého proudu (AC) nebo stejnosměrného proudu – elektroda pozitivní (DCEP). Při obou těchto procesech bombardují pozitivní ionty povrch svařovaného materiálu a tím odstraňují nežádoucí oxidickou vrstvu. Nevýhodou DCEP je nízká penetrační schopnost, proto je daleko rozšířenější svařování střídavým proudem [30].

Elektrický oblouk při svařování vzniká mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem za použití ochranného plynu. Inertní plyn ochraňuje elektrodu, oblouk i svar od nežádoucích vlivů okolní atmosféry. Metodou TIG lze svařovat jak bez přídavného materiálu, tak i s přídavným materiálem, který je do elektrického oblouku přidáván automaticky nebo manuálně [30].

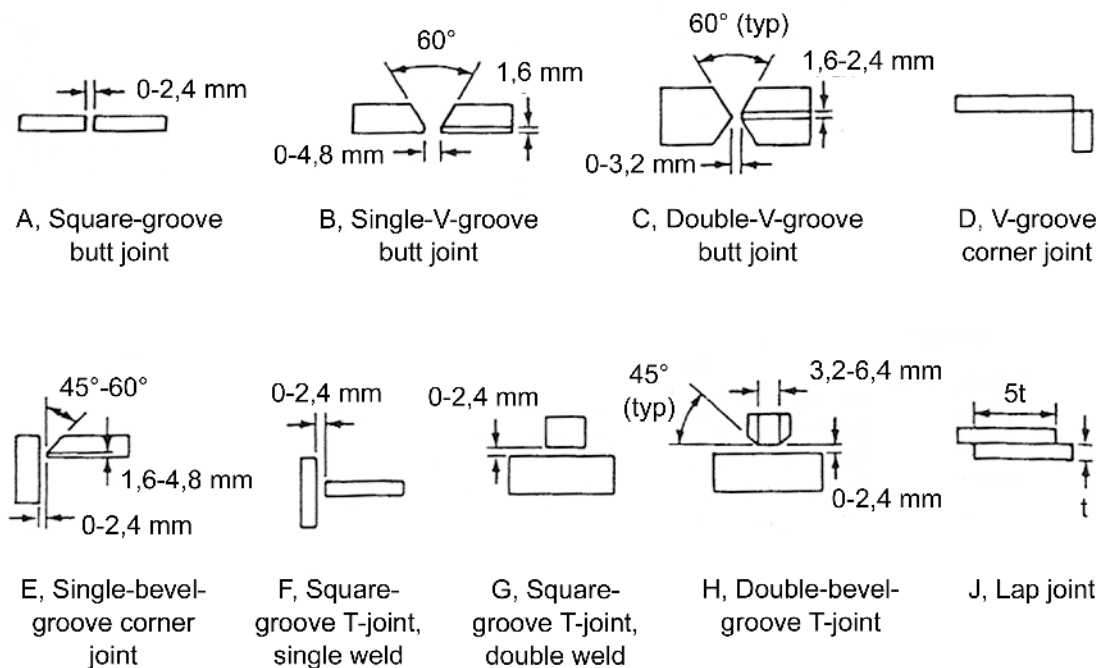


Obr. 3.10 Schéma svařování metodou TIG [30]

Nozzle – tryska, filler wire – přídavný materiál, gas shielding – ochranný plyn, arc – oblouk, weld – svar, base material – základní materiál, weld pool – tavná oblast svaru

Parametry svařování

Typické konfigurace pro svařování metodou TIG jsou tupé, rohové a 'T' spoje. Vzhled spojů svařovaných materiálů je uveden na obr. 3.11. Použití jednotlivých typů závisí na tloušťce materiálu a způsobu svařování (DCEP, AC) [5].



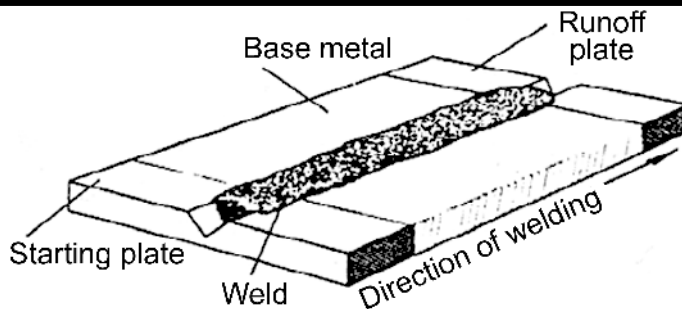
Obr. 3.11 Typy svarových spojů slitin hořčíku [31]

Square-groove butt joint – tupý spoj (čtvercová drážka), single-V-groove butt joint – tupý spoj (jednostranná V drážka), double-V-groove butt joint – tupý spoj (oboustranná V drážka), V-groove corner joint – rohový spoj (V drážka), single-bevel-groove corner joint – rohový spoj (jednostranný šikmý spoj), square-groove T-joint, single weld – svar ve tvaru T (čtvercová drážka), jednoduchý svar, square-groove T-joint, double weld – svar ve tvaru T (čtvercová drážka), dvojitý svar, double-bevel-groove T-joint – svar ve tvaru T (oboustranný šikmý spoj), lap joint – svar s přesahem

Pro svařování se používá podkladová deska, která je vyrobena nejčastěji z nízkouhlíkové oceli, korozivzdorné oceli, slitin hořčíku, hliníku nebo mědi a její funkcí je kontrola hloubky průniku svaru a odvod tepla. Uprostřed desky je vyfrézovaná drážka, která koresponduje s dráhou svarového spoje. Doporučené hloubky drážek v závislosti na tloušťce použitého materiálu jsou uvedeny v tab. 3.3. Pro minimalizaci rizika praskání svaru lze použít přídavné destičky na začátek a konec svarového spoje. (obr. 3.12) [5, 29].

Tab. 3.3 Doporučená volba hloubky drážky podkladové desky [31]

Tloušťka základního materiálu [mm]	0,64	1,02	1,6	2,29	3,18	4,06	4,83	6,35	9,53
Hloubka drážky [mm]	0,38	0,51	0,64	0,76	0,76	1,02	1,02	1,27	1,52



Obr. 3.12 Doporučené uspořádání svarové plochy pro prevenci trhlin ve svarovém spoji [5]
Runoff plate – koncová deska, base metal – základní materiál, starting plate – startovní deska, weld – svar, direction of welding – směr svařování.

Povrch materiálu musí být před svařováním zbaven všech povrchových úprav (oxidické nebo chromátové vrstvy) a nečistot (olej, lubrikanty). Povrch musí být odmaštěn pomocí rozpouštědel s následným finálním mechanickým čištěním povrchu – pomocí hliníkové nebo ocelové vlny nebo abrazivem na bázi oxidu hlinitého. Alternativou je chemické čištění pomocí alkálií, které odstraní zbytek mastnoty a konverzní chromátový povlak. Očištěn musí být také případný přídavný materiál ve formě drátu. V případě rohových svarů musí být kladen důraz na odstranění otřepů, olej a dalších nečistot v oblastí rohů [5, 22].

Při opravě nebo svařování odlitků se často používá předehřevu. U všech masivnějších odlitků je předehřev nutný, pro drobnější odlitky nebo jejich částí (nebo slitin s vysokým obsahem zinku) se předehřev používá v rámci prevence výskytu trhlin [5, 22].

Svařování metodou TIG se nejčastěji uskutečňuje s přídavným materiálem. Jako nejvhodnější se jeví použití přídavného materiálu ze stejné slitiny, která je svařována nebo se používají slitiny uvedené v tab. 3.4. Pro svařování tvářených hořčikovými slitin je doporučována slitina ER AZ61A, která se vyznačuje větší odolností vůči vzniku trhlin [5, 22].

Tab. 3.4 Přídavný materiál pro obloukové svařování hořčikovými slitin [31]

FILLER METAL	COMPOSITION, WT%											MG
	Al	Be	Mn	Zn	Zr	Rare earth	Cu	Fe	Ni	Si	OTHERS (TOTAL)	
ER AZ61A	5.8-7.2	0.0002-0.0008	0.15 MIN	0.40-1.5	...	...	0.05 MAX	0.005 MAX	0.005 MAX	0.05 MAX	0.30 MAX	BAL
ER AZ101A	9.5-10.5	0.0002-0.0008	0.13 MIN	0.75-1.25	...	...	0.05 MAX	0.005 MAX	0.005 MAX	0.05 MAX	0.30 MAX	BAL
ER AZ92A	8.3-9.7	0.0002-0.0008	0.15 MIN	1.7-2.3	...	...	0.05 MAX	0.005 MAX	0.005 MAX	0.05 MAX	0.30 MAX	BAL
ER EZ33A	...	...	...	2.0-3.1	0.45-1.0	2.5-4.0	...	...	...	...	0.30 MAX	BAL

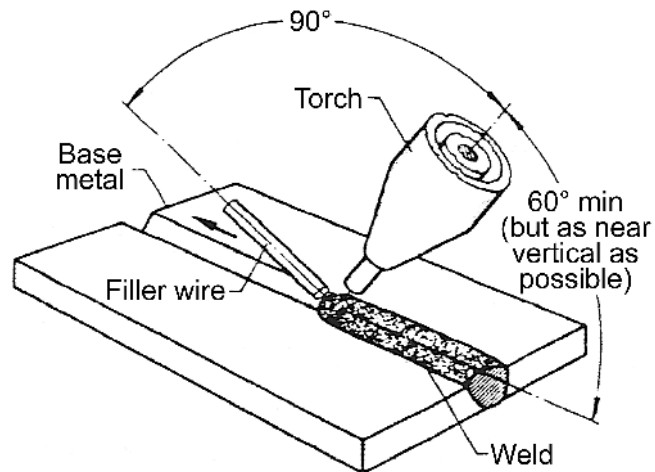
Z důvodu vysoké afinity hořčíku ke kyslíku, je nutné svařovat hořčikové slitiny v atmosféře vysoce čistých inertních plynů. Nejčastěji se využívá argon, pro masivnější svařence je vhodné používat helium [5, 23].

Svařování se uskutečňuje pomocí stejnosměrného nebo střídavého proudu. Pro materiál o tloušťce větší než 4,8 mm se používá výhradně střídavý proud, kvůli větší penetraci do materiálu. Elektroda je vyrobena z čistého wolframu, nejčastěji se pro svařování hořčikovými slitin používá průměry 0,25-6,35 mm [29].

Nastavení podmínek pro svařování hořčikovými slitin je uvedeno v tab. 3.5. Pro nejlepší výsledky by měla být elektroda umístěna ve vzdálenosti 0,8 mm od svaru a nemělo by docházet k přerušování svařování. Doporučené umístění elektrody, přídavného materiálu a svařovaného materiálu je zobrazeno na obr. 3.13 [5].

Tab. 3.5 Přehled doporučených svařovacích podmínek pro slitiny hořčíku [5]

Tloušťka základního materiálu [mm]	Vzhled svaru	Počet průchodů	Průměr elektrody [mm]	Střídavý proud [A]	Průtok argonu m ³ /h	Průměr přídavného materiálu [mm]	Spotřeba přídavného materiálu [kg/m]
1,02	A	1	1,6	35	0,34	2,4	0,01
1,6	A	1	2,4	50	0,34	2,4	0,01
2,03	A	1	2,4	75	0,34	2,4	0,01
2,54	A	1	2,4	100	0,34	2,4	0,01
3,18	A	1	2,4	125	0,34	3,2	0,01
4,83	A	1	3,2	160	0,42	3,2	0,02
6,35	B	2	4	175	0,57	3,2	0,04
9,53	B	3	4	175	0,57	4	0,09
9,53	C	2	4,8	200	0,57	3,2	0,04
12,7	C	2	4,8	250	0,57	3,2	0,07



Obr. 3.13 Konfigurace metody TIG pro spojování dvou hořčikových slitin [5]
 Torch - hořák, 60° min (but as near vertical as possible) – 60° minimálně (ale co nejvíc vertikálně je možné),
 base metal – základní materiál, filler wire – přídavný drát, weld – svar.

V případě tvářené hořčikové slitiny AZ61 svařované metodou TIG lze využít poznatků publikovaných v literatuře [28, 32].

V [32] byly svařeny desky ze slitiny AZ61 o tloušťce 2 mm s pomocí přídavného materiálu AZ91 na podkladové desce ze slitiny mědi. Povrch byl očištěn acetonem a svařovací podmínky byly zvoleny: svařovací napětí $U=20$ V, průtok argonu 5 l/min, rychlost svařování $v=15$ mm/s a svařovací proud $I=60$ A; 75 A; 90 A; 105 A

Nejvyšších tvrdostí svařovaného materiálu bylo dosaženo při použití nejmenšího svařovacího proudu. S rostoucím proudem roste i množství vstupního výkonu, dochází k růstu zrn a hrubnutí precipitátů β - $Mg_{17}Al_{12}$. [32].

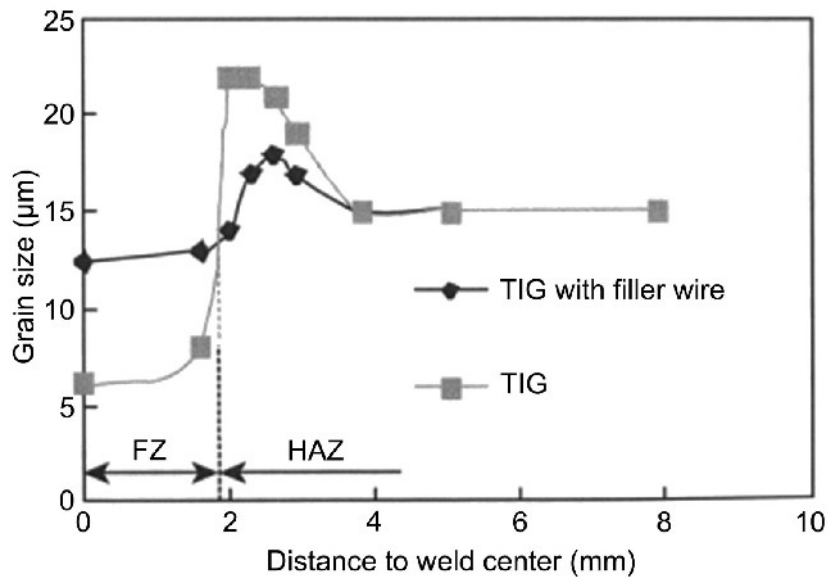
Autoři Dong Min, Jun Shen, Shiqiang Lai a Jie Chen v článku [28] provedli svařování slitiny AZ61 o tloušťce 3 mm na podkladové desce ze slitiny mědi s drážkou o šířce 6 mm a hloubce 1,5 mm. Pro svařování byl použit střídavý proud a byly zvoleny parametry: svařovací napětí $U=10$ V, průtok argonu 10 l/min, rychlost svařování $v=10$ mm/s a svařovací proud $I=70$ A; 80 A; 86 A; 90 A; 100 A.

Při nejnižším použitém svařovacím proudu došlo k poklesu meze pevnosti materiálu až na hodnotu 43 % základního materiálu. To bylo způsobeno nedostatečnou penetrací svařovacího paprsku, tj. přítomností defektů. Nejlepších výsledků autoři dosáhli při svařovacím proudu 90 A, kdy došlo k poklesu mechanických vlastností pouze o 10 %. S rostoucím vstupním výkonem však dochází k vypařování zinku ($T_v=1023$ K), který je hlavním činitelem zpevnění v hořčikových slitinách. Proto při vysokých svařovacích proudech dochází k poklesu mechanických vlastností svařence a je tedy nutné nalézt ideální podmínky pro danou konfiguraci [28].

Struktura a vlastnosti svarových spojů

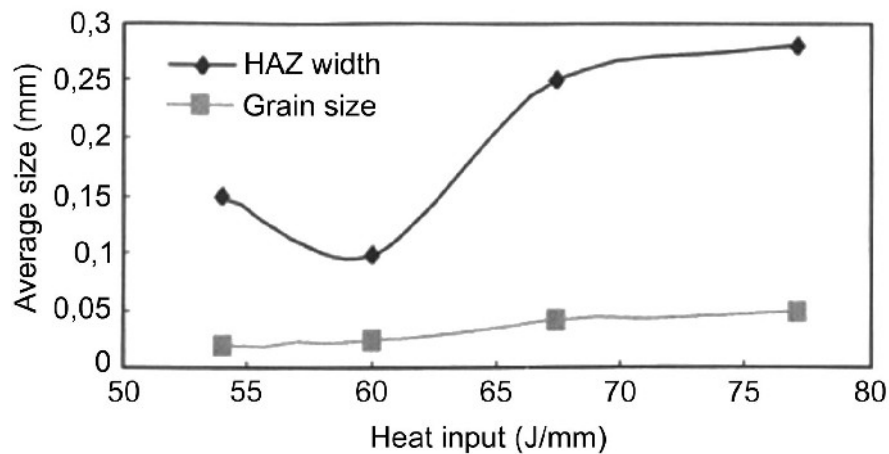
Svarový spoj hořčikových slitin zhotovený metodou TIG se skládá ze tří hlavních oblastí – tavné oblasti (fusion zone - FZ), tepelně ovlivněné oblasti (heat affected zone - HAZ) a oblasti základního materiálu (base material – BM).

Tavná oblast se vyznačuje malou velikostí zrna (obr. 3.14), která se v tepelně ovlivněné oblasti prudce zvyšuje. Při použití přídavného materiálu nedochází k takovému zhrubnutí zrn. To je dáno tím, že se přidáváním drátu snižuje stupeň přehřátí materiálu a množství energie přenesené z tavné oblasti do tepelně ovlivněné zóny. Obecně je průměrná velikost zrna ve svarovém spoji malá z důvodu vysoké tepelné vodivosti hořčiku [30].



Obr. 3.14 Porovnání velikosti zrn metodou TIG s a bez přídavného materiálu [30]
 Grain size – velikost zrn, TIG with filler wire – TIG s přídavným materiálem, distance to weld center – vzdálenost od osy svaru.

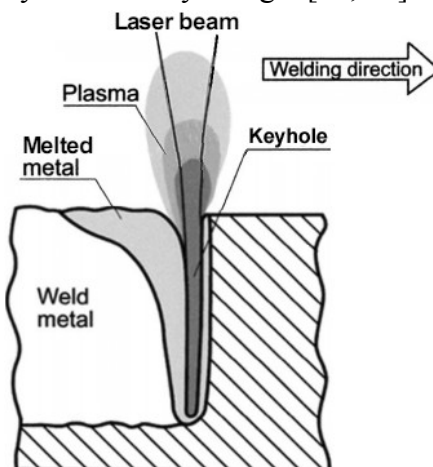
Mikrostrukturu tepelně ovlivněné oblasti lze ovlivnit množstvím tepla přivedeného do svarového spoje. Závislost velikosti zrn a šířky tepelně ovlivněné oblasti na vstupním výkonu je uvedena na obr. 3.15 [30].



Obr. 3.15 Závislost šířky HAZ a velikosti zrna na vstupním výkonu, slitina AZ31B o tl. 1,7 mm [30]
 Average size – průměrná velikost, HAZ width – šířka HAZ, grain size – velikost zrn, heat input – vstupní výkon.

3.2.3 Svařování laserovým paprskem

Počátek použití laseru pro technologické aplikace vychází z vynálezu prvních CO₂ a Nd:YAG laserů v období 60. let. V dalších letech dochází k prudkému rozvoji této technologie, obzvláště v oblasti pro svařování. Metoda svařování laserovým paprskem (obr. 3.16) využívá přirozenou koherenci laserového svazku, která dovoluje fokusaci na malou oblast a tím dosáhnout vysoké hustoty energie [31, 33].



Obr. 3.16 Konfigurace laserového svařování [34]

Laser beam – laserový svazek, welding direction – směr svařování, plasma – plasma, keyhole – paroplynová kapilára, melted metal – roztavený kov, weld metal – svařený kov

Na aktivní medium (nejčastěji plynná nebo pevná látka) působí energie budicího zařízení (většinou elektrický výboj). Molekuly aktivního media jsou excitovány a vyzařovaná energie zpětného přechodu do základní stavu je ve stejné fázi, jako budicí zařízení a tím vzniká koherentní svazek. Fokusace svazku je prováděna na nebo těsně pod povrch svařovaného materiálu. Energie svazku je tak velká, že dochází k ohřevu materiálu až na teplotu varu. Odpařením materiálu je vytvořena paroplynová kapilára (angl. keyhole), na jejíž stěnách se nachází roztavený kov. Uvnitř kapiláry jsou plyny odpařeného materiálu a ochranného plynu, které mají vyšší tlak než okolní atmosféra, tak udržují roztavený materiál na stěnách kapiláry. Volné elektrony odpařovaného kovu a ochranné atmosféry jsou urychlovány interakcí s laserovým svazkem, dochází ke srážkám s parami kovu a ochranného plynu, ionizaci a vzniku plasmatu. Toto plasma má sice větší absorpční schopnost než kov, ale zároveň rozptyluje a odráží laserový paprsek a není tak možné svazek fokusovat. Tyto dva faktory vedou k poklesu hustoty výkonu laseru. Dochází k střídání dvou módů svařování: kondukčního a metody kapilární, což má samozřejmě za následek nižší kvalitu svaru. Proto je přítomnost plasmatu v oblasti svaru nežádoucí. Odstraňuje se pomocí rychle proudícího ochranného plynu a/nebo použitím ochranného plynu s vysokou ionizační energií (helium namísto argonu). Ten také slouží jako ochrana svaru před oxidací. Protože pohyb laserového paprsku je velmi rychlý (10-50 m/min), ohřev materiálu je intenzivní a krátký. Formující se tepelně ovlivněná zóna je úzká a deformace materiálu zanedbatelné [33, 34, 35].

Laserový paprsek interaguje s povrchem materiálu a energie svazku je částečně materiálem odražena (E_r), odvedena (E_s) a absorbována (E_a) [35]:

$$E_0 = E_r + E_s + E_a \quad (1)$$

Absorbovaná energie je využívána k technologickým procesům. Absorpce roste s rostoucím elektrickým odporem materiálu, tj. s rostoucí teplotou materiálu. Při teplotě tavení kovu je absorpce laserového svazku 50-60 %, při teplotě varu až 90 %. Množství přivedené energie závisí na hustotě výkonu laserového svazku I [35]:

- $I < 10^4 \text{ W/cm}^2$: energie laseru je absorbována povrchem, ale nedochází k natavení materiálu. Toho se využívá při tepelném zpracování.
- $I = 10^4 \text{ W/cm}^2 \div 10^6 \text{ W/cm}^2$: dochází k natavování povrchu materiálu. Tento výkon se využívá pro povlakování nebo povrchové legování, příp. svařování tenkých polotovarů (kondukční svařování).
- $I = 10^6 \text{ W/cm}^2 \div 10^7 \text{ W/cm}^2$: energie absorbována materiálem vede k rychlému ohřevu materiálu až na teplotu varu. Tato metoda laserového svařování se nazývá metoda kapilární a používá se pro silnostěnné polotovary.
- $I > 10^7 \text{ W/cm}^2$: odpařování materiálu je velmi intenzivní, tj. tohoto výkonu se využívá pro laserové svařování [35].

CO₂, Nd:YAG a vláknový laser

Pro svařování se nejčastěji používají dva typy laserů: plynový (CO₂) a pevnolátkový (Nd:YAG). S rozvojem poznatků ve vláknové optice dochází k rozšiřování použití vláknových laserů.

Aktivní směs plynového laseru je tvořena z 50 % heliem, 40 % dusíkem a 10 % CO₂. Vlnová délka laserového svazku je 10,6 μm a neumožňuje tak přenos svazku pomocí optických kabelů. Proto se pro přenos a fokusaci svazku používají zrcadla. Výkon dosahuje hodnot až 30 kW a účinnost se pohybuje okolo 20-30 %, což je více než u laseru pevnolátkového. Proto je možné svařovat tloušťky až 26 mm. Nevýhodou plynového laseru je vyšší odrazivost laserového paprsku u některých kovů (hořčík, hliník, zlato, stříbro, měď). Pro svařování hořčíkových slitin je proto doporučováno používat laser pevnolátkový [34, 36, 37].

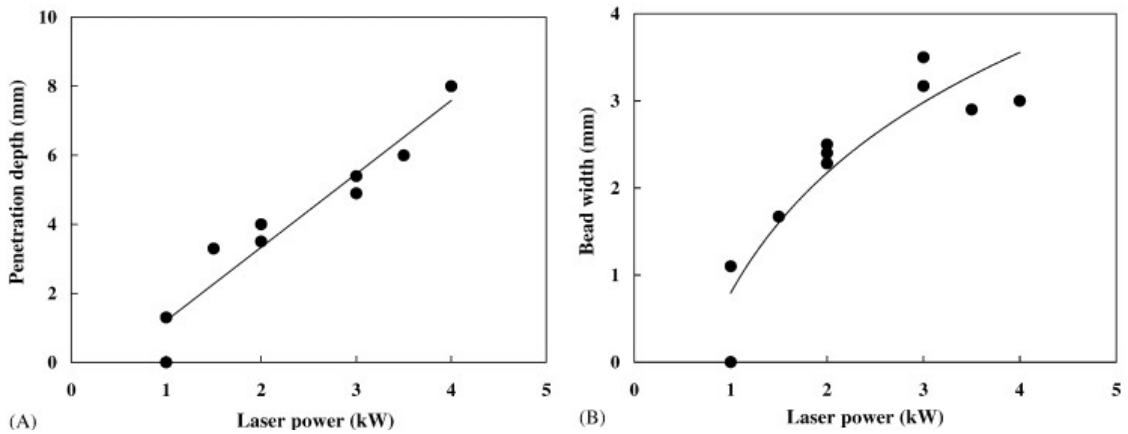
Aktivním médiem v pevnolátkovém laseru je krystal Y₃Al₅O₁₂ dopovaný Nd³⁺ (neodymem dopovaný granát hliníku a yttria). Výsledná vlnová délka laserová svazku je 1,06 μm, což umožňuje přenášet laserový svazek optickými vlákny. Protože krátkovlnné lasery tvoří v oblasti svaru minimum plasmatu, je možné jako ochranný plyn při svařování používat levnější argon. Účinnost moderních pevnolátkových laserů se pohybuje okolo hodnot 10 % a použitý výkon max. 5 kW, což snižuje maximální tloušťku svařovaného materiálu (maximálně 6 mm) [34, 35, 37].

Svařitelnost hořčíku Nd:YAG laserem je výrazně lepší, protože koeficient absorpce krátkovlnného záření je u hořčíku mnohem vyšší, než pro dlouhovlnné záření. To umožňuje větší průnik laserového svazku do materiálu a formování stabilní kapiláry. Pro svařování paprskem o výkonu 1,5 kW za stejných podmínek (průměr fokusovaného svazku a svařovací rychlosti) byla pro Nd:YAG laser dosažena hloubka průniku 2 mm, pro CO₂ laser pouze 0,7 mm [2].

V případě vláknového laseru je aktivním médiem samotné optické vlákno, které je dopováno prvky vzácných zemin (nejčastěji erbium, ytterbium). Zdrojem záření je dioda generující svazek o vlnové délce 980 nm. Při průchodu záření optickým vláknem dochází k excitaci atomů prvků vzácných zemin přítomných ve vlákně a vyzařování koherentního záření o vlnové délce daného prvku (pro erbium 1550 nm, ytterbium 1080 nm). Výhodou vláknových laserů je stabilita a vysoká kvalita generovaného svazku a v porovnání s pevnolátkovými a plynovými lasery vysoká účinnost (70-80% energie dodané zdrojem je přeměněno na laserový svazek) [38].

Parametry svařování (výkon laseru, rychlost svařování, fokusace svazku)

Výkon laseru je jedním z nejdůležitějších svařovacích parametrů, protože ovlivňuje formování kapiláry. Na obr. 3.17 je patrný vliv výkonu na hloubku průniku laseru a šířku svarového spoje. S rostoucím výkonem dochází ke zvýšené porozitě a k vypařování svařovaného materiálu (teplota varu hořčíku je pouze 1107 °C). Proto se někdy používá laserové svařování s přídavným materiálem. Dále s rostoucím výkonem klesá rozměrový rozdíl mezi šířkou horní a spodní části svaru [2].

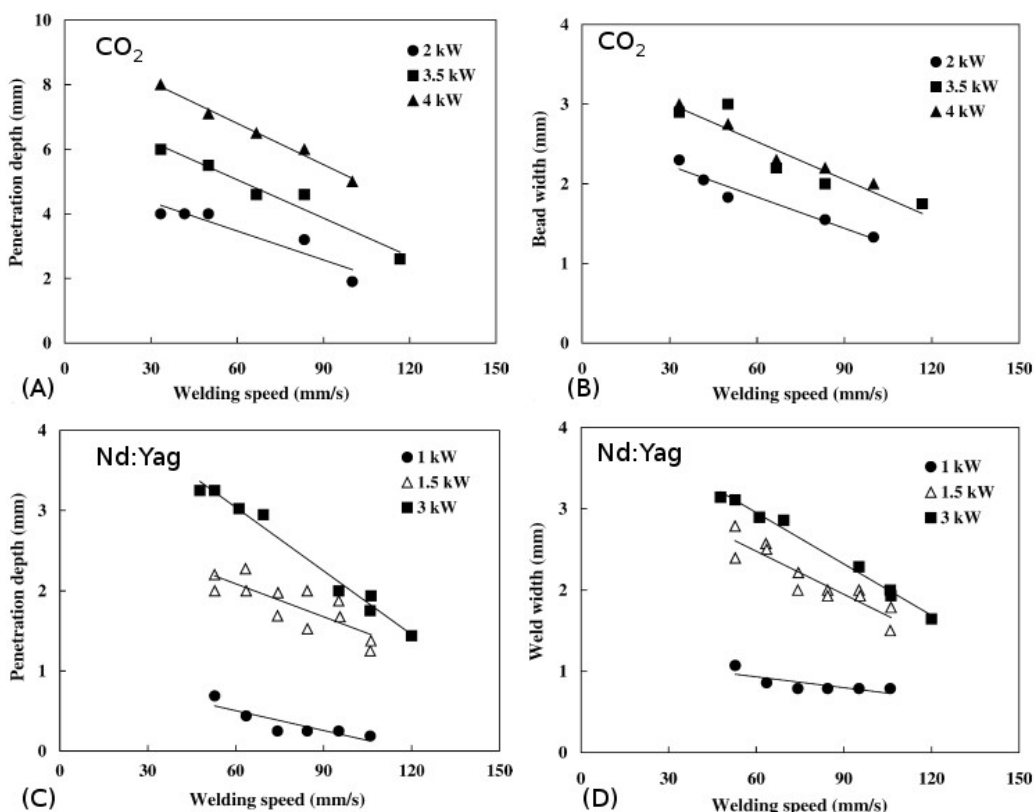


Obr. 3.17 Vliv výkonu CO₂ laseru na (A) hloubku průniku, (B) šířku svarového spoje v lité slitině WE43 [39]

Penetration depth – hloubka průniku, bead width – šířka svarového spoje, Laser power – výkon laseru.

Výzkumem vlivu výkonu laseru a svařovacích rychlostí, bylo dokázáno, že nižší hodnoty výkonu a rychlosti poskytují lepší kvalitu svarového spoje. Pro lité hořčíkové slitiny AZ91 a AM50 o tloušťce 3 a 5 mm, je doporučován Nd:YAG laser o výkonu 2-2,5 kW [40].

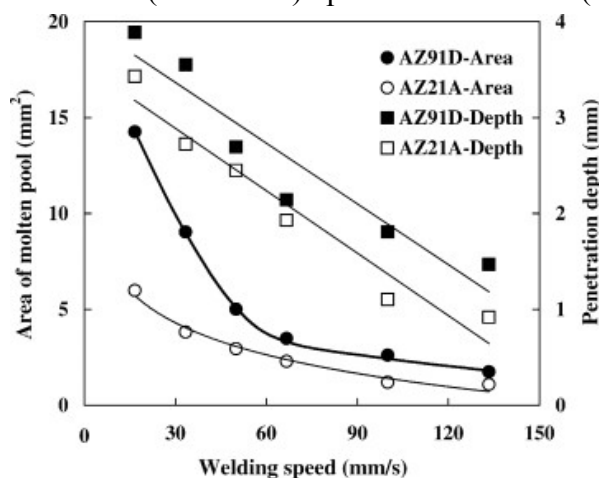
Rychlost svařování má vliv na množství energie převedené do svařovaného materiálu. S klesající rychlostí svařování roste množství absorbované energie a zvyšuje se tedy hloubka průniku svazku a šířka svaru. Porovnání vlivu rychlosti svařování pro slitiny WE43 a AM60B na tyto parametry je znázorněno na obr. 3.18 [2, 35].



Obr. 3.18 Porovnání vlivu rychlosti svařování CO₂ laserem na (A) hloubku průniku, (B) šířku svaru v lité slitině WE43 a rychlosti svařování Nd:YAG laserem na (C) hloubku průniku, (D) šířku svaru v lité slitině AM60B [39, 41].

Penetration depth – hloubka průniku, bead width – šířka svarového spoje, weld width – šířka svarového spoje, welding speed – rychlost svařování

Na obr. 3.19. je znázorněn vliv rychlosti na velikost oblasti natavení materiálu a hloubku průniku svazku pro litou slitinu AZ91D a tvářenou slitinu AZ21A. I když byly obě slitiny svařovány laserem o stejném výkonu (Nd:YAG 1,7 kW), je patrný významný rozdíl v chování obou slitin v průběhu svařování. To je dáno jejich rozdílnou tepelnou vodivostí: litá AZ91D má nižší teplotní vodivost (51 W/m K) oproti tvářené AZ21 (139 W/m K) [42].



Obr. 3.19 Porovnání natavené plochy a hloubky průniku pro litou slitinu AZ91D a tvářenou slitinu AZ21A svařované Nd:YAG laserem o výkonu 1,7 kW [42]

Area of molten pool – oblast natavení, penetration depth – hloubka průniku, welding speed – svařovací rychlost, area – oblast, depth - hloubka

Dalším důležitým parametrem pro laserové svařování je vzdálenost ohniskové roviny laserového svazku od povrchu svařovaného materiálu. V místě ohniska svazku je největší hustota energie, která s rostoucí vzdáleností od něj na obě strany klesá. Nejčastěji se svazek fokusuje přímo na povrch svařence nebo těsně pod něj. V literatuře [43] je uvedeno, že pro tenké plechy hořčíkových slitin (2,5 a 3 mm) se ukázalo výhodnější fokusovat svazek na povrch svařovaného materiálu a pro silné plechy (5 a 8 mm) bylo kvalitnějších svarů dosaženo při fokusaci 2 mm pod povrch materiálu. Použité svařovací podmínky v literatuře jsou uvedeny v tab 3.6 [2].

Náchylnost hořčíku k oxidaci je velmi vysoká, proto se svařování uskutečňuje v ochranné atmosféře. Použitý inertní plyn je ionizován laserovým svazkem a vytváří ve svarovém spoji plasma, které je nežádoucí z důvodu rozptylu svazku a tím pádem obtížné fokusaci laserového paprsku. Proto je vhodné volit jako ochranný plyn helium, které má vysoký ionizační potenciál. Jeho nevýhodou oproti argonu je vyšší cena [2, 35].

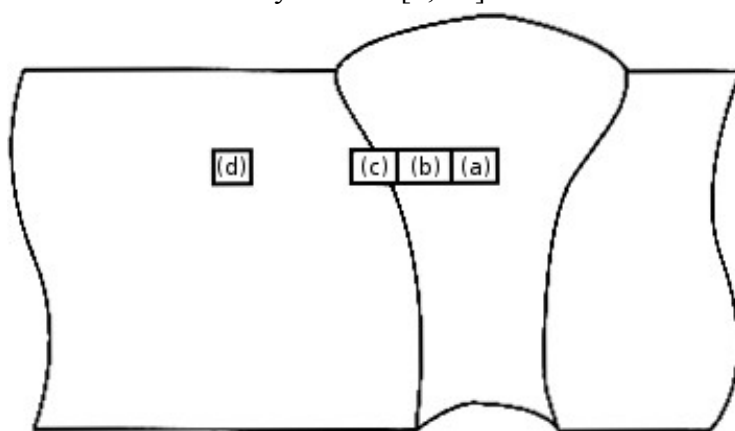
Tab. 3.6 Svařovací parametry pro slitiny AZ31 a ZE41 použité v literatuře [3, 44-48]

	Typ laseru	Výkon [kW]	Tloušťka [mm]	Svařovací rychlost [m/min]	Místo fokusace	Pozn.
AZ31	CO2	0,8-1	1,5	1,5 – 2,5	povrch	
	CO2	2,5	6	5	-1,5 mm	
	Nd:YAG	2,2	2,5	5,4	povrch	AZ61 příd. mat.
	Nd:YAG	2,2	2	5,5	povrch	
	Nd:YAG	2,2	1,6	6	-	
ZE41	Nd:YAG	2,4	2	7	-	
	Nd:YAG	2,5 a 4	2 a 6	2; 7	-	litá, EZ33 příd. mat.

Struktura a vlastnosti svarových spojů

Ve svarových spojích vytvořených laserovým svazkem lze rozlišit čtyři hlavní oblasti (obr. 3.20)- FZ, PMZ (partial melted zone - částečně natavená oblast), HAZ a BM.

Mikrostruktura FZ se skládá z náhodně orientovaných ekviaxiálních zrn. Jejich velikost je často menší než v základním materiálu, protože při svařování dochází k rychlému odvodu tepla základním materiálem. Jemnozrnnost podporuje i přísada zirkonia, případně dodatečné chlazení, množství a rychlost proudění inertního plynu. Distribuce velikosti zrn se v FZ liší. Nejjemnější struktura je dosažena u kořene svaru, kde je odvod tepla realizován hlavně proudícím inertním plynem a svařovací podložkou. V horní části svaru se vyskytuje hrubozrnnější struktura, protože dochází pouze k chlazení inertním plynem. Největší velikost zrn je pak uprostřed svarového spoje, kde odvod tepla závisí hlavně na tepelné vodivosti základního materiálu. Na okraji FZ se nachází PMZ, která dosahuje šířky pouze několika zrn. Zde je velký teplotní gradient směrem k základnímu materiálu, proto mají zrna v této oblasti kolumnární tvar. V HAZ nebylo, na rozdíl od oceli, pozorováno výrazné zhrubnutí zrn. To je dáno vyšší tepelnou vodivostí hořčikovými slitin [2, 35].



Obr. 3.20 Struktura svarového spoje zhotoveného laserovým svazkem: (a) osa svaru, (b) tavná oblast, (c) tepelně ovlivněná oblast (HAZ), (d) základní materiál [35]

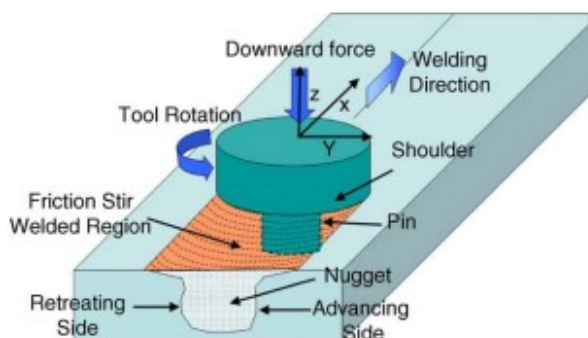
Chemické složení a způsob výroby hořčikovými slitin má vliv na vznik defektů při svařování. U tvářených slitin se nejčastěji setkáváme s trhlinami; u slitin odlévaných do pískových forem s trhlinami a porozitou; a u slitin litých pod tlakem s velkým podílem pórů [35].

Legující prvky v hořčikovými slitinách zvětšují oblast mezi solidem a likvidem. Ta společně s velkým smršťováním, vysokým koeficientem tepelné roztažnosti a nízkou teplotou tání intermetalických fází činí hořčikové slitiny náchylné k likvační trhlinám v HAZ a trhlinám při tuhnutí v FZ [49]. Trhliny při tuhnutí podporuje vysoký obsah hliníku (nad 10 hm %), protože struktura obsahuje vysoký podíl nízkotavitelné intermetalické fáze $Mg_{17}Al_{12}$. Pokud slitina obsahuje přes 3% Zn, je náchylná k trhlinám i bez přítomnosti hliníku [50]. Naopak prvky vzácných zemin odolnost vůči trhlinám při tuhnutí zvyšují. Likvační trhliny v HAZ jsou typické pro slitiny s vysokým podílem nízkotavitelné fáze $Mg_{17}Al_{12}$ [2].

Další častou vadou při svařování hořčikovými slitin je výskyt pórů. Nejčastější příčinou je plynný vodík, jehož rozpustnost v hořčikovými slitinách s klesající teplotou prudce klesá. Pokud vodík nestačí opustit svařovaný materiál, objeví se ve svaru ve formě porozity. Na rozdíl od hliníkových slitin nebo ocelí nedochází během svařování ke kolapsu vytvořené kapiláry, který má také negativní vliv na porozitu svaru. Vytvořená kapilára je vlivem vyššího rovnovážného tlaku par, nižší teploty varu a nízkého povrchového napětí kapalného hořčíku při svařování hořčikovými slitin stabilní. Nižší teplota varu hořčíku a zinku může vést ke zvýšenému výskytu pórů [35].

3.2.4 Svařování metodou Friction Stir Welding

Svařování metodou Friction Stir Welding bylo patentováno ve Svářečském institutu ve Velké Británii roku 1991 jako svařování v tuhém stavu. Základní schéma svařování je na obr. 3.21. Svařovací nástroj, v tomto případě rotující rameno s hrotem, je zanořeno mezi dva svařované materiály a vedeno podél celého svarového spoje. Mezi nástrojem a materiálem dochází vlivem tření k ohřevu materiálu na teplotu, která umožňuje snadnou plastickou deformaci. Ohřátý materiál na čele nástroje je rotací přemísťován za hrot, kde vyplňuje prostor původní polohy hrotu nástroje. Tvar hrotu je nutno volit tak, aby docházelo k optimálnímu toku materiálu zpět a nikoliv na povrch svařence. Při správně zvolených podmínkách nedochází k natažení materiálu [51].



Obr. 3.21 Základní schéma Friction Stir Welding [52]

Downward force – přitlačná síla, welding direction – směr svařování, tool rotation – rotace nástroje, shoulder – rameno, pin – hrot, friction stir welded region – oblast svařená třením nástroje, nugget – jádro svaru, retreating side – sestupná strana, advancing side – vzestupná strana

Vývoj metody svařování třením pomocí nástroje je uváděn jako jeden z největších pokroků v posledních letech v oblasti svařování. Velkou výhodou je nízká energetická náročnost (spotřeba pouze 2,5% energie použité pro laserové svařování). Při svařování není potřeba přídavného materiálu, je možné svařovat rozdílné materiály, tloušťky a nedochází k propalu legujících prvků, výskytu porozity a teplotní gradient je menší než u ostatních procesů svařování. [52, 53].

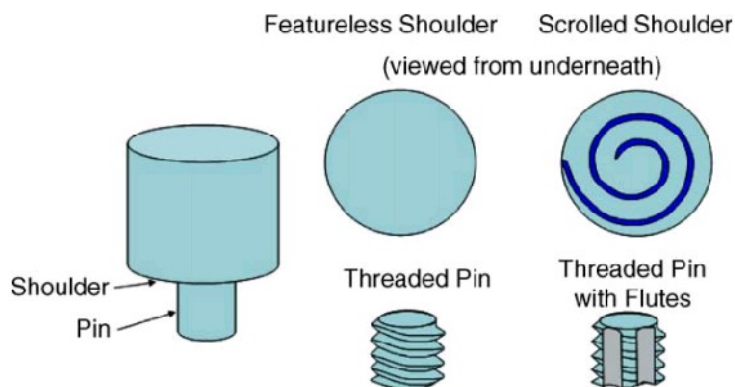
Svařovací nástroj (materiál, geometrie)

Teplota se při svařovacím procesu pohybuje těsně pod teplotou solidu svařovaného materiálu (70-90 % bodu teploty tavení) a síly, které při svařování působí, jsou poměrně vysoké, proto je na svařovací nástroj kladeno mnoho podmínek: odolnost vůči vysokým teplotám, odolnost vůči opotřebení, nízká reaktivita, vysoká lomová houževnatost, nízká teplotní roztažnost a samozřejmě dobrá obrobiteľnosť a nízká cena. Volba materiálu nástroje závisí na svařovaném materiálu (viz tab. 3.7) [51, 54].

Tab. 3.7 Přehled doporučených materiálů pro výrobu svařovacího nástroje [51]

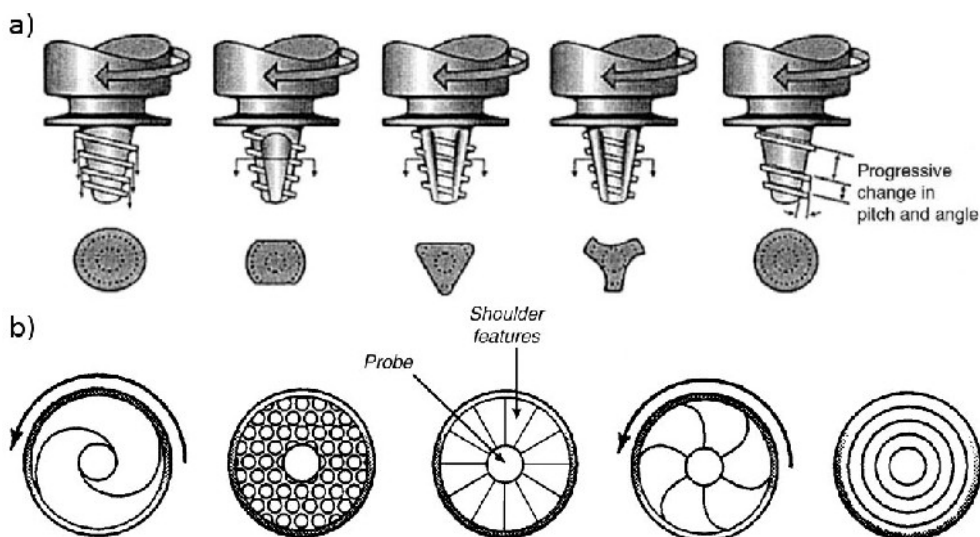
Slitina	Tloušťka	Materiál nástroje
[mm]		
Hliníkové sl.	<12	Nástrojová ocel, WC-Co
	<26	MP159
Hořčíkové sl.	<6	Nástrojová ocel, WC
Slitiny na bázi mědi	<50	Ni slitiny, PCBN, W slitiny
	<11	Nástrojové oceli
Titanové sl.	<6	W slitiny
Korozivzdorné oceli	<6	PCBN, W slitiny
Nízkolegované oceli	<10	WC, PCBN
Niklové sl.	<6	PCBN

Svařovací nástroj se skládá ze dvou částí (obr. 3.22): rameno a hrot (pin). Tvar hrotu svařovacího nástroje, příp. spodní části ramena, má na svařovací proces největší vliv. Hrot plní dvě základní funkce: (a) v důsledku tření mezi nástrojem a materiálem dochází k plastizaci materiálu, (b) při pohybu nástroje odvádí zplastizovaný materiál. Rameno nástroje je při svařování také zanořeno do materiálu – hloubka zanoření se pohybuje okolo hodnoty 0,1 mm. Další příklady tvaru hrotu a ramene jsou uvedeny na obr. 3.23 [51, 52].



Obr. 3.22 Schéma svařovacího nástroje s různými tvary ramena a hrotu [52]

Featureless Shoulder- obyčejné rameno, scrolled shoulder – spirálové rameno, viewed from underneath – zobrazeno ze spodní strany, shoulder – rameno, pin – hrot, threaded pin – hrot se závitem, threaded pin with Flutes – hrot se závitem a drážkami



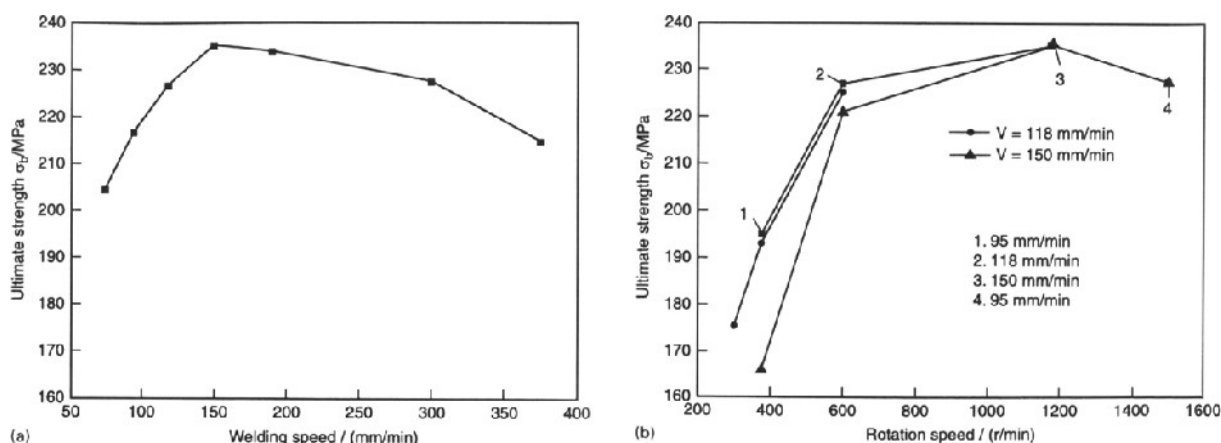
Obr. 3.23 Příklady tvarů hrotů (a) a ramene (b) svařovacího nástroje [51]

Progressive change in pitch and angle – postupná změna rozteče a úhlu, probe – hrot, shoulder features – vzhled ramena

Pro každý materiál a případně rozdílné tloušťky svařovaných materiálů je ideální vyrobit jiný svařovací nástroj se správným reliéfem, průměrem ramena, ideální délkou, tvarem a průměrem hrotu [54].

Parametry svařování (rychlost rotace a posuvu nástroje, sklon nástroje, aplikovaný tlak)

Při samotném svařování jsou nejdůležitější dva parametry: rychlost rotace (ω , ot./min) a posuvu nástroje (v , mm/min). Rotace ovlivňuje pohyb zplastizovaného materiálu okolo pinu, posuv nástroje pak ukončuje svařovací proces přesunem materiálu z přední strany pinu dozadu. S vyšší rychlostí rotace nástroje roste množství generované tepla vlivem tření. Nárůst není lineární, protože koeficient tření na rozhraní mezi materiálem a nástrojem klesá se zvyšující se rychlostí rotace nástroje. Na volbě těchto parametrů pak závisí mechanické vlastnosti svaru (obr. 3.24) [51, 54].



Obr. 3.24 Vliv rychlosti svařování (a) a rychlosti rotace (b) na mez pevnosti svarového spoje plechu slitiny AZ31 o tloušťce 2,5 mm [54]

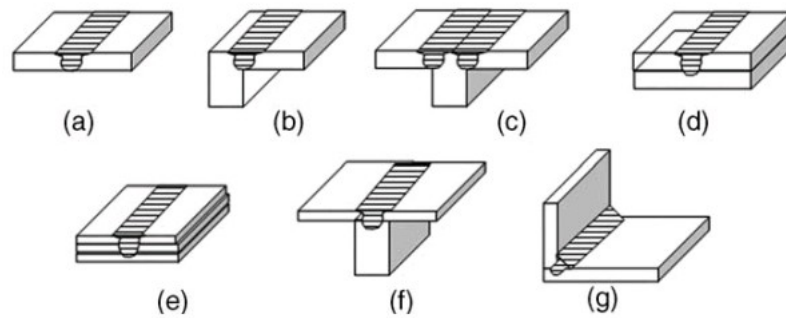
Ultimate strength – mez pevnosti, welding speed – rychlost svařování, rotation speed – rychlost rotace nástroje

Dalším důležitým parametrem je náklon a hloubka zanoření svařovacího nástroje vzhledem k materiálu. Náklon nástroje zajišťuje správný tok materiálu okolo hrotu a ramena svařovacího nástroje. Pohybuje se v jednotkách procent (pro slitiny hořčíku nejčastěji 2° - 5°) a čím je větší, tím je nutné aplikovat větší přitlačnou sílu na svařovací nástroj. Nástroje se spirálovým reliéfem ramene umožňují použít nulový náklon. Hloubka zanoření ramena nástroje je důležitá hlavně u ramen nástrojů, které nemají žádný reliéf. Pokud je zanoření příliš mělké, nedochází k ideálnímu odvodu materiálu za nástroj, pokud příliš hluboké, dochází k zeslabení tloušťky svaru. Parametry svařování pro slitiny AZ31 a AZ61, které byly použity v článcích [53, 55-59], jsou uvedeny v tab. 3.8 [51, 52, 54].

Tab. 3.8 Svařovací parametry pro slitiny AZ31 a AZ61 použité v literatuře [53, 55-59]

	Tloušťka [mm]	Průměr ramena [mm]	Průměr hrotu [mm]	Délka hrotu [mm]	Náklon nástroje [°]	Rychlost rotace [rpm]	Rychlost posuvu [mm/min]
AZ31	1,9	13	5	1,7	1,5	1400	300
	2	10	4	-	-	> 600	>200
	2	15	4	1,7	3	2000	600
	4,95	19,05	6,35	-	-	500-1000	60-240
AZ61	6,3	-	-	-	-	1220	90
	2,5	-	-	-	-	475	75

Typickou konfigurací svarových spojů pro svařování třecím nástrojem (obr. 3.25) jsou svary na tupo a s přesahem. Je možné navzájem svařovat plechy o různých tloušťkách a z různých materiálů. Pokud má svařovaný materiál vysokou teplotu tavení (slitiny titanu, oceli), je možné pro svařování použít předehřevu. Materiály s nízkou teplotou tavení (hliník, hořčík) je naopak doporučeno ochlazovat, aby nedocházelo k nadměrnému hrubnutí zrna [52].

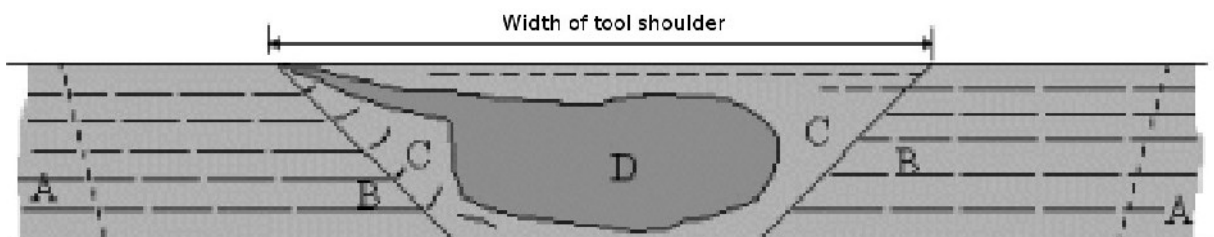


Obr. 3.25 Různé konfigurace svarových spojů pro metodu Friction Stir Welding: A, Tupý spoj; B, Rohový spoj; C, Tupý "T" spoj; D, Svar s přesahem; E, Několikanásobný svar s přesahem; F, "T" svar s přesahem; G, Koutový svar [52]

Struktura a vlastnosti svarových spojů

Vzhled typického svarového spoje vytvořeného metodou FSW (ve směru kolmém na svařování) se skládá ze čtyř oblastí (obr. 3.26) – jádro svaru, tepelně mechanicky ovlivněná oblast (thermomechanically affected zone – TMAZ), tepelně ovlivněná oblast a základní materiál [51, 54].

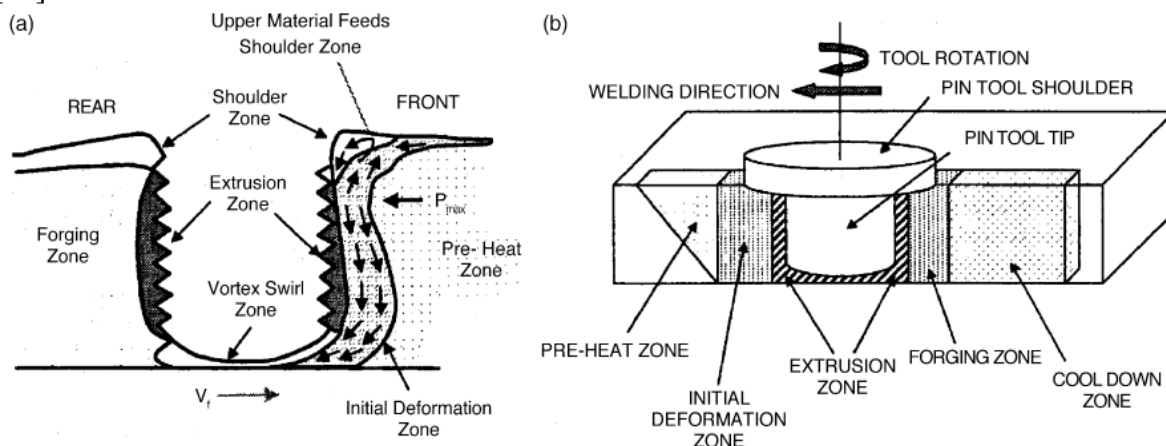
V oblasti jádra (nugget) se vyskytuje zcela zrekrytalizovaná oblast, odpovídající poloze svařovacího hrotu. Mezi oblastí jádra a TMAZ se vyskytuje ostré rozhraní. Při použití nižších rychlostí posuvu nástroje vzniká v oblasti jádra svaru struktura zvaná cibulové kroužky (z angl. onion rings). Vznikají v důsledku rotace nástroje a je prokázáno, že v oblasti cibulových kroužků dochází k velké plastické deformaci. Vzdálenost mezi jednotlivými kroužky klesá s rostoucí rychlostí svařování. TMAZ je část svaru ovlivněná působícím teplem a napětím. Svařovací nástroj v této oblasti materiál plasticky deformuje, avšak vlivem nízké rychlosti deformace nedochází k rekrystalizaci. Další oblast svarového spoje (HAZ) není ovlivněna plastickou deformací, ale pouze zvýšenou teplotou. Mikrostruktura je podobná základnímu materiálu, pouze dochází vlivem zvýšené teploty ke vzniku a hrubnutí precipitátů. [51, 54].



Obr. 3.26 Vzhled svarového spoje. A, Neovlivněný materiál; B, Tepelně ovlivněná zóna (HAZ); C, Tepelně mechanicky ovlivněná zóna (TMAZ); D, jádro svaru [51]
Width of tool shoulder – průměr ramene nástroje

V podélném směru se svarový spoj je tvořen z pěti oblastí – předehřev (pre-heat zone), počáteční deformace (initial deformation zone), tváření (extrusion zone), kování (forging zone) a ochlazování (cool down zone) (obr. 3.27). Před hrotem nástroje dochází vlivem tření k předehřevu materiálu na vyšší teplotu. Jakmile teplota v materiálu dosáhne kritické hodnoty a napětí přesáhne velikost deformačního napětí, nastává plastický tok materiálu. Ten je veden jak do místa zabořeného ramene nástroje, tak do oblasti tváření. Malé množství materiálu je zachyceno ve víru pod hrotem nástroje. V oblasti tváření protéká materiál okolo hrotu. Materiál odvedený z přední strany hrotu, zaplňuje prostor po původní poloze hrotu

pohybujícího se dopředu. Rameno nástroje pomáhá odvádět materiál do prostoru původní polohy nástroje a tím dochází k prokovávání již odvedeného materiálu. Poslední oblastí je zóna chlazení. Pro ochlazování svarového spoje může být použita voda nebo proudící vzduch [52].



Obr. 3.27 Vzhled svarového spoje v podélném směru svařování [52]

(A) Front – přední část, rear – zadní část, upper material feeds shoulder zone – vzestupný tok materiálu do oblasti paty ramena nástroje, shoulder zone – oblast ramena nástroje, extrusion zone – oblast tváření, forging zone - oblast kování, pre-heat zone – oblast předehřevu, vortex swirl zone – oblast víření materiálu, initial deformation zone – oblast počáteční deformace. (B) Tool rotation – rotace nástroje, welding direction – směr svařování, pin tool shoulder – rameno nástroje, pin tool tip – hrot nástroje, pre-heat zone – oblast předehřevu, initial deformation zone – oblast počáteční deformace, extrusion zone – oblast tváření, forging zone – oblast kování, cool down zone – oblast ochlazování

Geometrie svařovacího nástroje ovlivňuje tok materiálu a tedy i teplotní a napět'ové pole ve svaru. Tyto termomechanické procesy mají vliv na mikrostrukturu v nuggetu, která nebývá zcela homogenní. Přesto jednou z hlavních výhod metody FSW je prakticky zcela rekrytalizovaná oblast ekviaxiálních a jemných zrn v oblasti jádra svaru, která má významně pozitivní vliv na mechanické vlastnosti svarového spoje. Jemnozrná struktura a absence dvojčat je způsobena intenzivní plastickou deformací za vysokých teplot [51, 56].

Při nevhodné volbě svařovacích parametrů se mohou ve svaru objevit defekty jako např. dutiny, vruby a vady typu kissing bonds, příp. i krátkodobé vznícení materiálu, které mají negativní vliv na mechanické vlastnosti svaru. Experimenty na slitině AZ31 ukázaly, že póry se začínaly ve svarech formovat od rychlosti posuvu 200 mm/min a rychlosti rotace 1000 ot/min. Při nižších rychlostech se póry objevovaly v ose svaru, s rostoucí rychlostí svařování se zvětšoval jejich průměr a jejich výskyt se přemístil směrem k horní části svaru [54].

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 ZÁKLADNÍ MATERIÁL

Pro experimentální činnost byly použity hořčíkové slitiny typu AZ a ZE dodané ve formě tvářených plechů firmou Salzgitter Magnesium-Technologie GmbH (tab. 4.1). Základní materiál z hořčíkových slitin AZ31 (tl. 1,6 mm), ZE10 a ZE41 byl vyroben metodou Direct Chill casting, ze slitiny AZ31 (tl. 3 mm) a AZ61 metodou Twin Roll casting.

Tab. 4.1 Dodané hořčíkové slitiny ve formě plechů

	Rozměry plechů (š×v×h) [mm]
AZ31	710 × 1,6 × 1130
AZ31	400 × 3 × 1000
AZ61	510 × 0,8 × 500
ZE10	710 × 1,6 × 1130
ZE41	720 × 2 × 700

4.2 METODIKA A POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Pro hodnocení mikrostruktury a základních mechanických vlastností základního materiálu byly odebrány zkušební vzorky ve směru podélném a příčném (vzhledem k rozměrům plechů).

Chemické složení základního materiálu bylo zjištěno pomocí optického emisního spektrometru s doutnavým výbojem SPECTRUMAT GDS-750.

Pro metalografické hodnocení jednotlivých vzorků byla provedena separace vzorků pomocí metalografické pily. Metalografické vzorky byly zpracovány obvyklými způsoby – broušením na brusným papírech o zrnitosti 400, 1200 a 4000 po dobu tří minut a leštěním diamantovými pastami o zrnitosti 3 μm , 1 μm po dobu tří minut a závěrečné jednodinutové leštění pomocí pasty o zrnitosti 0,25 μm na přístrojovém vybavení firmy STRUERS. Vzorky slitiny AZ31 a AZ61 byly naleptány acetic picralem (4,2 g kys. picrové, 10 ml kyseliny octové, 10 ml vody a 70 ml ethanolu), výbrusy slitin ZE10 a ZE41 byly leptány 10% Nitalem (10 % kys. dusičná, 90 % etanol) a acetic picralem. Vzorky byly pozorovány na metalografickém mikroskopu Olympus PMG-30 při zvětšení objektivu 10 \times až 100 \times (celkové zvětšení při dokumentaci bylo cca 100 \times až 1000 \times).

Základní materiál byl dále pozorován na rastrovacím elektronovém mikroskopu Philips XL-30 ve spojení s EDS detektorem EDAX, který byl využit k plošné a lokální bodové chemické mikroanalýze materiálu.

Zkoušení základních mechanických vlastností základního materiálu proběhlo na přístroji fy Zwick Z020 podle normy ČSN EN ISO 6892-1 [60] s rychlostí zatěžování 1 mm/min.

Jednotlivé plechy byly nastříhány na zkušební vzorky o rozměrech 100 \times 200 mm a každé dva zkušební vzorky tvořily pár pro svařování.

Měření teplotního pole při svařování metodou Friction Stir Welding a pulzním pevnolátkovým laserem bylo uskutečněno pomocí ústředny USB-AD16F se snímací frekvencí 100 Hz. Snímací frekvence byla při hodnocení zredukována v poměru 10:1. Pro měření teplotního pole při svařování kontinuálním vláknovým laserem byla použita ústředna o snímací frekvenci.

Vzorky pro metalografické hodnocení svarových spojů byly připraveny stejným způsobem jako základní materiál. Vzorky byly pozorovány na metalografickém mikroskopu Olympus PMG-30 při zvětšení objektivu 10 \times až 50 \times (celkové zvětšení při dokumentaci bylo cca 100 \times až 500 \times).

Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku svarových spojů byla pro slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm), AZ61, ZE10 a ZE41 odebrána ze začátku, středu a konce svaru. Pro slitinu AZ31 (tl. 3 mm) z místa začátku a konce svarového spoje. Tahová zkouška svarových spojů v příčném směru byla provedena na přístroji fy Zwick Z020 podle normy ČSN EN 895 [61] s rychlostí zatěžování 1 mm/min.

Tvrдость svarových spojů byla měřena dle normy ČSN EN 1043-2 [62] metodou dle Vickerse HV0,1 na automatickém mikrotvrdoměru fy LECO LM 247AT.

4.3 HODNOCENÍ ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU

4.3.1 Metalografické hodnocení základního materiálu

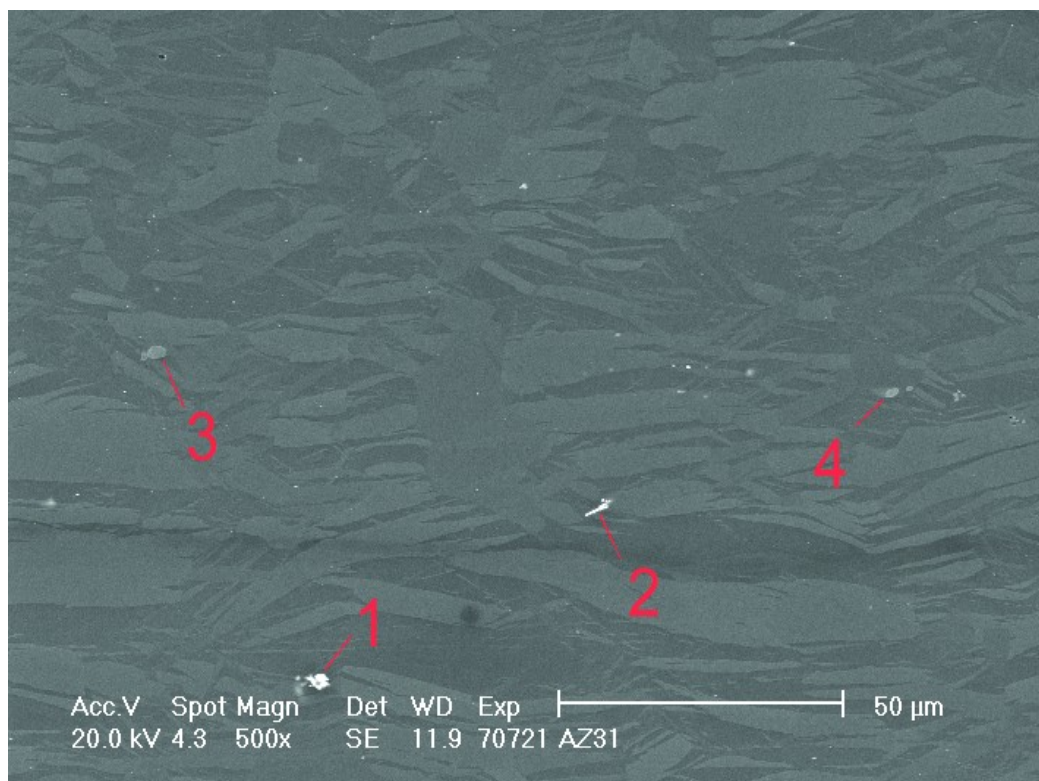
Základní materiál AZ31 (tl. 1,6 mm)

Naměřené chemické složení základního materiálu slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm) je s předepsaným složením dle normy ASTM uvedeno v tab. 4.2.

Tab. 4.2 Chemické složení hořčíkové slitiny AZ31 [5]

Prvek	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Ni	Cu	Mg	ostatní
Předepsané složení [hm%]	2,5-3,5	0,7-1,3	0,2-1,0	max. 0,1	max. 0,005	max. 0,005	max. 0,05	Bal.	max. 0,3
Naměřené složení [hm%]	3,01	0,83	0,28	0,00	0,004	0,000	0,00	Bal.	max. 0,01

Mikrostruktura základního materiálu ze slitiny AZ31 o tloušťce 1,6 mm v podélném směru je zobrazena na snímcích v příloze na obr. P1.1 a obr. P1.3 a ve směru příčném na obr. P1.2 (Příloha 1). Struktura je tvořena zrný substitučního tuhého roztoku δ (Al v Mg) o velikosti cca 15 μm a drobných částic, které byly identifikovány pomocí energiově disperzní analýzy jako vměstky na bázi AlMn a Si (obr. 4.1 a tab. 4.3) a pomocí stechiometrických výpočtů přesněji identifikovány. Uvedené hodnoty plošné analýzy jsou aritmetickým průměrem ze třech měření.



Obr. 4.1 Mikrostruktura slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm – podélný směr), lept. acetic picral

Tab. 4.3 Hodnoty plošné analýzy základního materiálu a bodové analýzy částic na obr. 4.1

	Mg	Al	Mn	Zn	Si	Předpokl. fáze
	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	
Plošná analýza	96,12	2,63	0,34	0,90	-	
Bodová analýza – 1	57,79	27,78	14,02	0,42	-	Al ₄ Mn
Bodová analýza – 2	55,96	25,78	17,42	0,84	-	Al ₁₁ Mn ₄
Bodová analýza – 3	81,12	1,25	-	-	17,63	
Bodová analýza – 4	2,52	38,33	56,94	-	2,21	

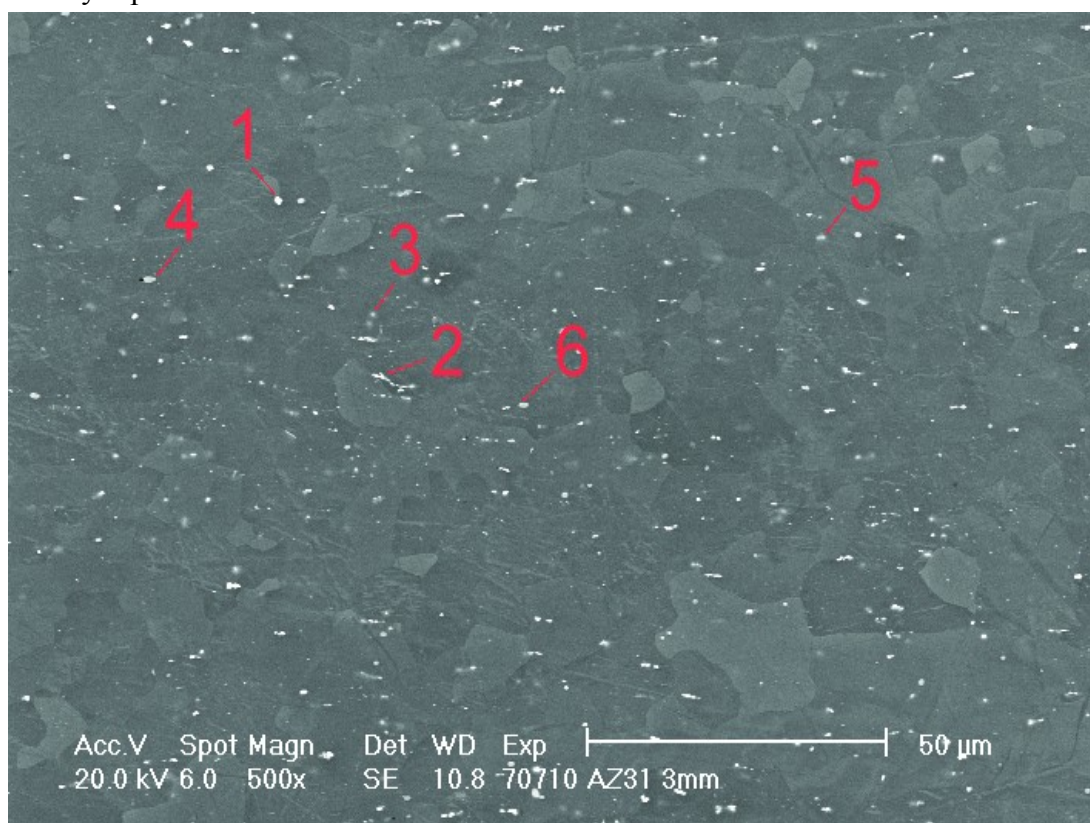
Základní materiál AZ31 (tl. 3 mm)

Naměřené chemické složení základního materiálu AZ31 o tloušťce 3 mm je společně s předepsaným složením dle normy ASTM uvedeno v tab. 4.4.

Tab. 4.4 Chemické složení hořčikové slitiny AZ31 [5]

Prvek	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Ni	Cu	Mg	ostatní
Předepsané složení [hm%]	2,5-3,5	0,7-1,3	0,2-1,0	max. 0,1	max. 0,005	max. 0,005	max. 0,05	Bal.	max. 0,3
Naměřené složení [hm%]	3,03	0,88	0,35	0,00	0,005	0,000	0,00	Bal.	max. 0,02

Mikrostruktura základního materiálu ze slitiny AZ31 o tloušťce 3 mm v podélném směru je uvedena na obr. P1.4 a obr. P1.6 a v příčném směru na obr. P1.5 (Příloha 1). Struktura je také tvořena zrny substitučního tuhého roztoku δ (Al v Mg) o velikosti 10 μm a množstvím rozptýlených drobných částic, které dle EDS analýzy (tab. 4.5) jsou tvořeny prvky Al a Mn, případně dalšími nečistotami na bázi Si (obr. 4.2), které byly pomocí stechiometrických výpočtů přesněji identifikovány. Uvedené hodnoty plošné analýzy jsou aritmetickým průměrem ze třech měření.



Obr. 4.2 Mikrostruktura slitiny AZ31 (tl. 3 mm – podélný směr), lept. acetic picral

Tab. 4.5 Hodnoty plošné analýzy základního materiálu a bodové analýzy částic na obr. 4.2

	Mg	Al	Mn	Zn	Si	Předpokl. fáze
	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	
Plošná analýza	96,12	2,45	0,45	0,97	-	
Bodová analýza – 1	65,86	21,47	12,67	-	-	$\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$
Bodová analýza – 2	74,60	16,20	9,20	-	-	$\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$
Bodová analýza – 3	86,76	6,85	6,39	-	-	Al_8Mn_5
Bodová analýza – 4	90,23	2,18	-	1,22	6,37	
Bodová analýza – 5	87,70	6,66	4,64	1,00	-	Al_8Mn_5
Bodová analýza – 6	94,05	1,55	-	1,16	3,24	

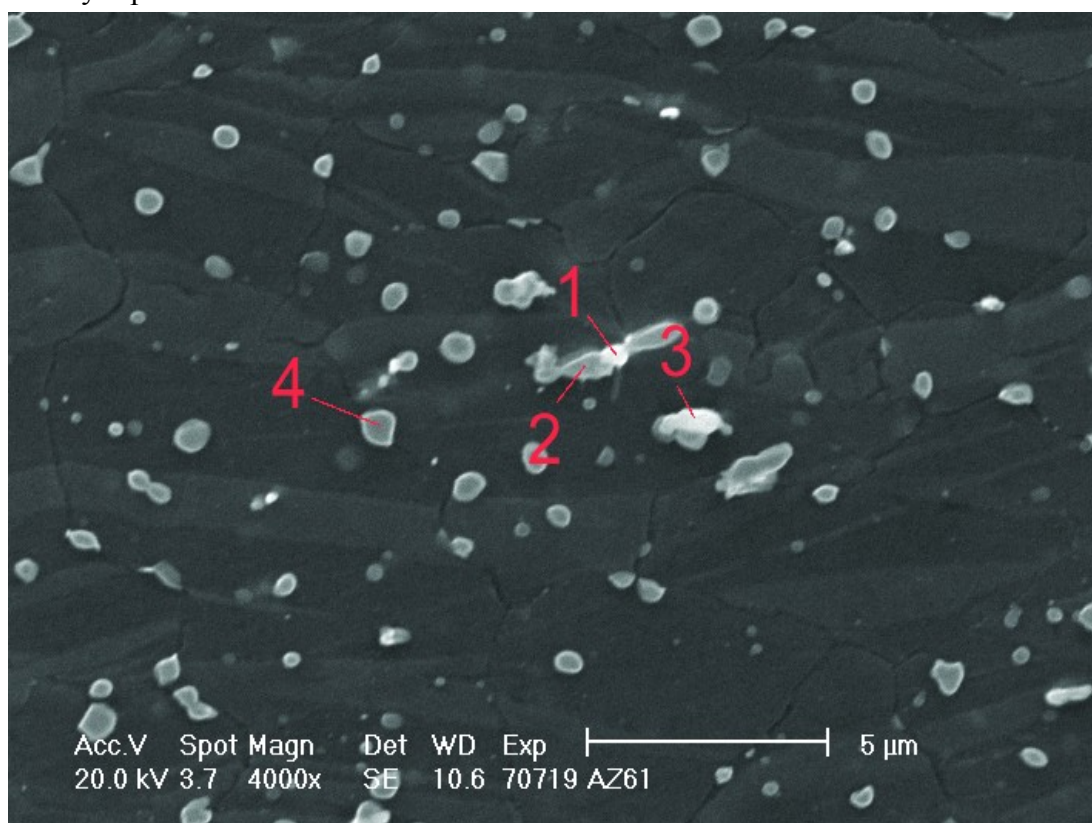
Základní materiál AZ61 (tl. 0,8 mm)

Naměřené chemické složení slitiny AZ61 je společně se složením předepsaným dle normy ASTM uvedeno v tab. 4.6.

Tab. 4.6 Chemické složení hořčíkové slitiny AZ61 [5]

Prvek	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Ni	Cu	Mg	ostatní
Předepsané složení [hm%]	5,8-7,2	0,4-1,5	0,15-0,5	max. 0,15	max. 0,005	max. 0,005	max. 0,05	Bal.	max. 0,3
Naměřené složení [hm%]	6,20	0,78	0,28	0,00	0,003	0,000	0,00	Bal.	0,00

Mikrostruktura základního materiálu AZ61 v podélném směru je uvedena na obr. P1.7 a obr. P1.9, v příčném směru na obr. P1.8 (Příloha 1). Struktura je tvořena zrny substitučního tuhého roztoku δ (Al v Mg) o velikosti 7 μm , nerozpuštěnou fází β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ vyloučenou ve formě velmi jemných částic a částicemi na bázi AlMn (obr. 4.3 a tab. 4.7), které byly pomocí stechiometrických výpočtů přesněji identifikovány. Uvedené hodnoty plošné analýzy jsou aritmetickým průměrem ze třech měření.



Obr. 4.3 Mikrostruktura slitiny AZ61 (tl. 0,8 mm – podélný směr), lept. acetic picral

Tab. 4.7 Hodnoty plošné analýzy základního materiálu a bodové analýzy částic na obr. 4.3

	Mg [hm. %]	Al [hm. %]	Mn [hm. %]	Zn [hm. %]	Předpokl. fáze
Plošná analýza	92,88	5,76	0,39	0,96	
Bodová analýza – 1	89,18	9,23	1,59	-	Al_4Mn
Bodová analýza – 2	81,37	16,15	0,57	1,9	$\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$
Bodová analýza – 3	69,28	23,55	6,27	0,9	
Bodová analýza – 4	84,72	13,71	-	1,57	$\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$

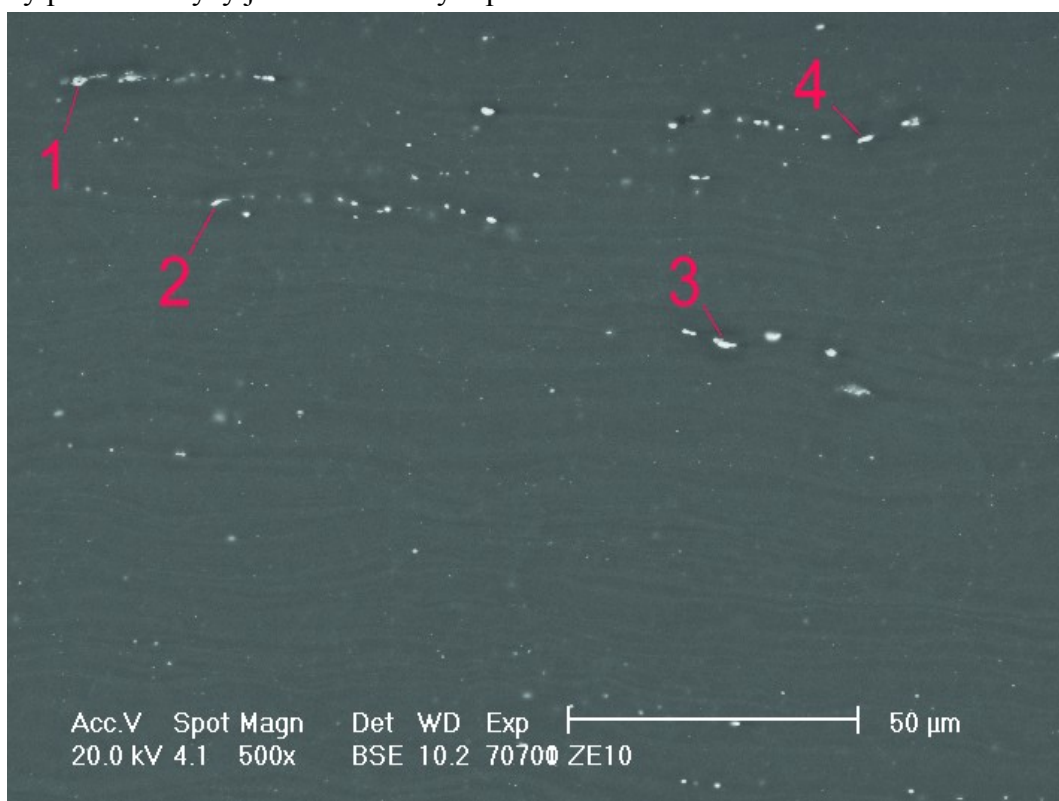
Základní materiál ZE10 (tl. 1,6 mm)

Naměřené chemické složení základního materiálu ZE10 (tl. 1,6 mm) je společně se složením předepsaným normou ASTM uvedeno v tab. 4.8. Procentuální podíl prvků vzácných zemin nebylo možné stanovit, jelikož v optickém emisním spektrometru nejsou na příslušných vlnových délkách umístěné prvkové kanály.

Tab. 4.8 Chemické složení hořčíkové slitiny ZE10 [5]

Prvek	Zn	Zr	Mn	Fe	Mg	ostatní
Předepsané složení [hm%]	1,0-1,5	-	-	-	Bal.	max. 0,3
Naměřené složení [hm%]	1,41	0,14	0,08	0,005	Bal.	max. 0,03

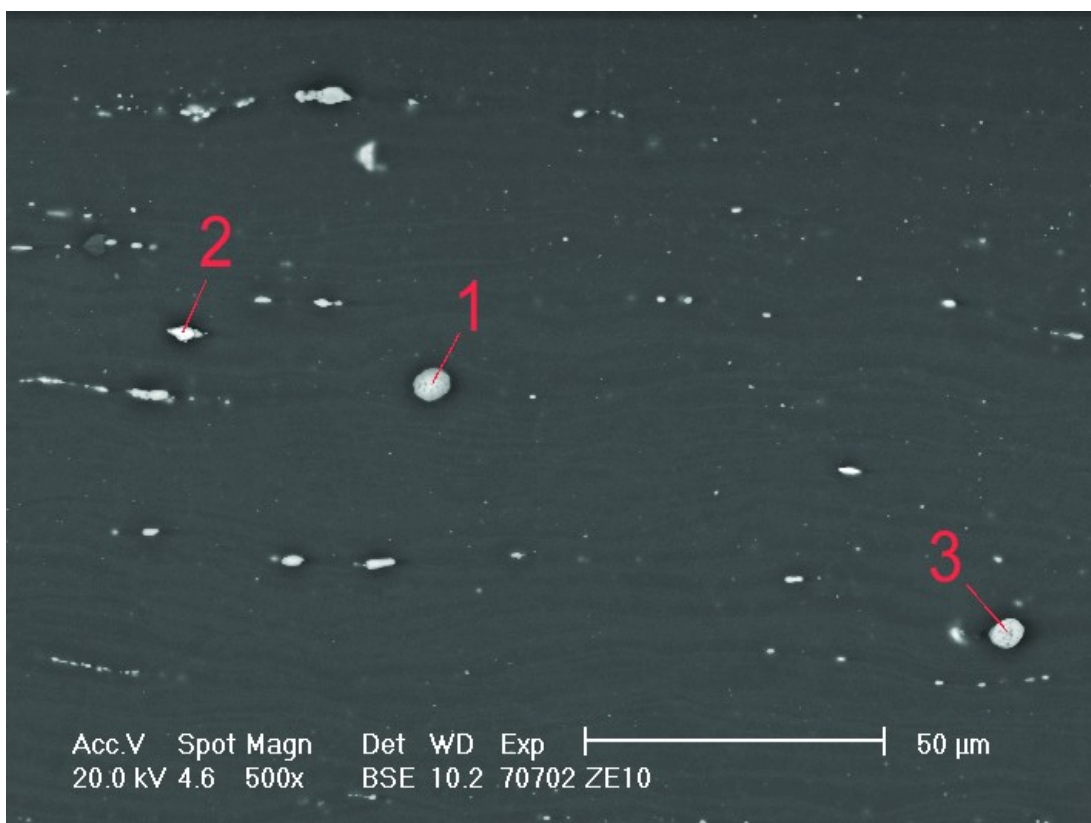
Mikrostruktura základního materiálu v podélném směru je uvedena v příloze na obr. P1.10, obr. P1.11 a obr. P1.14 a v příčném směru na obr. P1.12 a obr. P1.13 (Příloha 1). Struktura je tvořena zrny substitučního tuhého roztoku δ (Zn v Mg) o velikosti 25 μm , částicemi na bázi MgZnRE [11] a nerozpuštěným zirkoniem (obr. 4.4 a obr. 4.5, tab. 4.9 a tab. 4.10). Rozdíl v chemickém složení pásů, které se na světelném mikroskopu jeví jako hnědé a bílé, nebylo možné vlivem nižší detekční schopnosti EDS analýzy zjistit. Uvedené hodnoty plošné analýzy jsou aritmetickým průměrem ze třech měření.



Obr. 4.4 Mikrostruktura slitiny ZE10 (tl. 1,6 mm – podélný směr), lept. nital

Tab. 4.9 Hodnoty plošné analýzy základního materiálu a bodové analýzy částic na obr. 4.4

	Mg [hm. %]	Zn [hm. %]	La [hm. %]	Ce [hm. %]	Nd [hm. %]	Zr [hm. %]	Předpokl. fáze
Plošná analýza	97,89	1,55	-	-	-	0,55	
Bodová analýza – 1	43,19	38,64	7,1	11,07	-	-	$\text{Mg}_7\text{Zn}_3\text{RE}$
Bodová analýza – 2	79,85	13,65	2,12	3,11	-	-	$\text{Mg}_7\text{Zn}_3\text{RE}$
Bodová analýza – 3	82,11	11,5	2,38	3,28	-	-	$\text{Mg}_7\text{Zn}_3\text{RE}$
Bodová analýza – 4	71,64	17,73	3,92	5,18	1,11	-	$\text{Mg}_7\text{Zn}_3\text{RE}$



Obr. 4.5 Mikrostruktura slitiny ZE10 (tl. 1,6 mm – podélný směr), lept. nital

Tab. 4.10 Hodnoty bodové analýzy částic na obr. 4.5

	Mg [hm. %]	Zn [hm. %]	La [hm. %]	Ce [hm. %]	Al [hm. %]	Zr [hm. %]	Předpokl. fáze
Bodová analýza – 1	58,17	22,45	8,23	10,68	-	-	Mg ₇ Zn ₃ RE
Bodová analýza – 2	5,81	2,24	-	-	1,33	90,62	
Bodová analýza – 3	57,85	22,93	7,13	10,82	-	-	Mg ₇ Zn ₃ RE

Základní materiál ZE41 (tl. 2 mm)

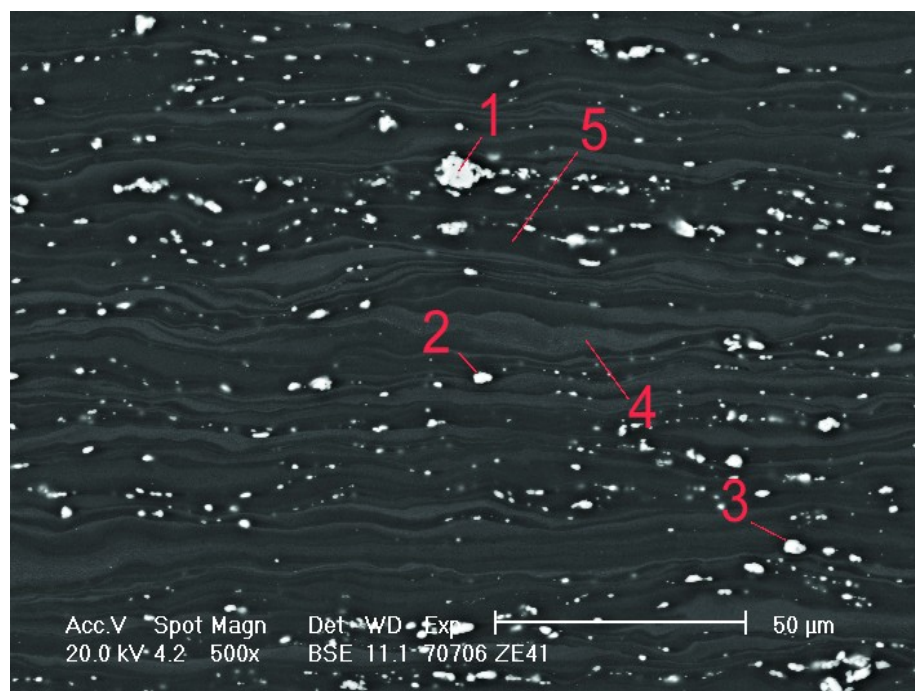
Naměřené chemické složení základního materiálu slitiny ZE41 o tloušťce 2 mm je společně se složením předepsaným normou ASTM uvedeno v tab. 4.11. Procentuální podíl prvků vzácných zemin nebylo možné stanovit, jelikož v optickém emisním spektrometru nejsou na příslušných vlnových délkách umístěné prvkové kanály.

Tab. 4.11 Chemické složení hořčikové slitiny ZE41 [63]

Prvek	Zn	Zr	Ce	Cu	Mn	Ni	Fe	Mg	ostatní
Předepsané složení [hm%]	3,5-5,0	0,4-1,0	0,75-1,75	max. 0,1	max. 0,15	max. 0,01	-	Bal.	max. 0,3
Naměřené složení [hm%]	5,10	0,50*		0,01	0,08	0,00	0,008	Bal.	max. 0,05

*informativní hodnota

Mikrostruktura základního materiálu v podélném směru je zobrazena na obr. P1.15 a obr. P1.16, v příčném směru pak na obr. P1.17 a obr. P1.18 (Příloha 1). Z mikrostrukturního rozboru je zřejmé, že struktura je tvořena zrny substitučního tuhého roztoku δ (Zn v Mg) o velikosti 20 μm , fází MgZnRE [11] a částicemi na bázi ZnZr (obr. 4.6 a tab. 4.12). Dále byly pomocí detektoru EDAX analyzovány pásy, které se na světelném mikroskopu jeví jako hnědé a bílé. EDS analýzou bylo prokázáno, že hnědé pásy obsahují větší podíl zinku a zirkonia.

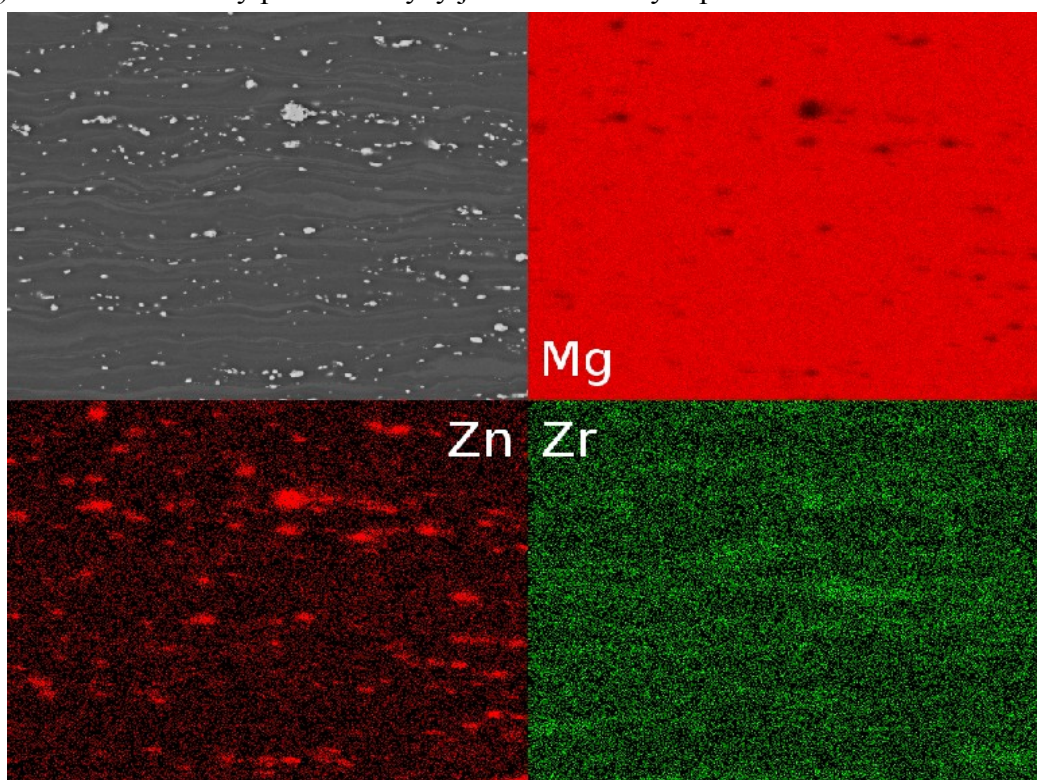


Obr. 4.6 Mikrostruktura slitiny ZE41 (tl. 2 mm – podélný směr), lept. nital

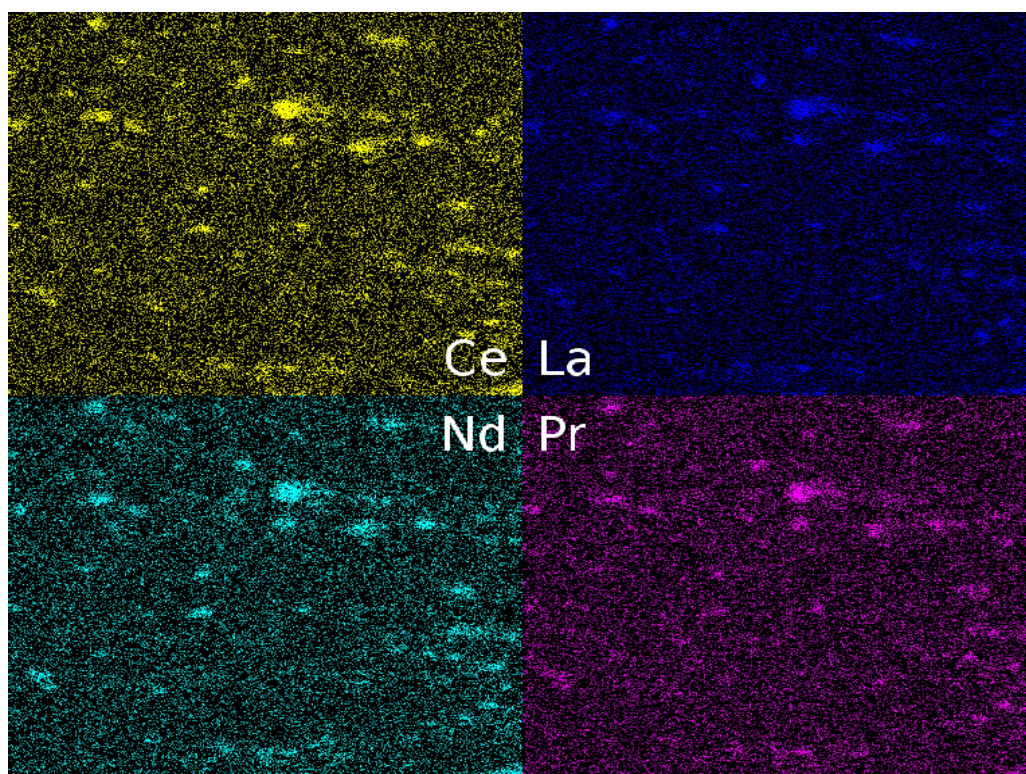
Tab. 4.12 Hodnoty plošné analýzy základního materiálu a bodové analýzy částic (obr. X.X)

	Mg [hm. %]	Zn [hm. %]	Zr [hm. %]	La [hm. %]	Ce [hm. %]	Nd [hm. %]	Pr [hm. %]	Předpokl. fáze
Plošná analýza	94,53	3,76	1,03	-	-	-	-	
Bodová analýza – 1	42,56	33,12	-	7,56	11,48	3,95	1,33	Mg ₇ Zn ₃ RE
Bodová analýza – 2	56,28	27,31	-	5,28	7,95	2,46	0,73	Mg ₇ Zn ₃ RE
Bodová analýza – 3	54,53	28,22	-	4,72	8,23	3,33	0,97	Mg ₇ Zn ₃ RE
Bodová analýza – 4	92,20	4,97	2,83	-	-	-	-	ZnZr
Bodová analýza – 5	97,60	1,95	0,45	-	-	-	-	

Dále byl na REM vybaveném detektorem EDAX proveden mapping vyskytujících se prvků (obr. 4.7 a obr. 4.8). Ze získaných údajů je patrné, že fáze, které se na REM jeví jako bílé, obsahují zinek a prvky vzácných zemin. V případě zirkonia je možné pozorovat jeho zvýšený obsah v páslech, které se na REM jeví jako světlé (a na světelné mikroskopu jako hnědé). Uvedené hodnoty plošné analýzy jsou aritmetickým průměrem ze třech měření.



Obr. 4.7 Rozložení prvků Mg, Zn a Zr ve slitině ZE41, EDS mapping



Obr. 4.8 Rozložení prvků vzácných zemin (Ce, La, Nd, Pr) ve slitině ZE41, EDS mapping

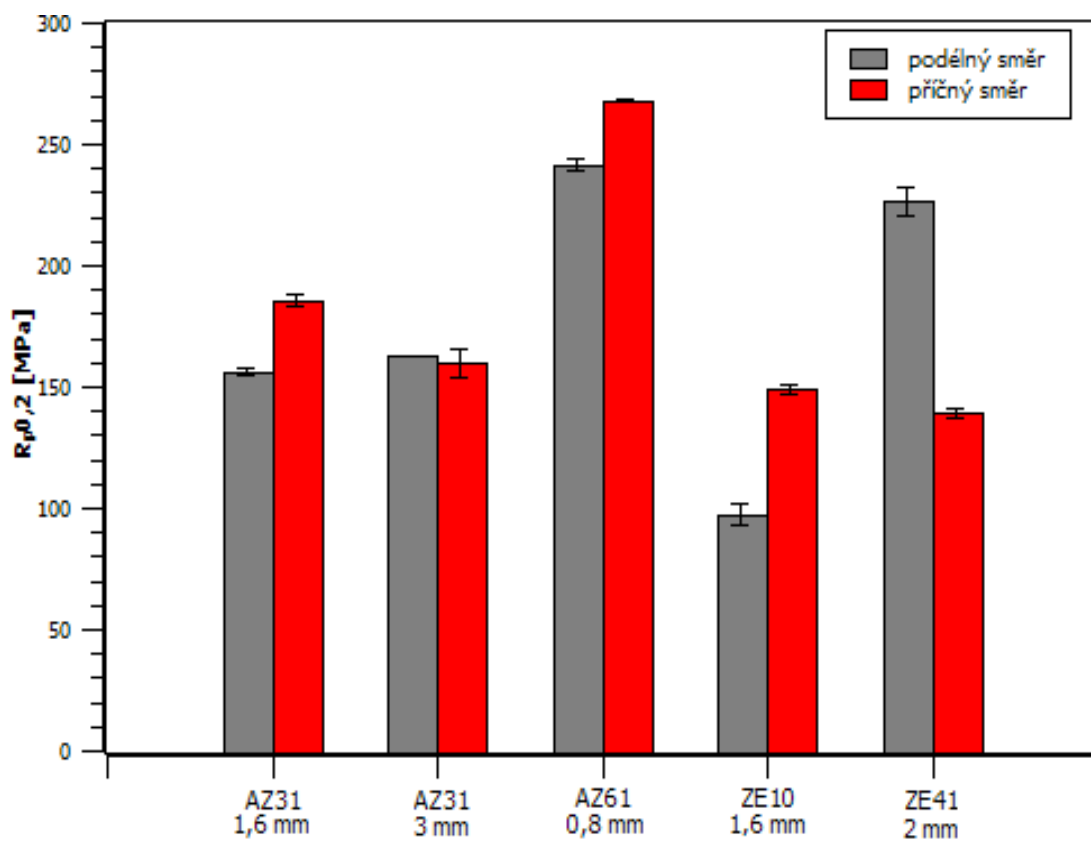
4.3.2 Napěťové a deformační charakteristiky základního materiálu

Hodnoty napěťových a deformačních charakteristik byly naměřeny ze třech těles odebraných v podélném a příčném směru (vzhledem k orientaci plechů) a z naměřených hodnot byl vypočten aritmetický průměr a směrodatná odchylka (viz tab. 4.13).

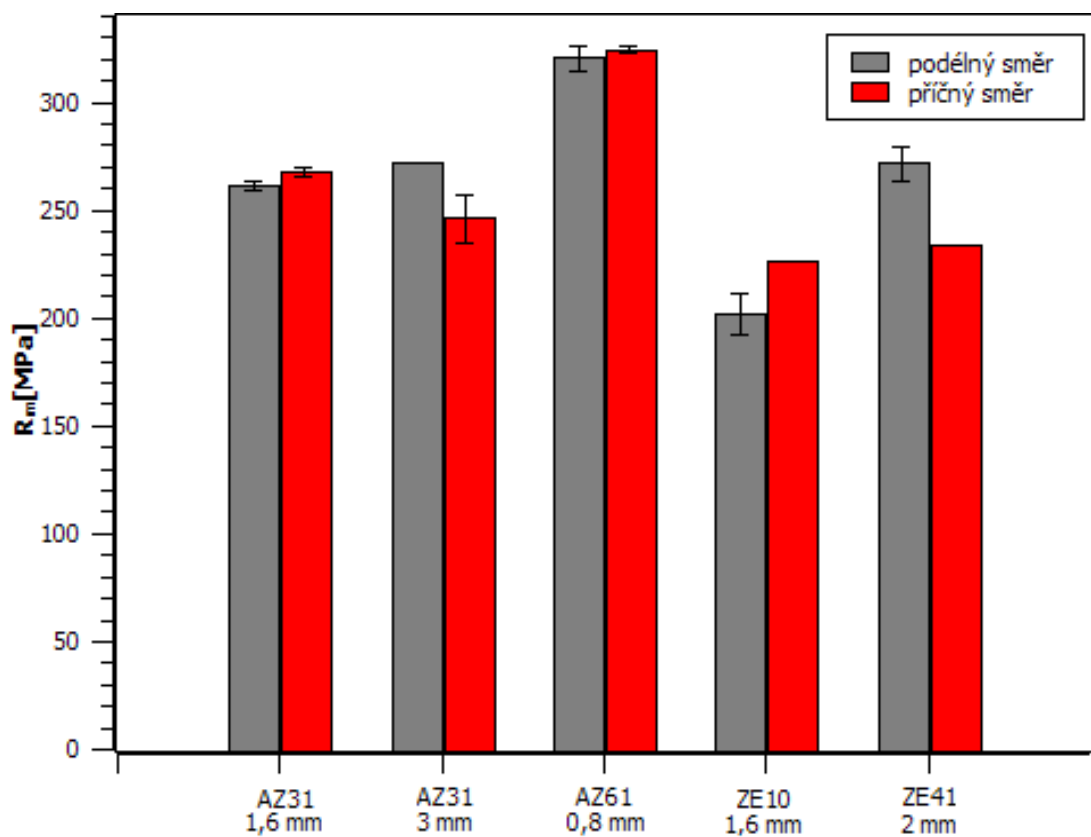
Tab. 4.13 Naměřené mechanické vlastnosti experimentálního materiálu

Slitina	Orientace vůči rozměru plechu		$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	E [GPa]	A [%]
AZ31 (1,6 mm)	podélný směr	\bar{x}	156,2	261,6	39,3	16,3
		s	1,3	2,2	0,4	0,6
	příčný směr	\bar{x}	185,5	267,7	39,3	17,0
		s	2,4	2,1	0,8	1,2
AZ31 (3 mm)	podélný směr	\bar{x}	162,7	272,1	39,0	12,0
		s	0,3	0,2	0,2	1,3
	příčný směr	\bar{x}	159,8	246,0	37,6	7,1
		s	5,8	11,4	0,3	2,6
AZ61 (0,8 mm)	podélný směr	\bar{x}	241,6	320,5	42,1	6,6
		s	2,5	6,2	1,1	3,1
	příčný směr	\bar{x}	267,8	324,6	43,1	5,0
		s	0,6	1,2	1,0	0,4
ZE10 (1,6 mm)	podélný směr	\bar{x}	97,5	201,9	25,3	35,9
		s	4,5	9,8	2,6	2,7
	příčný směr	\bar{x}	149,3	226,4	35,7	19,7
		s	1,9	0,2	4,5	0,4
ZE41 (2 mm)	podélný směr	\bar{x}	226,6	271,6	26,6	23,2
		s	6,0	8,2	15,6	6,9
	příčný směr	\bar{x}	139,2	234,0	30,4	22,5
		s	1,9	3,0	1,2	0,8

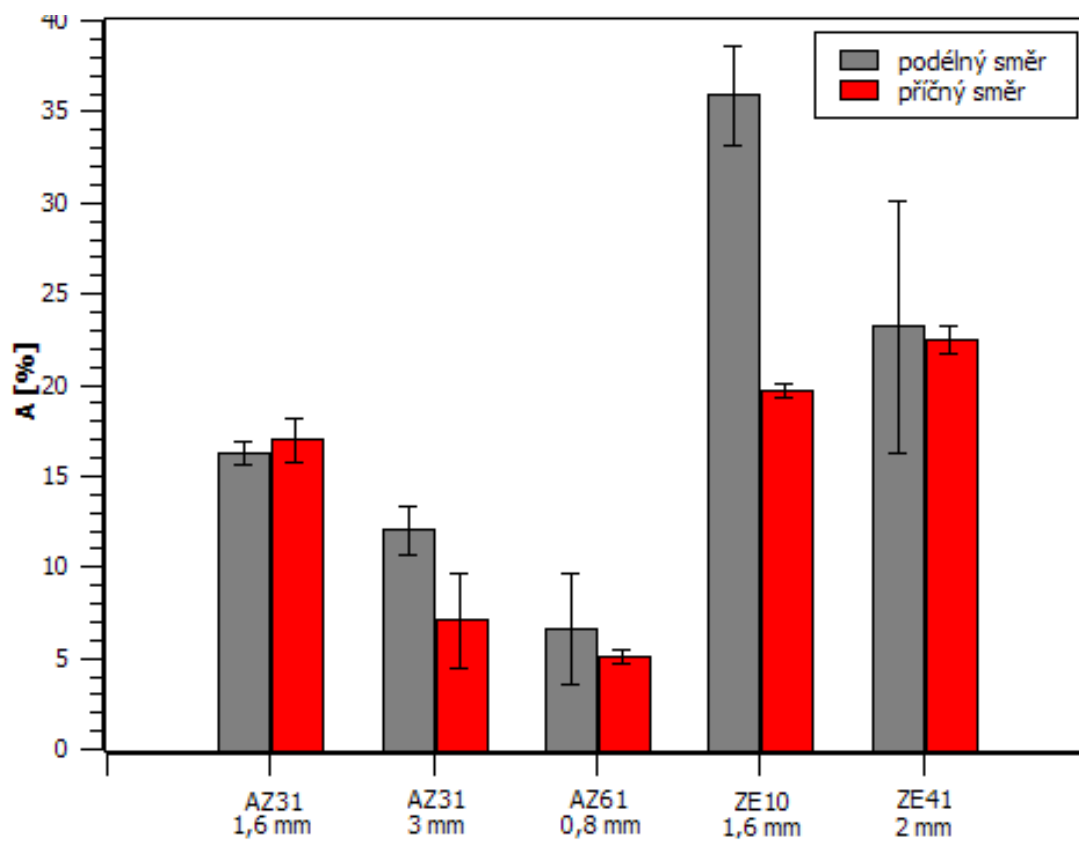
Grafické znázornění naměřených hodnot napěťových charakteristik je uvedeno na obr. 4.9 a obr. 4.10, deformačních charakteristik na obr. 4.11.



Obr. 4.9 Hodnoty smluvní meze kluzu základního materiálu



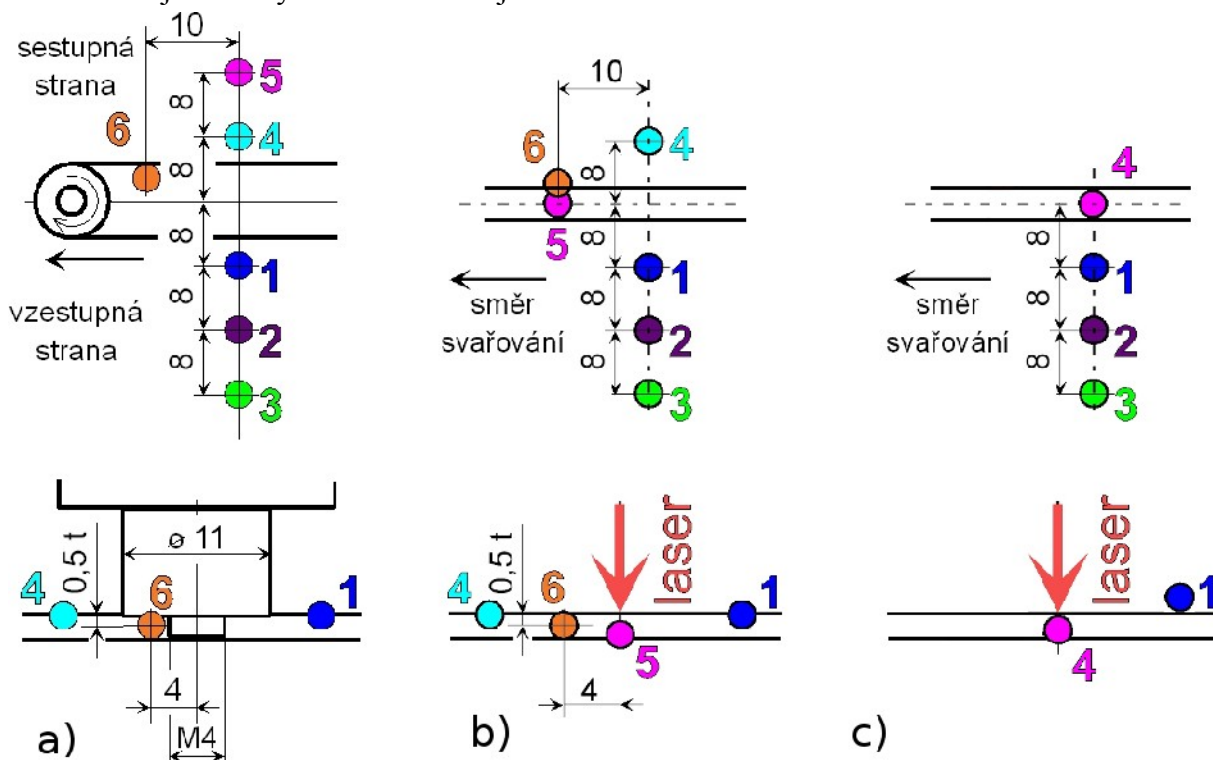
Obr. 4.10 Hodnoty meze pevnosti základního materiálu



Obr. 4.11 Hodnoty tažnosti základního materiálu

4.4 PŘÍPRAVA EXPERIMENTÁLNÍHO MATERIÁL

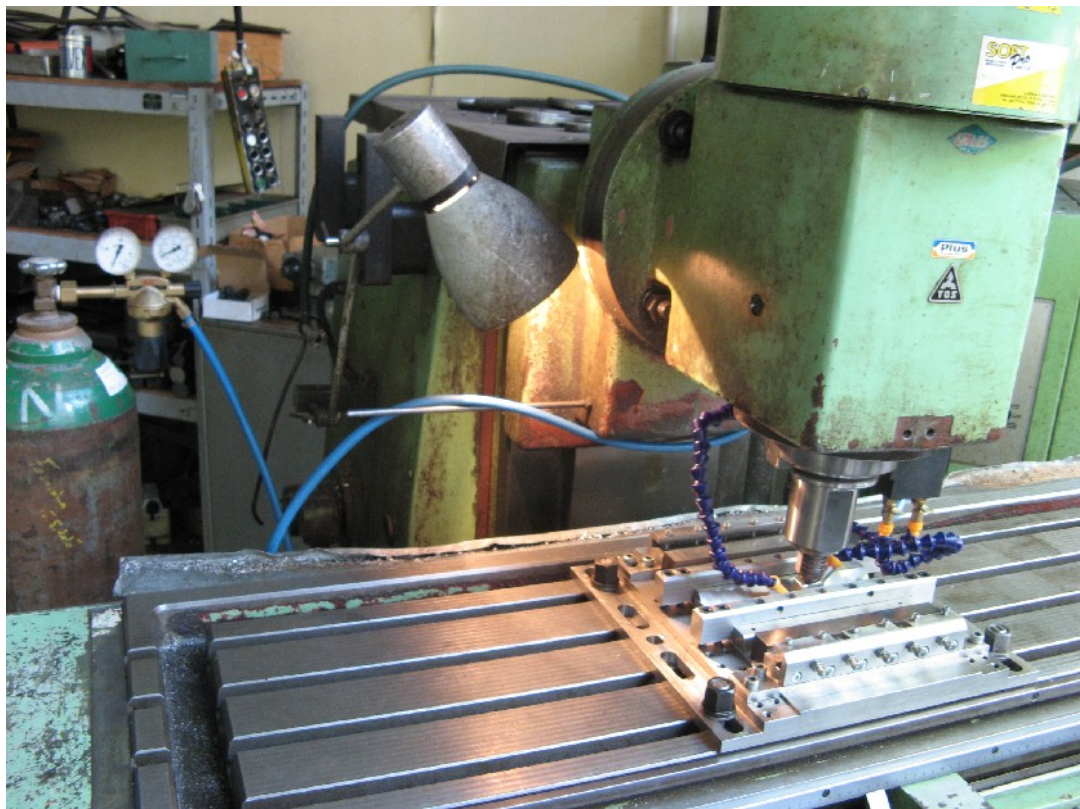
Svařování hořčíkových slitin bylo realizováno třemi metodami – Friction Stir Welding, pulzním pevnolátkovým laserem a kontinuálním vláknovým laserem. Jednotlivé plechy byly svařovány na tupo, svařované hrany byly zbroušeny do roviny na rovinné brusce a před svařováním odmaštěny pomocí isopropylalkoholu. V případě slitin AZ31 (tl. 1,6 mm) a ZE10 (tl. 1,6 mm) bylo pomocí termočlánků měřeno teplotní pole. Byly použity termočlánky typu K (Ni a Ni-Cr) o průměru drátu 0,1 mm. K základnímu materiálu byly připevněny pomocí keramického lepidla CC High Temp (pro svařování metodou Friction Stir Welding a pevnolátkovým laserem), příp. bodovou svářečkou (pro svařováním vláknovým laserem). Rozmístění jednotlivých termočlánků je uvedeno na obr. 4.12.



Obr. 4:12 Rozmístění termočlánků při svařování (a) metodou Friction Stir Welding a (b) pevnolátkovým laserem, (c) vláknovým laserem

Svařování metodou Friction Stir Welding

Svařování metodou Friction Stir Welding bylo realizováno ve VZLÚ, a.s. na manuálně řízené konzolové frézce FGU 40 od firmy TOS Olomouc (obr. 4.13) s digitálním odměřovacím zařízením umožňujícím nastavení polohy svařovacího nástroje.

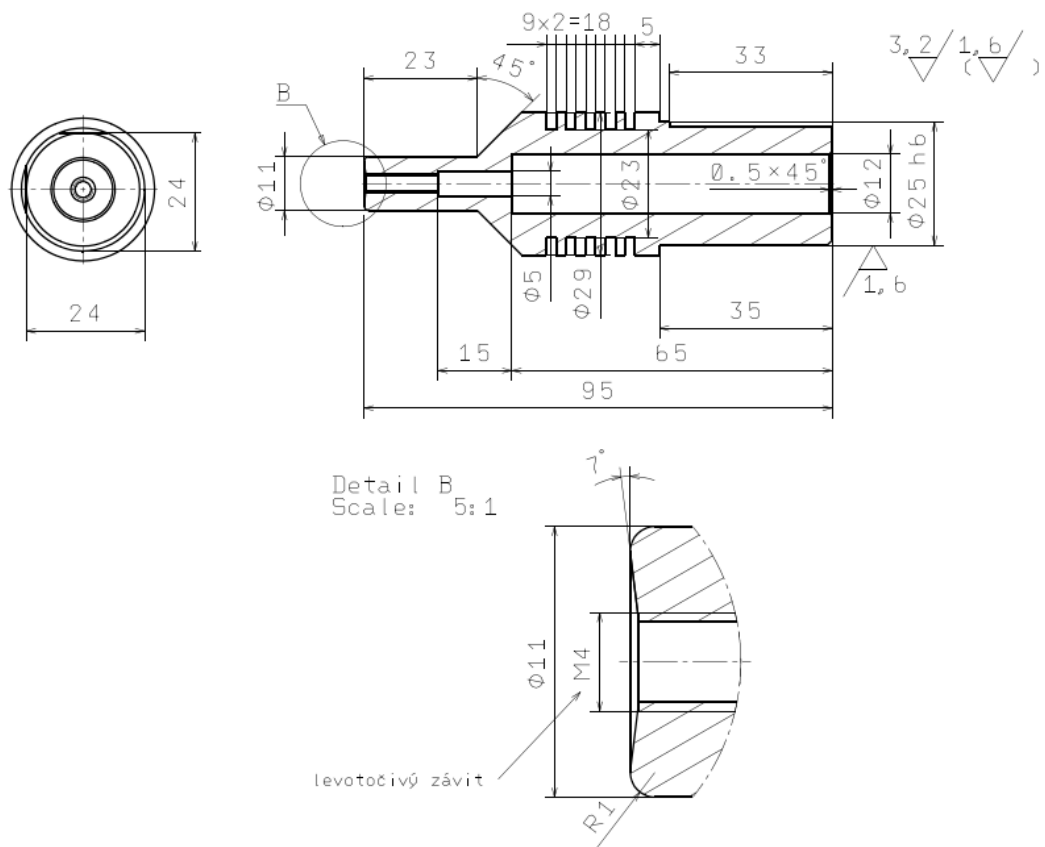


Obr. 4.13 Konzolová frézka FGU 40 s upnutým hrotem a svařovacím přípravkem

Nástroj pro třecí svařování se skládal z těla a pinu. Tělo bylo vyrobeno z nástrojové oceli X40CrMoV5-1 o tvrdosti 55 HRC. Pin svařovacího nástroje byl vyroben z maraging oceli X3NiCoMoTi18-9-5 v podobě šroubu M4 tepelně zpracovaný precipitačním vytvrzováním (ohřev a výdrž na teplotě 490 °C po dobu 6 hodin s následným chlazením na vzduchu).

Rameno svařovacího nástroje mělo průměr 11 mm a konkávitu 7° (viz obr. 4.14). Pin byl upraven do trojúhelníkového tvaru a délka pinu byla postupně zkracována na 0,6 mm, 1,33 mm, 1,65 mm a 2,65 mm dle tloušťky svařovaného materiálu.

Zvolené podmínky pro svařování jednotlivých slitin jsou uvedeny v tab. 4.14. V příčném směru bylo vyzkoušeno více svařovacích parametrů, svarové spoje jsou označeny číslicemi I a II. Hloubka zanoření nástroje je pro všechny slitiny zvolena tak, aby se pin svařovacího nástroje pohyboval ve vzdálenosti 0,16 mm od povrchu svařovací podložky.



Obr. 4.14 Výkres těla svařovacího nástroje zhotoveného z oceli X40CrMoV5-1

Tab. 4.14 Podmínky svařování metodou Friction Stir Welding

Svar proveden kolmo na:	AZ31 1,6 mm			AZ31 3 mm			AZ61 0,8 mm		
	podélný směr	příčný směr	příčný směr	podélný směr	příčný směr	příčný směr	podélný směr	příčný směr	příčný směr
Označení svaru:		I	II		I	II		I	II
Počet otáček [ot/min]	900	900	560	710	900	560	710	710	1120
Rychlost posuvu [mm/min]	112	112	112	112	112	112	112	112	112
Náklon [°]	1,5	1,5	1,5	2,5	2	2,5	1,5	1,5	1,5

Svar proveden kolmo na:	ZE10 1,6 mm		ZE41 2 mm	
	podélný směr	příčný směr	podélný směr	příčný směr
Počet otáček [ot/min]	1120	900	900	1120
Rychlost posuvu [mm/min]	112	112	112	112
Náklon [°]	1,5	1,5	2	2

Svařování pulzním pevnolátkovým laserem

Pro svařování hořčičkových slitin ve formě plechů pomocí pevnolátkového laseru bylo využito pracoviště Fakulty strojní ČVUT. Svařování bylo realizováno pulzním pevnolátkovým Nd:YAG laserem JK701H fy GSI Lumonics (obr. 4.15) s maximálním výkonem 550W.



Obr. 4.15 Pulzní Nd:YAG laser s upínacím přípravkem a měřicí ústřednou

Z důvodu nízkého výkonu laseru byly pro svařování vybrány slitiny dodané v tloušťce 0,8 mm (AZ61) a 1,6 mm (AZ31 a ZE10). Jednotlivé podmínky jsou uvedeny v tab. 4.15.

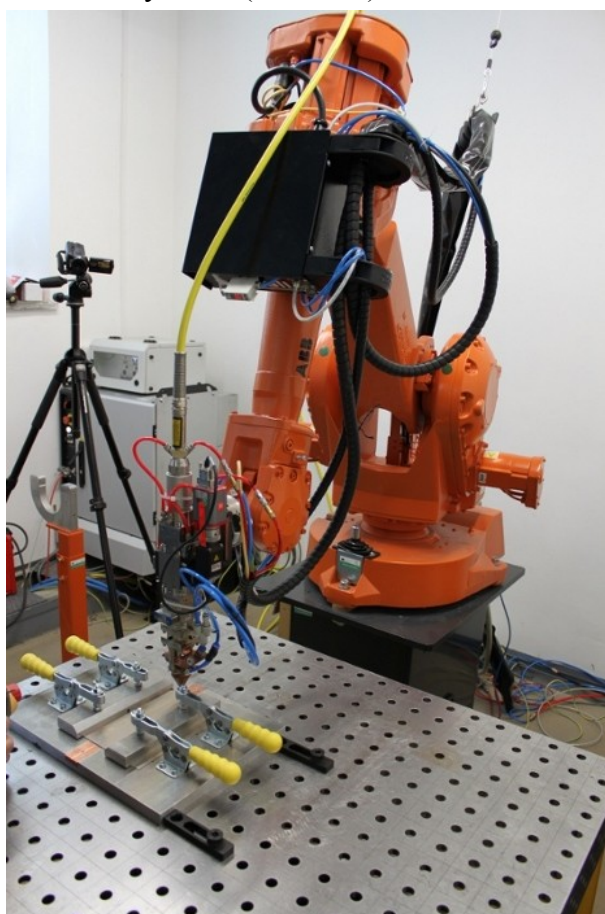
Tab. 4.15 Podmínky svařování pulzním pevnolátkovým laserem

Svar proveden kolmo na:	AZ31 1,6 mm			AZ61 0,8 mm		ZE10 1,6 mm	
	podélný směr	příčný směr *	příčný směr	podélný směr	příčný směr	příčný směr *	příčný směr
Označení svaru:		I	II			I	II
Jmenovitý výkon [%]	39	38	40	30	30	43	49
Délka pulsu [ms]	7	7	7	7	7	7	7
Počet pulsů [Hz]	30	30	30	30	30	30	30
Rychlost [mm/min]	450	500	450	400	400	400	400
Výkon [W]	325	310	338	210	210	386	485
Tlak Ar [bar]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

* oboustranný svar

Svařování kontinuálním vláknovým laserem

Svařování kontinuálním vláknovým laserem bylo uskutečněno na pracovišti Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Pro svařování byl použit kontinuální vláknový laser YLS-2000 od fy IPG Precitec o maximálním výkonu 2kW se svařovací hlavou YW30 fy IPG Precitec upevněnou na robotovi IRB2400 fy ABB (obr. 4.16).



Obr. 4.16 Kontinuální vláknový laser (svařovací hlava a manipulační robot)

Vzhledem k předchozím svařovacím metodám byly pro svařováním vláknovým laserem zvoleny slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm) a AZ61 (tl. 0,8 mm). Jednotlivé podmínky svařování jsou uvedeny v tab. 4.16.

Tab. 4.16 Podmínky svařování kontinuálním vláknovým laserem

Svar proveden kolmo na:	AZ31 1,6 mm		AZ61 0,8 mm	
	podélný směr	příčný směr	podélný směr	příčný směr
Výkon [W]	500	500	200	200
Rychlost [mm/min]	3600	3600	3000	3000
Průtok Ar [l/min]	12	12	12	12

4.5 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

4.5.1 Svařování metodou Friction Stir Welding

Vizuální hodnocení svarových spojů

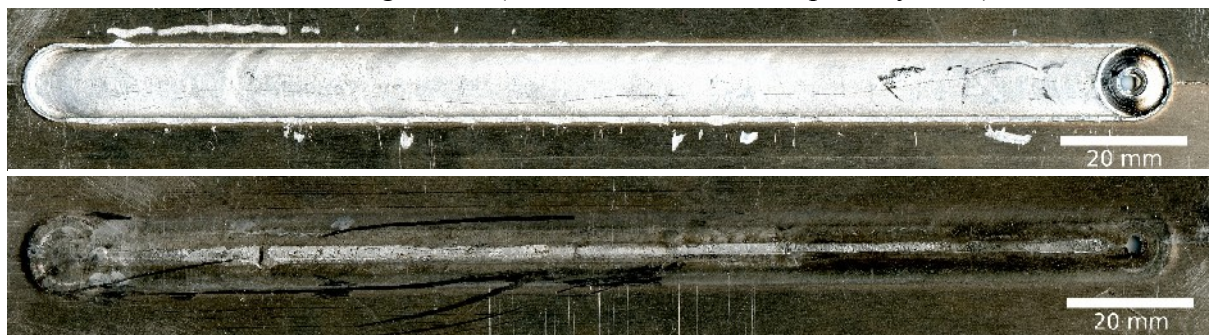
Svarový spoj zhotovený metodou Friction Stir Welding je zdokumentován na obr. 4.17 až obr. 4.20. Svar měl šířku ramene nástroje (tj. 11 mm) a ve všech případech došlo ke kompletnímu provaření materiálu.



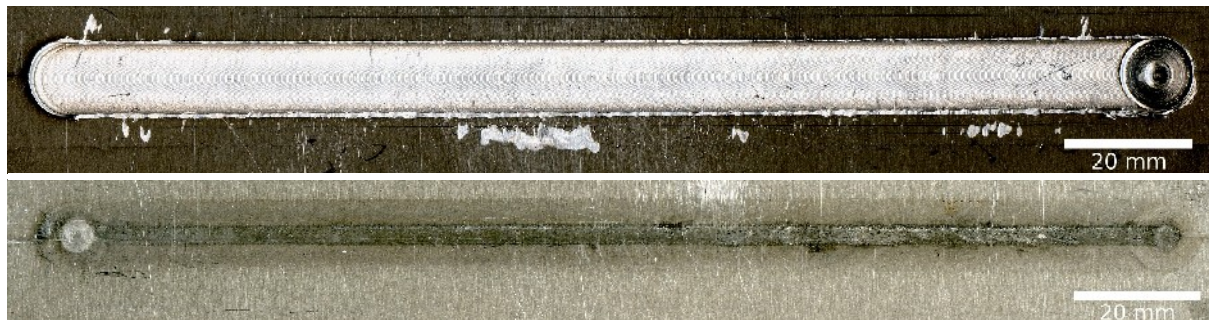
Obr. 4.17 Vzhled svarového spoje (vrchní a spodní část svaru) zhotoveného metodou Friction Stir Welding, AZ31 (1,6 mm, svar kolmo na podélný směr)



Obr. 4.18 Vzhled svarového spoje (vrchní a spodní část svaru) zhotoveného metodou Friction Stir Welding, AZ61 (0,8 mm, svar kolmo na podélný směr)



Obr. 4.19 Vzhled svarového spoje (vrchní a spodní část svaru) zhotoveného metodou Friction Stir Welding, ZE10 (1,6 mm, svar kolmo na podélný směr)

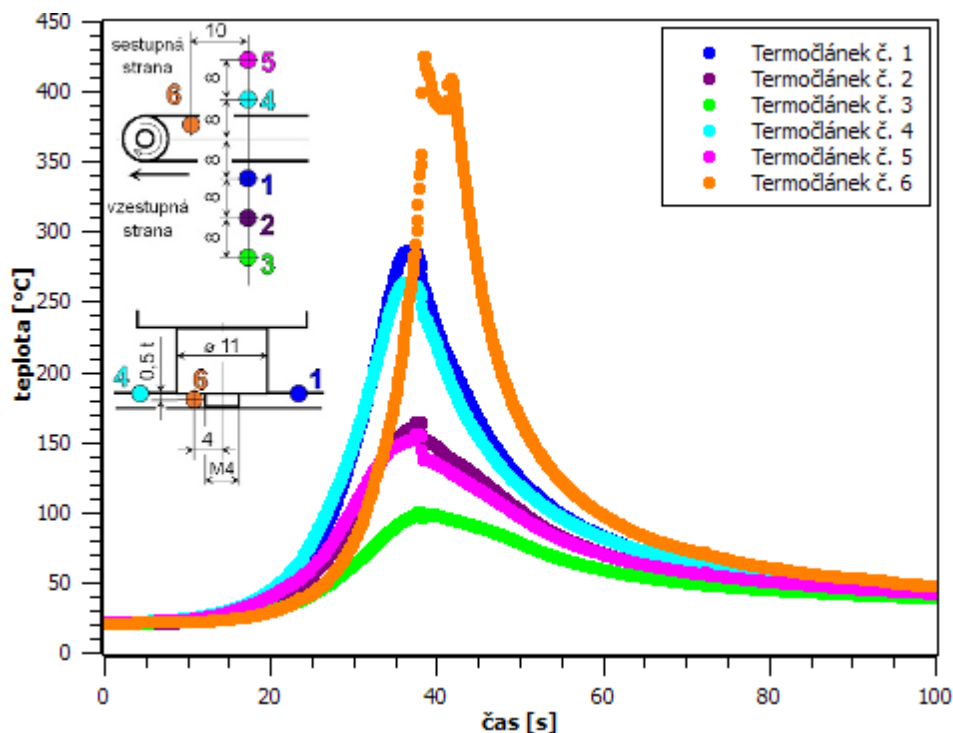


Obr. 4.20 Vzhled svarového spoje (vrchní a spodní část svaru) zhotoveného metodou Friction Stir Welding, ZE41 (2 mm, svar kolmo na podélný směr)

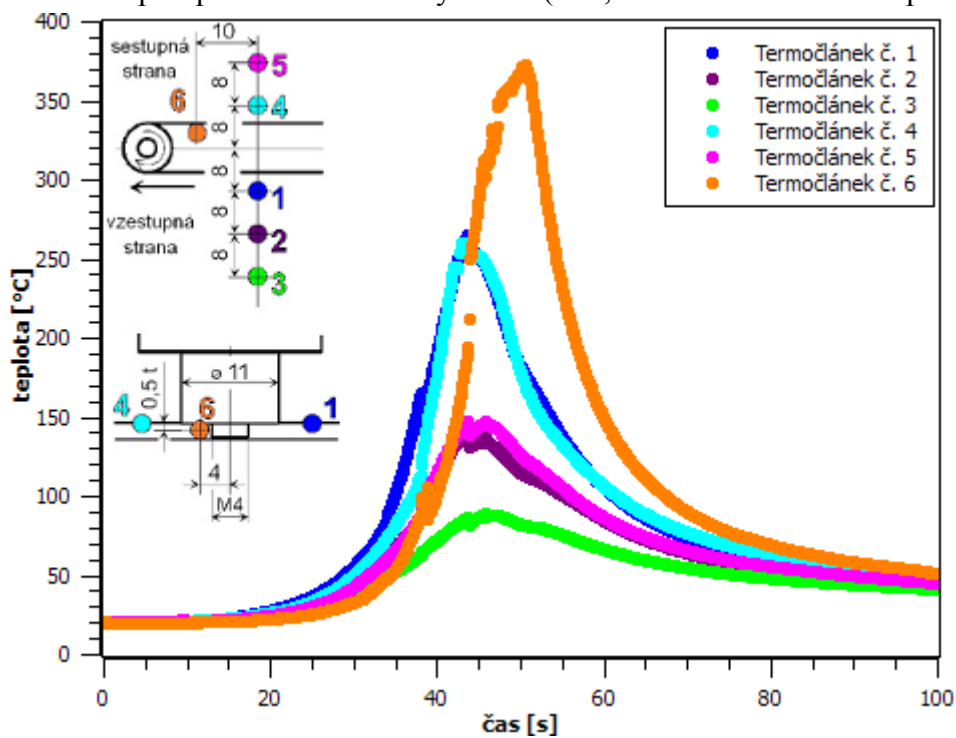
Měření teplotního pole

Slitina AZ31 dosahovala při FSW (obr. 4.21) maximálních teplot 430 °C (4 mm od svarového spoje), ve vzdálenosti 8 mm od svaru již pouze hodnot 250 °C a v maximální měřené vzdálenosti 24 mm jen 100 °C.

U slitiny ZE10 při svařování metodou FSW (obr. 4.22) byla ve vzdálenosti 4 mm od osy svaru naměřena teplota 380 °C, na termočláncích umístěných 8 mm od osy byla zaznamenána teplota okolo hodnot 250 °C. Teplota postupně klesala až na hodnotu 70 °C (24 mm od svaru).



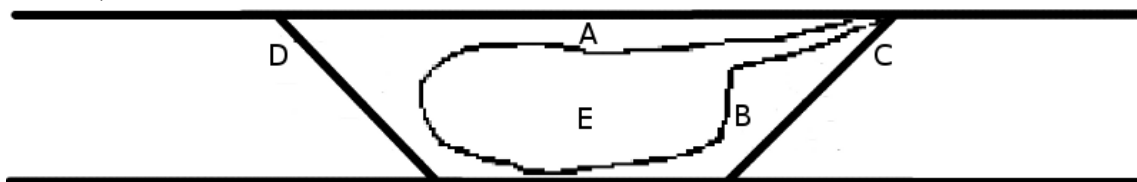
Obr. 4.21 Průběh teplot při svařování slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm – svar kolmo na příčný směr)



Obr. 4.22 Průběh teplot při svařování slitiny ZE10 (tl. 1,6 mm – svar kolmo na příčný směr)

Metalografické hodnocení svarových spojů

Pro metalografické hodnocení byl svarový spoj zdokumentován na místech uvedených na obr. 4.23. Místo A (SZ) ukazuje oblast v místě hrotu svařovacího nástroje, oblast B (TMAZ) pravou část svaru. Oblasti C a D ukazují proudění materiálu, ke kterému docházelo v průběhu svařování. Pokud došlo k formování nuggetu, je zdokumentován jako oblast E (Příloha 2).



Obr. 4.23 Schématický náčrt svaru s označenými polohami mikrostruktur uvedených v Příloze 2

Svarový spoj AZ31 (tl. 1,6 mm)

Na obr. P2.1 až obr. P2.4 v Příloze 2 je uvedena struktura svaru slitiny AZ31 v podélném směru. V oblasti A (obr. P2.1) a B (obr. P2.2) dosahuje velikost zrna průměrné hodnoty 15 μm . Mikrostruktura v příčném směru I (rychlost rotace nástroje 900 ot/min) zdokumentována na obr. P2.5 až obr. P2.8 je v oblasti A a B jemnozrnější než v podélném směru (velikost zrna okolo 10 μm). Na snímcích z míst C a D je patrný směr toku zplastizovaného materiálu. Mikrostruktura svarového spoje v příčném směru II (rychlost rotace nástroje 560 ot/min), která je zobrazena na obr. P2.9 a obr. P2.12, je prakticky totožná jako struktura svarového spoje v příčném směru I. Částice, které se na světelném mikroskopu jeví jako modré, jsou vměštky na bázi Mn a v průběhu svařování tedy nedošlo k jejich rozpuštění.

Svarový spoj AZ31 (tl. 3 mm)

Na obr. P2.13 a obr. P2.14 je zdokumentována mikrostruktura slitiny AZ31 (tl. 3 mm) v podélném směru. Velikost zrn v oblastech A a B je velmi malá, okolo hodnoty 10 μm . V případě svarového spoje v příčném směru I (rychlost rotace nástroje 900 ot/min, obr. P2.15 a obr. P2.16) a II (560 ot/min, obr. P2.17 a obr. P2.18) dosahuje velikost zrna podobných hodnot. Částice, které se na světelném mikroskopu jeví jako modré, jsou vměštky na bázi Mn a v průběhu svařování tedy nedošlo k jejich rozpuštění. V porovnání se slitinou AZ31 (tl. 1,6 mm) nebyla v oblasti C a D pozorována struktura ukazující proudění materiálu.

Svarový spoj AZ61 (tl. 0,8 mm)

Struktura zhotovených svarových spojů slitiny AZ61 v oblasti A a B je uvedena na obr. P2.19 až obr. P2.24. Velikost zrn v podélném i příčném směru se pohybuje okolo 10 μm . V případě podélného směru a příčného směru I (rychlost rotace nástroje 710 ot/min) je distribuce velikosti zrn poměrně široká. Mikrostruktura svaru příčného směru II (rychlost rotace 1120 ot/min, obr. P2.23 a obr. P2.24) ukazuje nepatrně větší velikost zrna, ale rovnoměrnější rozložení velikosti zrna. Na rozdíl od základního materiálu se v oblasti A a B vyskytuje menší množství fází vyloučených ve formě částic. V porovnání se slitinou AZ31 (tl. 1,6 mm) nebyla v oblasti C a D pozorována struktura ukazující proudění materiálu.

Svarový spoj ZE10 (tl. 1,6 mm)

Mikrostruktura svarového spoje slitiny ZE10 v podélném směru je zobrazena v Příloze 2 na obr. P2.25 až P2.28. Průměrná velikost zrna v oblasti A a B byla cca 10 μm . V příčném směru (obr. P2.29 až obr. P2.32) se velikost zrna zmenšila až na rozměr cca 5 μm . Na obr. P2.31 a obr. P2.32 je patrná hranice mezi TMAZ a HAZ, která je zdůrazněna odlišnou velikostí zrn v daných oblastech.

Svarový spoj ZE41 (tl. 2 mm)

Na obr. P2.33 až obr. P2.39 je zobrazen svarových spoj slitiny ZE41 v podélném směru. Ze snímků je patrné, že došlo ke zformování nuggetu (obr. P2.34), který se skládá z velmi jemnozrné struktury, hrubé částice fáze MgZnRE prakticky nebyly zachovány. Mikrostruktura v místě A a B (obr. P2.36 až obr. P2.39) se vyznačuje velikostí zrn cca 5 μm a částicemi fáze MgZnRE. Pásky, které se na světelném mikroskopu jeví jako hnědé, sledují tvářenou strukturu materiálu.

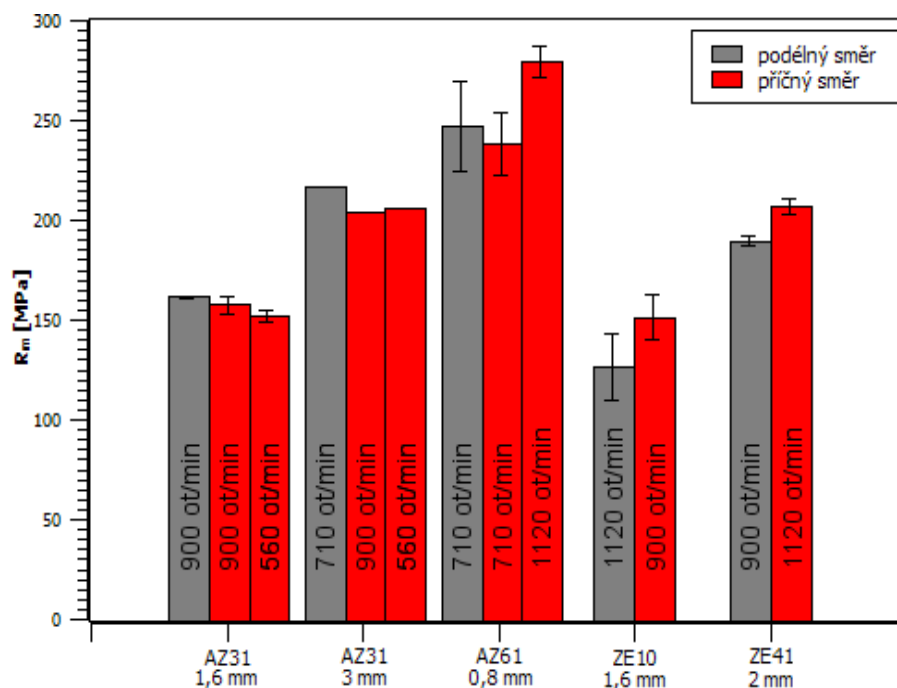
Ve svarovém spoji slitiny ZE41 v příčném směru (obr. P2.40 až obr. P2.46) se oblast nuggetu zformovala pravidelněji. Na snímku obr. P2.41 je zdokumentována struktura nuggetu svaru zvaná cibulové kroužky. Mikrostruktura nuggetu (obr. P2.42) je opět velmi jemnozrná, s množstvím drobných částic a s malým podílem zachovaných hrubých částic fáze MgZnRE. Mikrostruktura místa A a B (obr. P2.43 až obr. 2.47) je tvořena zrny tuhého roztoku δ o velikosti cca 5 μm a částicemi fáze MgZnRE. Pásky, které se na světelném mikroskopu jeví jako hnědé, opět sledují tvářenou strukturu materiálu.

Základní mechanické vlastnosti svarových spojů

Dosahované meze pevnosti experimentálního materiálu svařeného metodou FSW jsou uvedeny v tab. 4.17 a na obr. 4.24. U slitiny AZ31 (1,6 mm) svařené při rychlosti rotace nástroje 900 ot/min neměla orientace plechu vliv na mez pevnosti svaru. Při snížení otáček došlo v příčném směru k mírnému poklesu meze pevnosti. U svarových spojů slitiny AZ31 (3 mm) v příčném směru nezpůsobil pokles rychlosti rotace nástroje významný pokles meze pevnosti. Slitina AZ61 (0,8 mm) disponovala v příčném směru výrazně vyšší mezí pevnosti při vyšší rychlosti rotace nástroje. U slitin typu ZE byla v každém směru svařena jedna dvojice.

Tab. 4.17 Hodnoty meze pevnosti experimentálního materiálu

Slitina	Orientace vůči rozměru plechu	Označení svaru:	Rychlost rotace nástroje [ot/min]	\bar{x}	s	R_m [MPa]
AZ31 (1,6 mm)	podélný směr		900	\bar{x}		161,5
				s		0,7
	příčný směr	I	900	\bar{x}		157,4
				s		4,5
	příčný směr	II	560	\bar{x}		151,8
				s		3,1
AZ31 (3 mm)	podélný směr		710	\bar{x}		216,4
				s		
	příčný směr	I	900	\bar{x}		203,5
				s		
	příčný směr	II	560	\bar{x}		205,9
				s		
AZ61 (0,8 mm)	podélný směr		710	\bar{x}		247,2
				s		22,7
	příčný směr	I	710	\bar{x}		238,2
				s		15,8
	příčný směr	II	1120	\bar{x}		279,3
				s		7,8
ZE10 (1,6 mm)	podélný směr		1120	\bar{x}		126,5
				s		16,4
	příčný směr		900	\bar{x}		151,3
				s		11,0
ZE41 (2 mm)	podélný směr		900	\bar{x}		189,6
				s		2,3
	příčný směr		1120	\bar{x}		206,6
				s		3,8



Obr. 4.24 Hodnoty meze pevnosti experimentálního materiálu

Grafické znázornění průběhu mikrotvrdoosti svařovaných slitin AZ31 (tl. 1,6 mm a 3 mm), AZ61, ZE10 a ZE41 je uveden na obr. 4.25 až obr. 4.29.

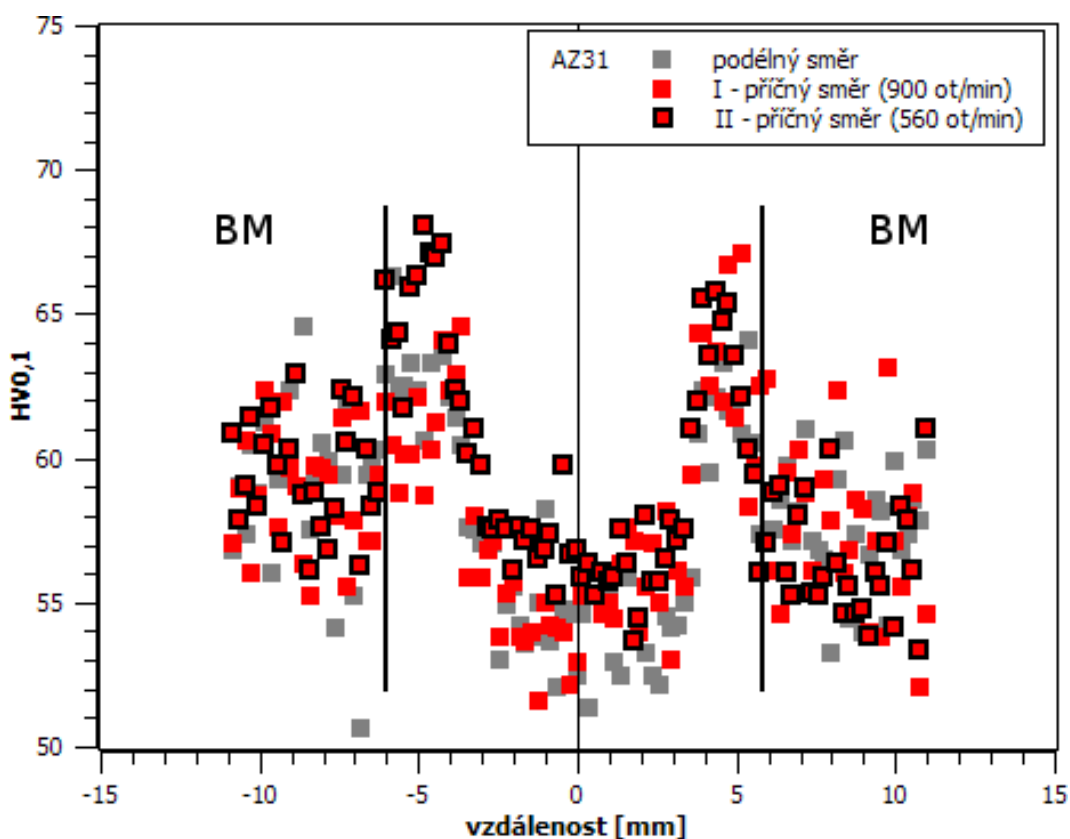
U slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm, obr. 4.25) se průběh mikrotvrdoosti ve svarovém spoji a základním materiálu pro různé směry a svařovací podmínky prakticky neliší. Ve svaru zhotoveném v podélném směru (900 ot/min) byla v oblasti pod hrotem nástroje v šířce 6 mm naměřena tvrdost 55 HV_{0,1}, tedy nižší než je tvrdost základní materiálu BM (59 HV_{0,1}). V oblasti od hrotu nástroje směrem k základnímu materiálu tvrdost výrazně narůstala až na hodnotu 67 HV_{0,1}. Průběh mikrotvrdoosti ve svarovém spoji v příčném směru I (900 ot/min) je prakticky totožný, ve svaru v příčném směru II (560 ot/min) byla v oblasti po hrotem naměřena tvrdost mírně vyšší (57 HV_{0,1}) než v předchozích případech.

Průběh mikrotvrdoosti slitiny AZ31 (tl. 3 mm, obr. 4.26) vykazoval stejný charakter jako u slitiny AZ31 o tloušťce 1,6 mm, ale rozdíly mezi jednotlivými oblastmi nebyly z hlediska tvrdosti tak odlišné. Tvrdost v oblasti hrotu nástroje se pohybovala okolo hodnot 57 HV_{0,1}. V oblasti přechodu mezi svarovým spojem a BM tvrdost narostla na hodnotu 66 HV_{0,1}. Tvrdost BM oscilovala okolo hodnoty 58 HV_{0,1}. Průběh i hodnoty mikrotvrdoosti byly pro všechny směry a podmínky prakticky totožné.

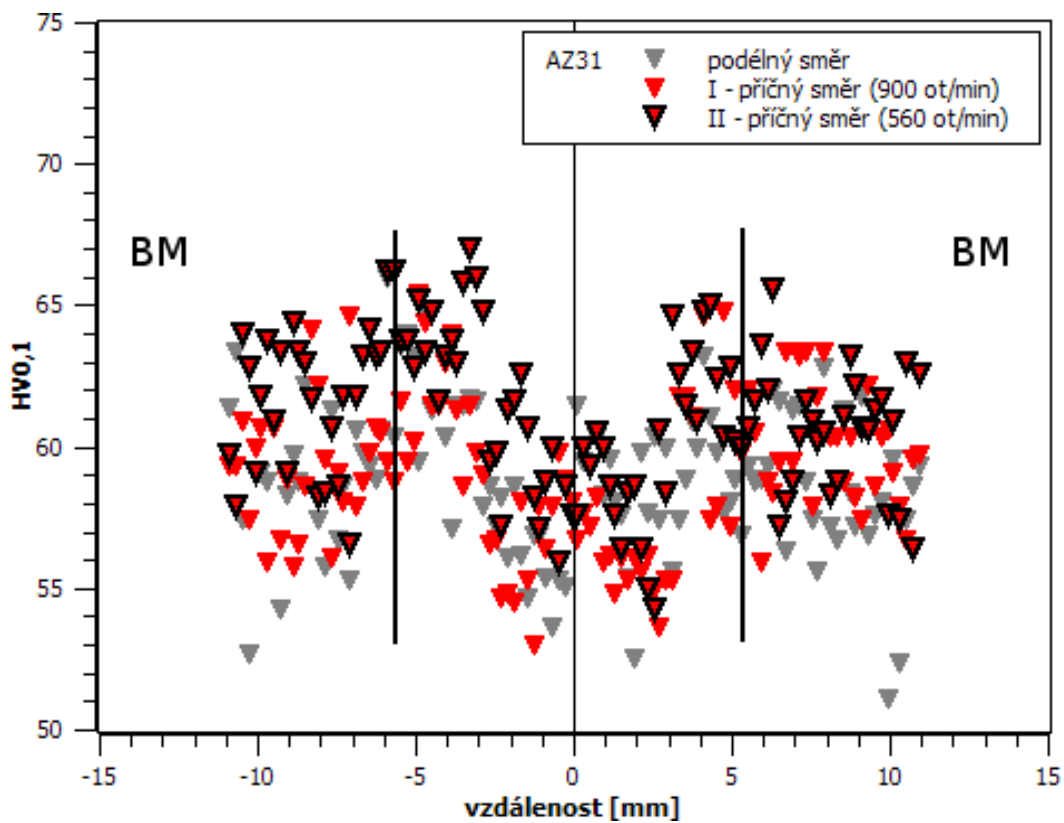
U všech svarových spojů slitiny AZ61 (obr. 4.27) byla pozorována snížená tvrdost v oblasti svarového spoje (okolo 72 HV_{0,1}), pro příčný směr II (1120 ot/min) byla tvrdost pod hrotem 69 HV_{0,1}. Tvrdost postupně narůstala až do vzdálenosti cca 5,5 mm od středu svaru, kde se ustálila na hodnotě tvrdosti cca 80 HV_{0,1}, což odpovídá tvrdosti materiálu.

U slitiny ZE10 (obr. 4.28) v podélném směru dosahovala tvrdost na místě pod svařovacím hrotem v šířce 6 mm hodnot 49 HV_{0,1}, tedy nižší mírně nižších hodnot než v základním materiálu – 52 HV_{0,1}. V oblasti od hrotu nástroje směrem k základnímu materiálu tvrdost výrazně narůstala až na hodnotu 52 HV_{0,1}. Průběh mikrotvrdoosti na vzestupné straně (plusové hodnoty vzdálenosti od středu svaru) svarového spoje slitiny ZE10 v příčném směru je od sestupné strany odlišný. V oblasti polohy svařovacího nástroje došlo k lokálnímu nárůstu tvrdosti materiálu na hodnotu 58 HV_{0,1}. Směrem k BM pak nastává plynulý pokles až na hodnotu 50 HV_{0,1}. Na sestupné straně je tvrdost v oblasti hrotu nástroje jen 54 HV_{0,1}, následovaná poklesem na 51 HV_{0,1} a prudkým růstem na 60 HV_{0,1}. Dále pak následuje oblast základního materiálu o tvrdosti 52 HV_{0,1}.

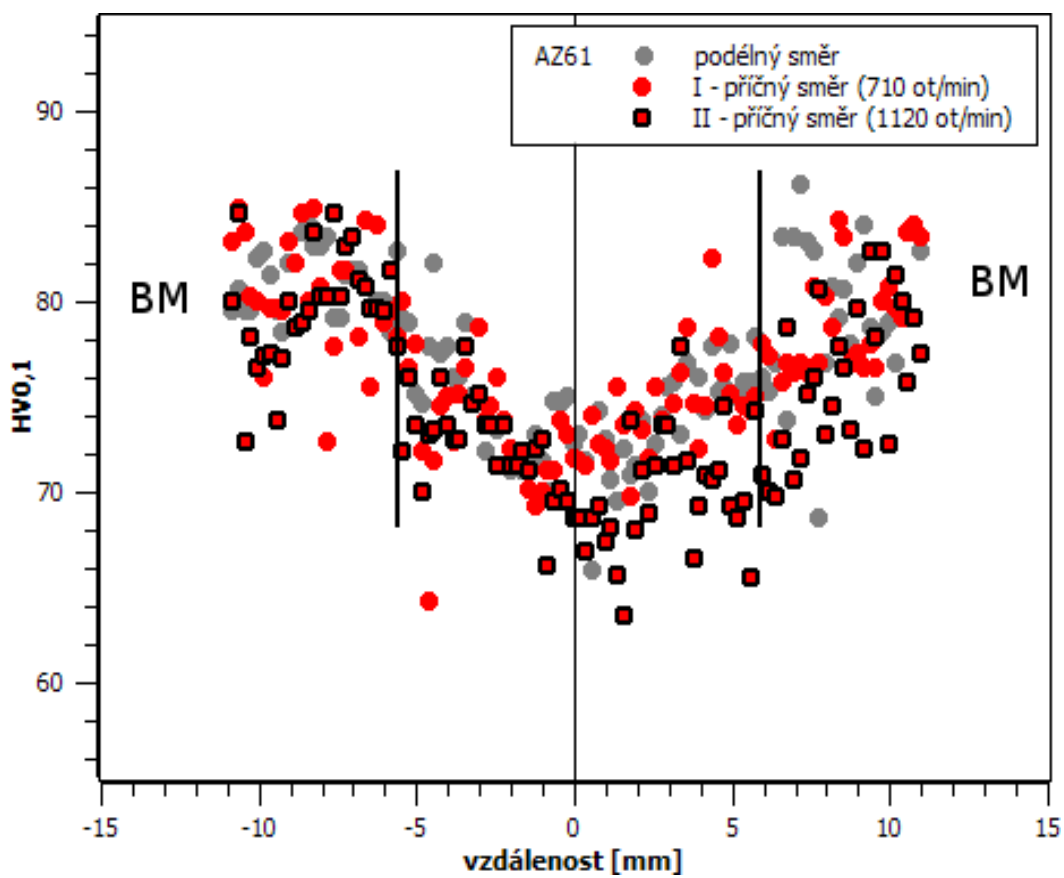
V případě slitiny ZE41 (obr. 4.29) v podélném směru je tvrdost v oblasti místa hrotu svařovacího nástroje přibližně rovna tvrdosti základního materiálu (cca 62 HV_{0,1}). Směrem od středu svaru tvrdost experimentálního materiálu mírně roste na hodnotu 64 HV_{0,1}. Na vzestupné straně svařového spoje ve vzdálenosti cca 2-3 mm se nachází velmi úzká oblast ustálených hodnot tvrdosti (66 HV_{0,1}). Ve vzdálenosti 3 mm byla lokalizovaná velmi úzká oblast s nízkou tvrdostí 45 HV_{0,1}, resp. 49 HV_{0,1}. V případě svařového spoje zhotoveného v příčném směru je tvrdost v oblasti hrotu nástroje vyšší (66 HV_{0,1}). Na vzestupné straně (1,5-4 mm od středu svaru) se opět nachází oblast ustálených hodnot tvrdosti (66 HV_{0,1}). Tvrdost základního materiálu se pak pohybuje na hodnotách 63 HV_{0,1}.



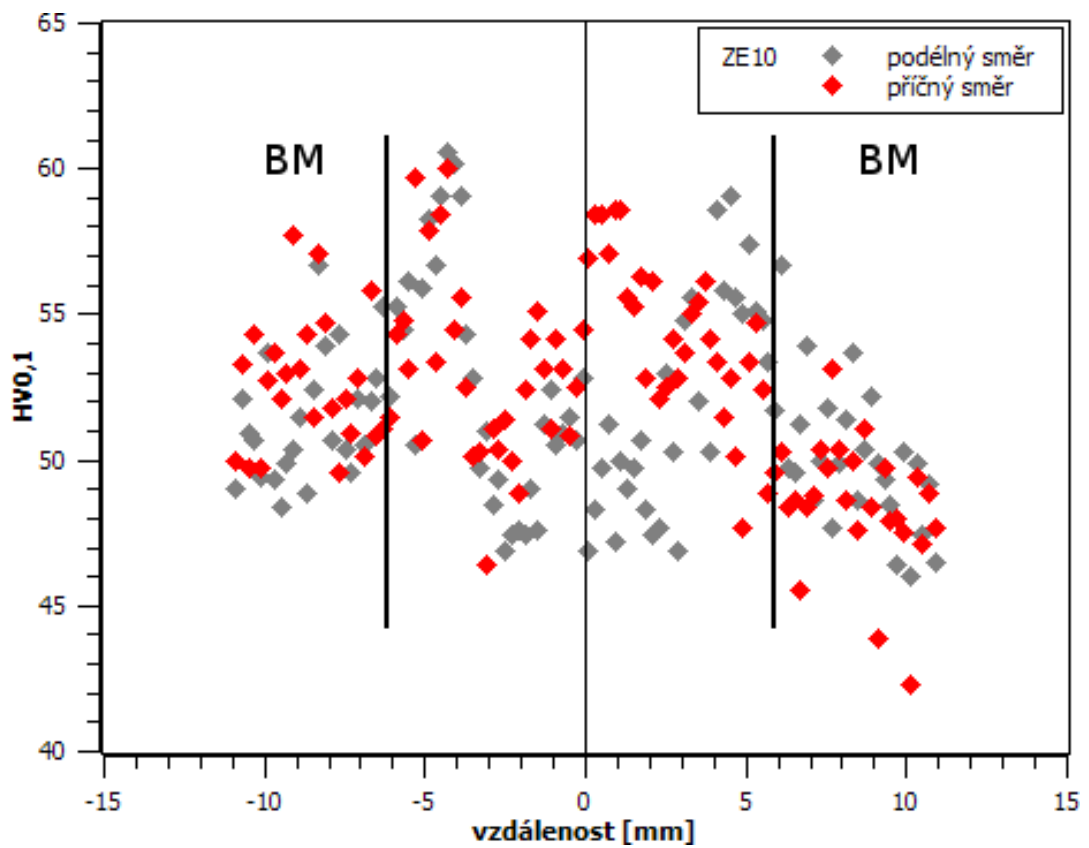
Obr. 4.25 Průběh mikrotvrdosti svařových spojů slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm)



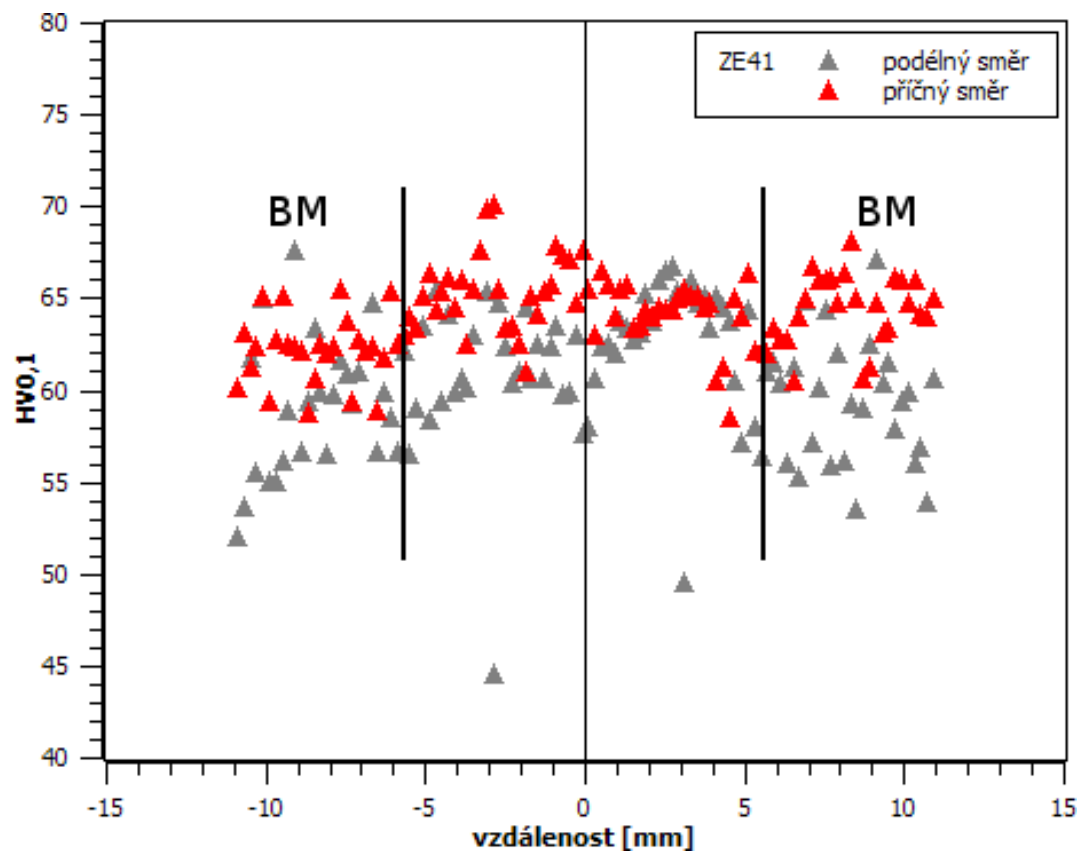
Obr. 4.26 Průběh mikrotvrlosti svarových spojů slitiny AZ31 (tl. 3 mm)



Obr. 4.27 Průběh mikrotvrlosti svarových spojů slitiny AZ61



Obr. 4.28 Průběh mikrotvrlosti svarových spojů slitiny ZE10



Obr. 4.29 Průběh mikrotvrlosti svarových spojů slitiny ZE41

4.5.2 Svařování pulzním pevnolátkovým laserem

Vizuální hodnocení svarových spojů

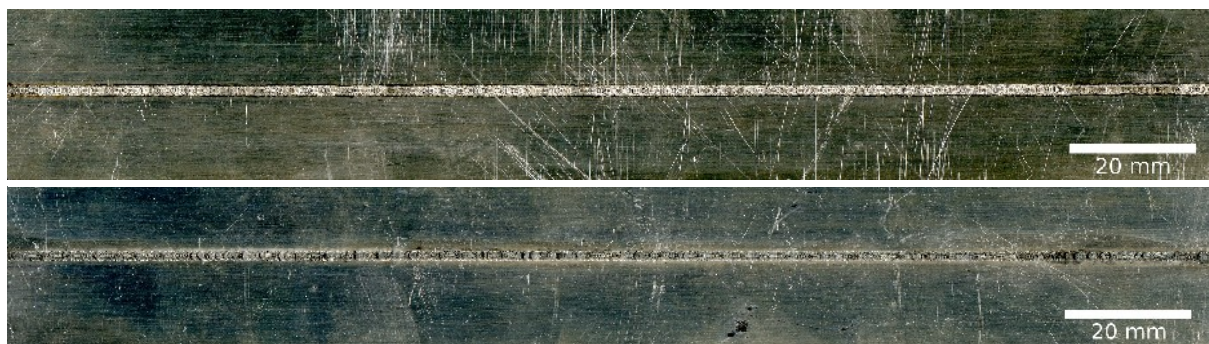
V případě slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm – obr. 4.30) byl svar na spodní straně plechu užší a mírně propadlý. Při oboustranném svařování docházelo k propadu svaru stále .

Při svařování pevnolátkovým laserem slitiny AZ61 došlo k plnému provaření základního materiálu (obr. 4.31), přičemž šířka svaru na vrchní a spodní straně plechu byla podobná.

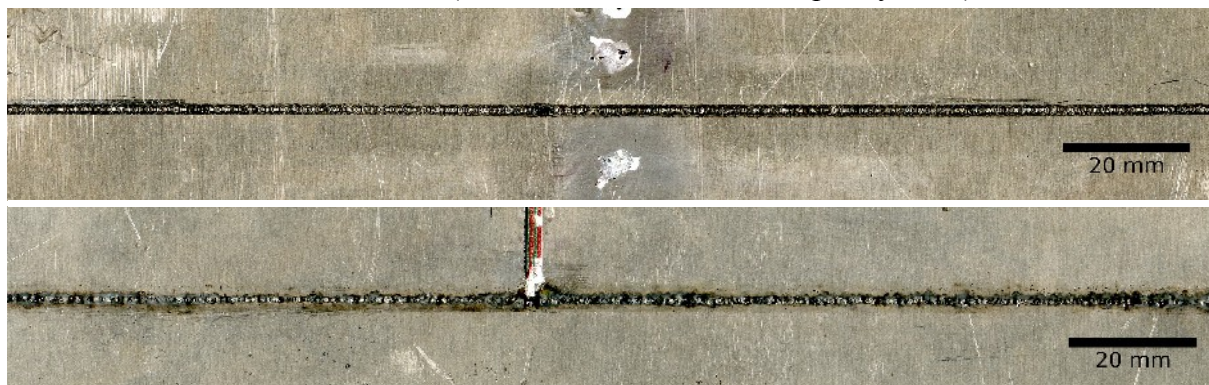
Slitina ZE10 (obr. 4.32) byla svařována prakticky maximálním výkonem, jinak nedocházelo k provaření. Ve zhotoveném svarovém spoji byla však nalezena trhlinka podél celého spoje (i v případě oboustranného svařování s aplikovaným nižším výkonem).



Obr. 4.30 Vzhled svarového spoje (vrchní a spodní část svaru) zhotoveného pevnolátkovým laserem, AZ31 (tl. 1,6 mm – svar kolmo na příčný směr)



Obr. 4.31 Vzhled svarového spoje (vrchní a spodní část svaru) zhotoveného pevnolátkovým laserem, AZ61 (tl. 0,8 mm – svar kolmo na příčný směr)

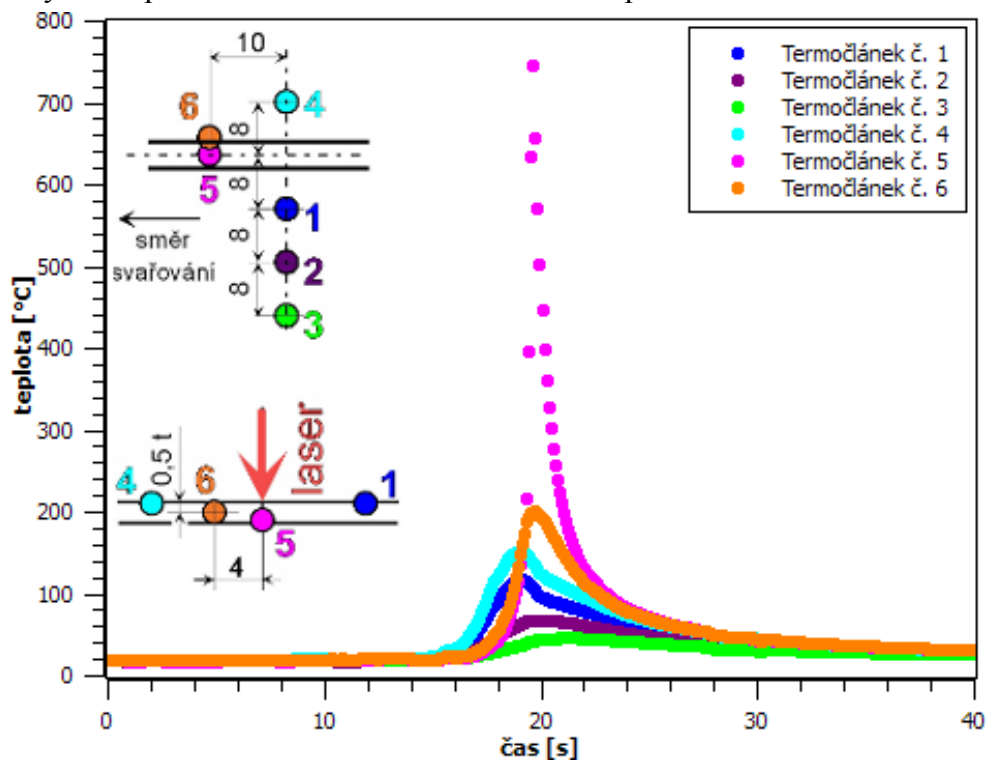


Obr. 4.32 Vzhled svarového spoje (vrchní a spodní část svaru) zhotoveného pevnolátkovým laserem, ZE10 (tl. 1,6 mm – svar kolmo na příčný směr)

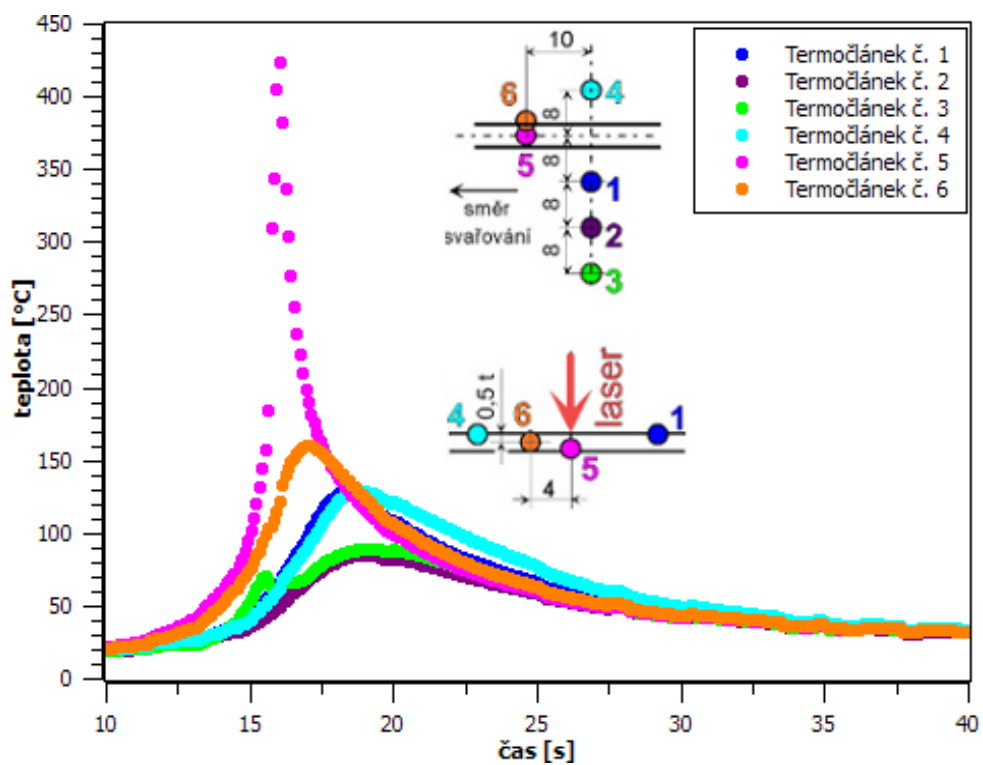
Měření teplotního pole

Slitina AZ31 (obr. 4.33) byla naměřena v ose svaru teploty 800 °C. Ve vzdálenosti 4 mm od osy svaru byla teplota již pouze 200 °C a 8 mm od svarového spoje hodnot okolo 100 °C. V maximální měřené vzdálenosti (24 mm) měl experimentální materiál při svařování prakticky pokojovou teplotu.

Pro slitinu ZE10 (obr. 4.34) byla v ose svaru naměřena teplota 430 °C. Ve vzdálenosti 4 mm od osy svaru pak 150 °C a ve vzdálenosti 24 mm opět okolo 70 °C.



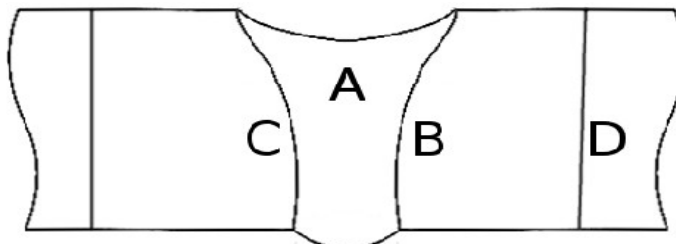
Obr. 4.33 Průběh teplot při svařování slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm – svar kolmo na příčný směr)



Obr. 4.34 Průběh teplot při svařování slitiny ZE10 (tl. 1,6 mm – svar kolmo na příčný směr)

Metalografické hodnocení svarových spojů

Pro metalografické hodnocení byl svarový spoj zdokumentován na místech uvedených na obr. 4.35. Oblast A dokumentuje FZ, oblast B a C dokumentuje přechod FZ a HAZ a na snímcích z oblasti D je uveden přechod z HAZ do BM (Příloha 3).



Obr. 4.35 Schématický náčrt svaru s označenými polohami mikrostruktur uvedených v Příloze 3

Svarový spoj AZ31 (tl. 1,6 mm)

Mikrostruktura slitiny AZ31 v podélném směru je zobrazena na obr. P3.1 až obr. P3.4. Svarový spoj je mírně propadlý a v FZ jsou přítomné póry (obr. P3.1). FZ odděluje od HAZ tenká PMZ, hranice mezi HAZ a BM není patrná. Mikrostruktura FZ (obr. X.X) je tvořena dendritickou strukturou s výrazným vyloučením fáze po hranicích dendritů (pravděpodobně fáze γ a jemnou disperzí částic). Na obr. P3.3 a obr. P3.4 je možné pozorovat PMZ o šířce cca 50 μm .

V případě oboustranné svaru AZ31 v příčném směru I (výkon 310 W, rychlost svařování 500 mm/min, obr. P3.5 až obr. P3.9) je patrná hloubka penetrace svazku při daném výkonu, tj. do 2/3 tloušťky materiálu. Mikrostruktura ve FZ (obr. P3.6 a obr. P3.7) je dendritického typu s vyloučenou fází γ po hranici dendritů.

Mikrostruktura slitiny AZ31 svarového spoje v příčném směru II (výkon 338 W, rychlost svařování 450 mm/min) je zdokumentována na obr. P3.10 až obr. P3.13. Svar je více propadlý a opět se ve struktuře vyskytuje množství pórů. Mikrostruktura FZ (obr. P3.11) je prakticky totožná s podélným směrem, šířka PMZ (obr. P3.12 a obr. P3.13) dosahuje hodnoty 100 μm .

Svarový spoj AZ61 (tl. 0,8 mm)

Vzhled svarového spoje slitiny AZ61 v podélném směru je zobrazen na obr. P3.14, na němž jsou patrné čtyři základní oblasti svaru. Mikrostruktura FZ (obr. P3.15 a obr. P3.16) je tvořena dendritickou strukturou a na obr. P3.16 je patrné, že ve FZ dochází k vylučování fáze (pravděpodobně γ) po hranicích zrn. Leptání 10% nitalem ostře odhalilo dvě hranice zón v oblasti FZ a HAZ. Tyto oblasti se nepodařilo jednoznačně identifikovat (obr. P3.17 a obr. P3.18). BM je od HAZ odděleno výrazným rozhraním (obr. P3.19). V HAZ docházelo k rozpouštění fází, proto je množství částic přítomných v HAZ menší než v BM. Mikrostruktura slitiny AZ61 v příčném směru je zobrazena na obr. P3.20 až obr. P3.23. Oblast FZ je opět tvořena dendritickou strukturou (obr. P3.21). Oblast B a přechod mezi HAZ a BM je uveden na obr. P3.22 a obr. P3.23 a jejich struktura je prakticky totožná s podélným směrem.

Svarový spoj ZE10 (tl. 1,6 mm)

Během svařování slitiny ZE10 došlo ke vzniku trhliny v FZ (obr. P3.24 a obr. P3.25). Z mikrostruktury je patrné, že se jedná o interkrystalickou trhlínu. Naleptání slitiny 10% nitalem zvýraznilo hranici v oblasti B (obr. P3.24). Leptání slitiny acetic picralem zvýraznilo kolumnární zrna o velikosti 100 μm tvořící PMZ (obr. P3.25). Při oboustranné svařování slitiny ZE10 (obr. P3.26 a obr. P3.27) se ve svaru vyskytly dvě trhliny, opět s interkrystalickým průběhem. Na obr. P3.26 je patrná hloubka penetrace laserového svazku, které dosahuje 2/3 tloušťky materiálu. Z obr. P3.27 je patrná jemnozrnější struktura v oblasti FZ a opět kolumnární zrna o velikosti cca 100 μm v PMZ.

Základní mechanické vlastnosti svarových spojů

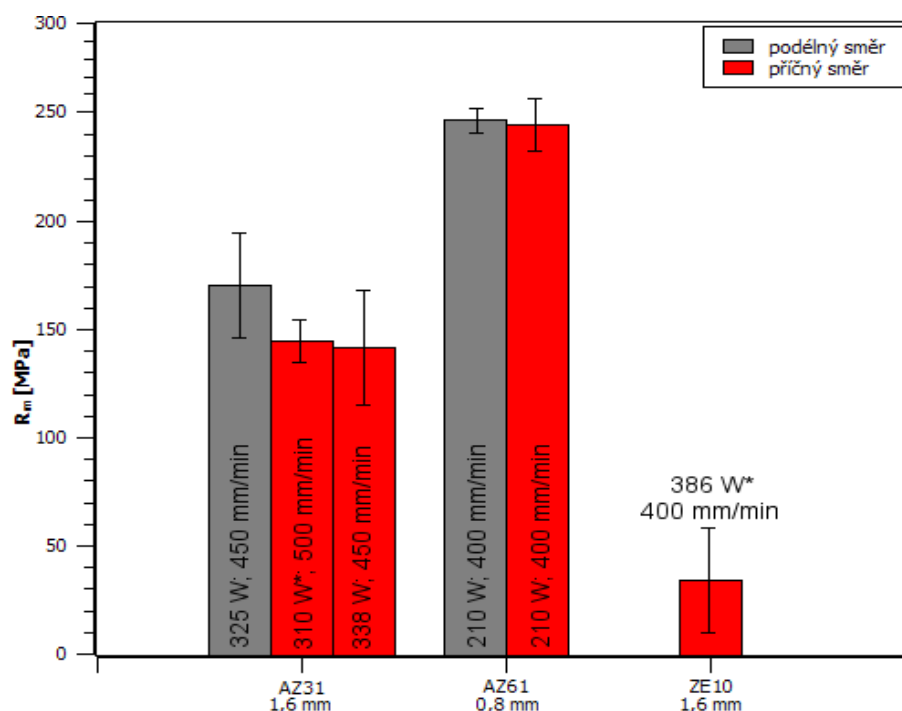
Naměřené hodnoty meze pevnosti slitin svařených pevnolátkovým laserem jsou uvedeny v tab. 4.18 a graficky znázorněny na obr. 4.26. Slitina AZ31 (1,6 mm) dosáhla v podélném směru pevnosti 171 MPa, v příčném směru byla svařována jednou s vyšším výkonem a podruhé s výkonem nižším, ale oboustranně. Dosažené meze pevnosti byly pro příčný směr prakticky totožné.

Slitina AZ61 byla v obou směrech svařena stejným výkonem 210 W. Dosažené meze pevnosti byly podobné, pohybovaly se okolo hodnoty 245 MPa. U slitiny ZE10 svařené oboustranně došlo k výskytu trhlin, stejně tak u slitiny svařené oboustranně při nižším výkonu.

Tab. 4.18 Hodnoty meze pevnosti experimentálního materiálu

Slitina	Orientace vůči rozměru plechu	Označení svaru:	Výkon [W]	Rychlost svařování [mm/min]	\bar{x}	s	R_m [MPa]
AZ31 (1,6 mm)	podélný směr		325	450	\bar{x}		170,7
					s		29,9
	příčný směr	I*	310	500	\bar{x}		144,9
					s		12,0
příčný směr	II	338	450	\bar{x}		142,0	
				s		32,1	
AZ61 (0,8 mm)	podélný směr		210	400	\bar{x}		247,1
		s				6,8	
příčný směr		210	400	\bar{x}		244,9	
				s		14,7	
ZE10 (1,6 mm)	příčný směr	I*	386	400	\bar{x}		34,3
		s				29,3	
příčný směr	II	485	400	\bar{x}		-	
				s		-	

* oboustranný svar



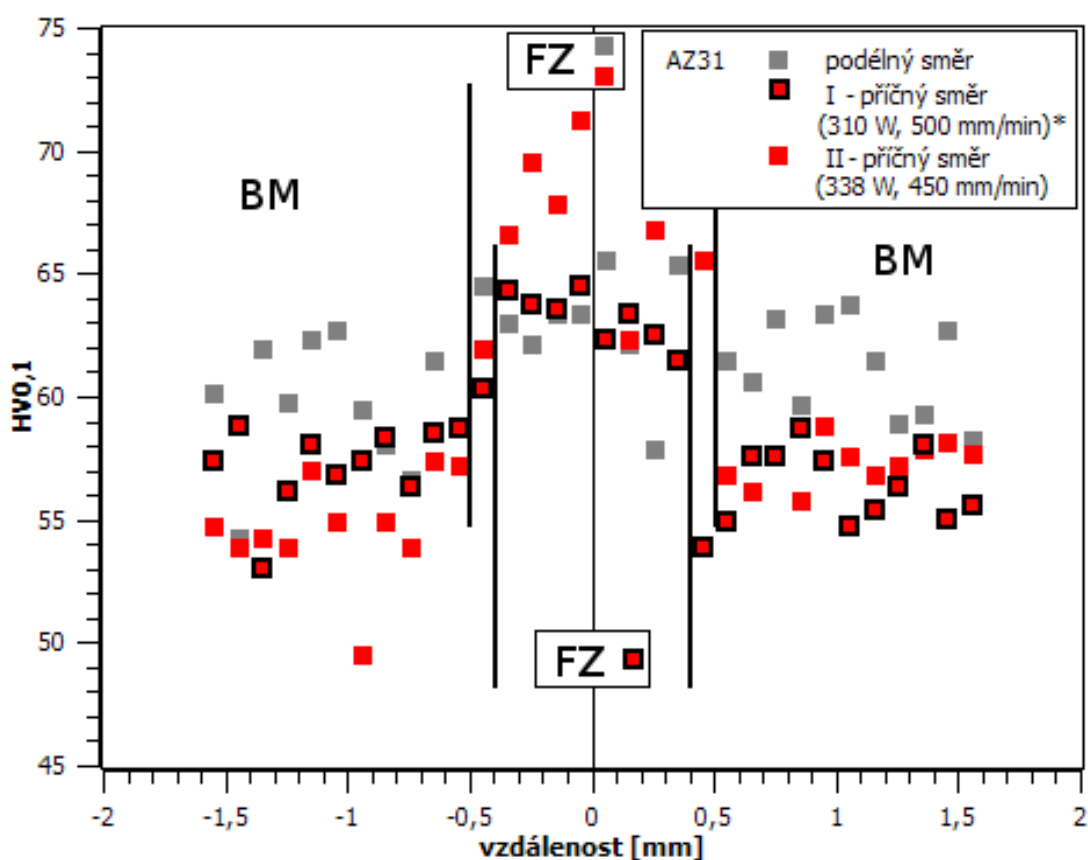
Obr. 4.36 Hodnoty meze pevnosti experimentálního materiálu (* - oboustranný svar)

Naměřené průběhy mikrotvrdości pro slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm), AZ61 a ZE10 jsou graficky znázorněny na obr. 4.37 až obr. 4.39.

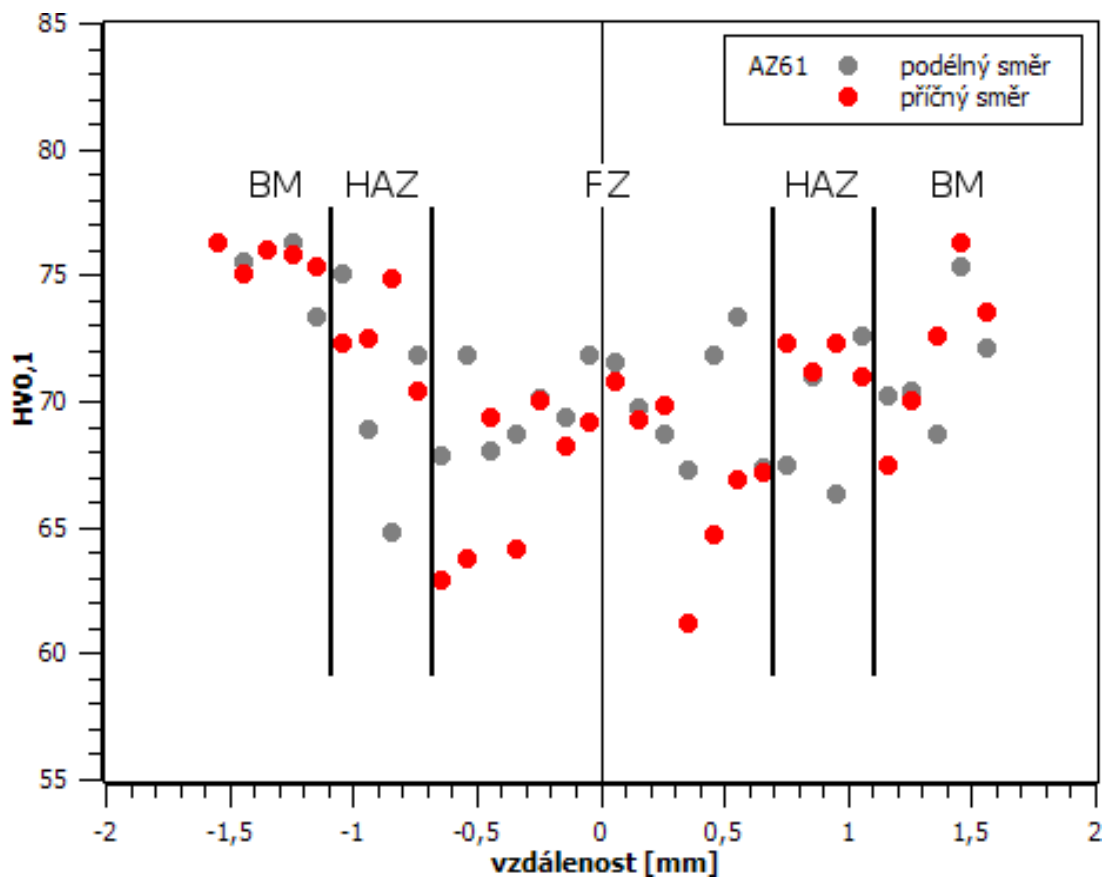
Slitina AZ31 (tl. 1,6 mm) v podélném směru vykazovala při měření průběhu mikrotvrdości minimální rozdíl hodnot mezi FZ (63 HV_{0,1}) a BM (61 HV_{0,1}). V případě příčného směru I byl nárůst tvrdosti v oblasti FZ významnější (69 HV_{0,1}), hodnoty BM se pohybovaly okolo 57 HV_{0,1}. Pro příčný směr II (oboustranný svar) byla tvrdosti ve FZ přibližně 63 HV_{0,1} (obr. 4.37).

Slitina AZ61 (obr. 4.38) v podélném i příčném směru dosahovala v FZ tvrdosti 70 HV_{0,1}. Ve vzdálenosti 0,35-0,65 mm od osy svaru došlo k poklesu mikrotvrdości na hodnotu 68 HV_{0,1}. V dalších oblastech již tvrdosti svarového spoje narůstala – v HAZ na hodnoty 71 HV_{0,1} a v BM na hodnotu 78 HV_{0,1}.

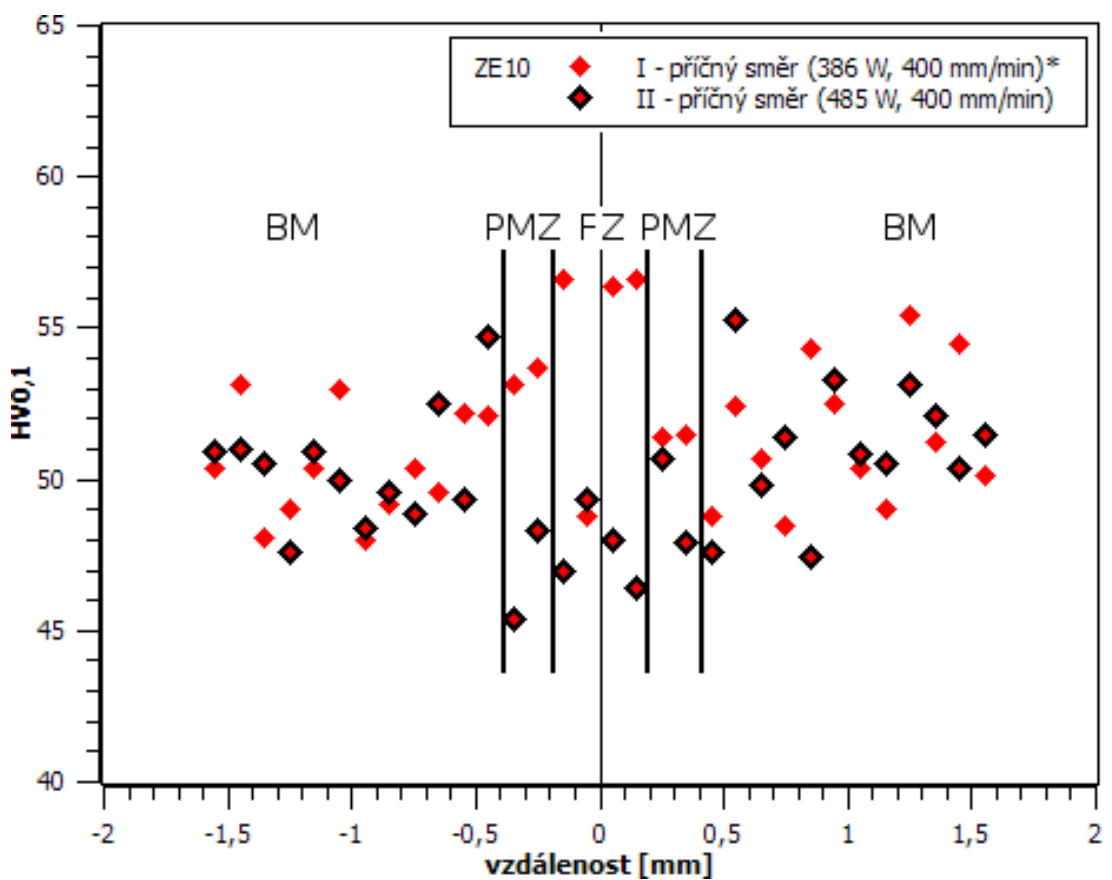
Slitina ZE10 dosahovala ve FZ tvrdosti 58 HV_{0,1}, v PMZ došlo k poklesu na hodnotu 51 HV_{0,1} a stejné mikrotvrdości dosahoval i BM (obr. 4.39).



Obr. 4.37 Průběh mikrotvrdości svarových spojů slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm) - *oboustranný svar



Obr. 4.38 Průběh mikrotvrdosti svarových spojů slitin AZ61

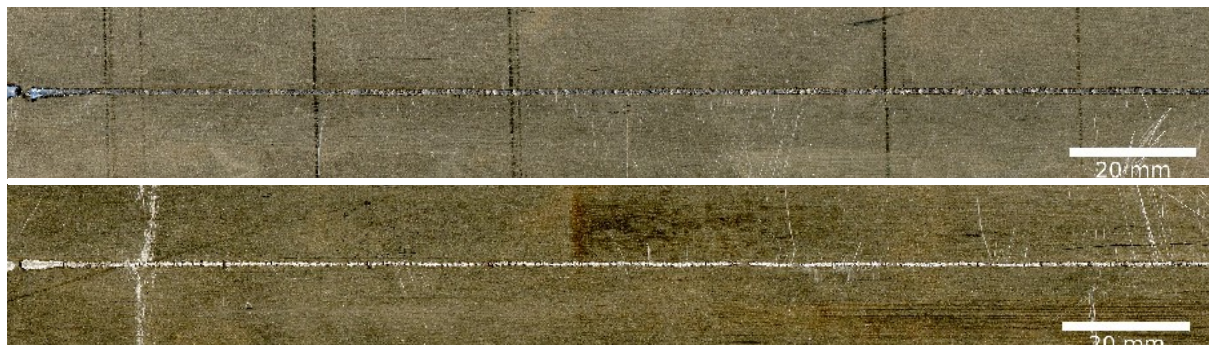


Obr. 4.39 Průběh mikrotvrdosti svarových spojů slitin ZE10 - * oboustranný svar

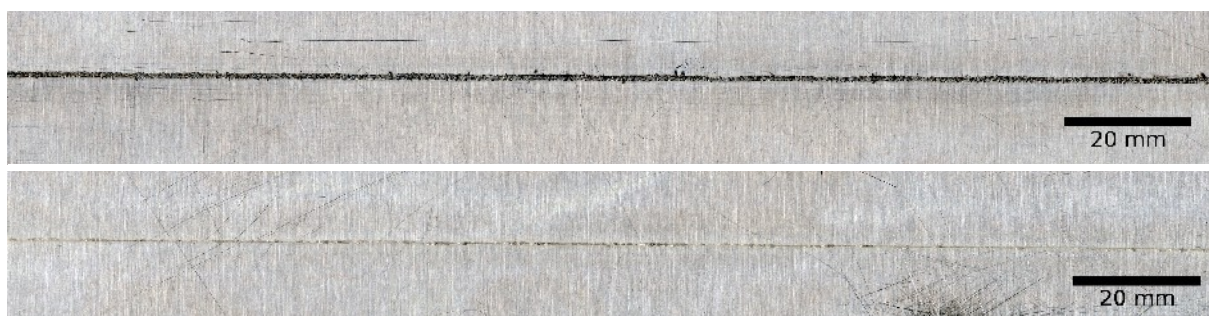
4.5.3 Svařování kontinuálním vláknovým laserem

Vizuální hodnocení svarových spojů

Kontinuálním vláknovým laserem byly svařeny dva materiály – slitina AZ31 (tl. 1,6 mm) a AZ61 (tl. 0,8 mm). U obou slitin svařovaných vláknovým laserem došlo k úplnému provaření materiálu v prakticky celém svarovém spoji, kořen byl pak formován pomocí drážky ve svařovacím přípravku (obr. 4.40 a obr. 4.41).



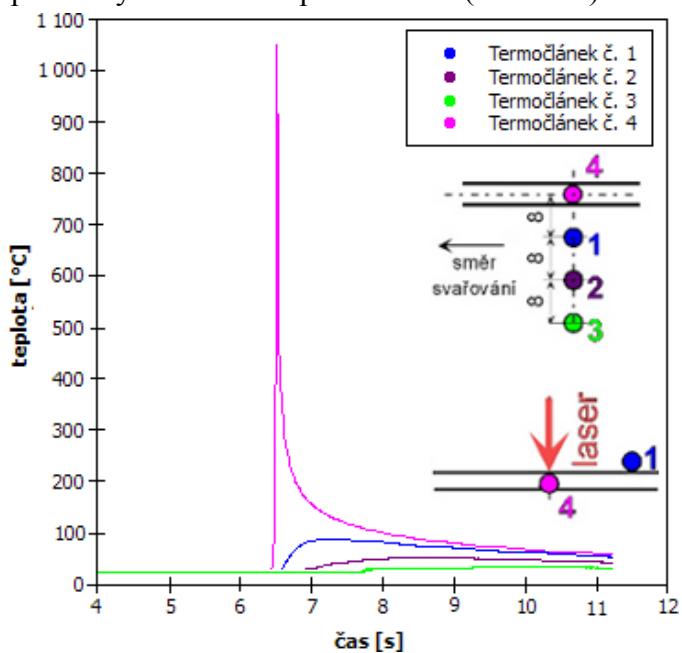
Obr. 4.40 Vzhled svarového spoje (vrchní a spodní část svaru) zhotoveného vláknovým laserem, AZ31 (1,6 mm – svar kolmo na podélný rozměr)



Obr. 4.41 Vzhled svarového spoje (vrchní a spodní část svaru) zhotoveného vláknovým laserem, AZ61 (0,8 mm – svar kolmo na podélný rozměr)

Měření teplotního pole

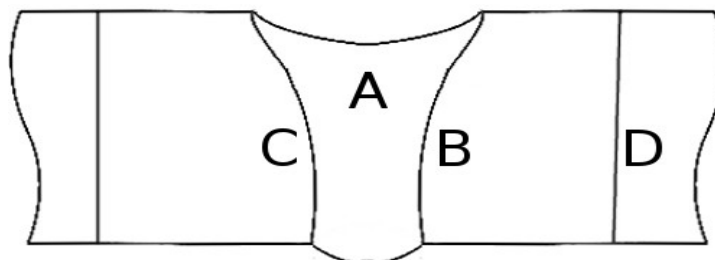
Teplota naměřená v ose svaru dosahovala hodnoty 1050 °C. Ve vzdálenosti 8 mm od svaru teplota dosahovala 80 °C. Termočlánky ve vzdálenosti 16 a 24 mm od osy svaru zaznamenaly teplotu prakticky shodnou s teplotou okolí (obr. 4.42).



Obr. 4.42 Průběh teplot při svařování slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm – svar kolmo na příčný směr)

Metalografické hodnocení svarových spojů

Pro metalografické hodnocení byl svarový spoj zdokumentován na místech uvedených na obr. 4.43. Oblast A dokumentuje FZ, oblast B a C dokumentuje přechod FZ a HAZ a na snímcích z oblasti D je uveden přechod z HAZ do BM (Příloha 4).



Obr. 4.43 Schématický nákres svaru s označenými polohami mikrostruktur uvedených v Příloze 4

Svarový spoj AZ31 (tl. 1,6 mm)

Mikrostruktura svarového spoje slitiny AZ31 v podélném směru je uvedena na obr. P4.1 až obr. P4.4. v Příloze 4. Na obr. P4.1 je zobrazen příčný řez svarovým spojem. Na mikrostrukturu svaru je patrná porozita v oblasti FZ a nevýrazná PMZ. Leptáním ke zvýraznění hranice mezi HAZ a BM nedošlo. Mikrostruktura ve FZ (obr. P4.2) ukazuje na přítomnost drobných fází uvnitř zrn, průměrná velikost zrna je přibližně 15 μm . Na obr. P4.3 a obr. P4.4 (místo B a C) je možné identifikovat na přechodu oblastí FZ a HAZ oblast PMZ o šířce cca 100 μm .

Při svařování slitiny AZ31 v příčném směru (obr. P4.5 až obr. P4.10) došlo k výraznějšímu propadu svaru. Ve svarovém spoji byla pozorována porozita. Mikrostruktura ve FZ (obr. P4.6 a obr. P4.7) se jeví stejná jako v případě podélného svaru, šířka PMZ dosahuje hodnoty 50 μm (obr. P4.8 až obr. P4.10).

Svarový spoj AZ61 (tl. 0,8 mm)

Vzhled svarového spoje slitiny AZ61 v podélném směru je uveden na obr. P4.11. Mikrostruktura FZ (obr. P4.12) je tvořena dendritickou strukturou. Na obr. P4.13 je zobrazena PMZ (o šířce cca 50 μm). Další snímek (obr. P4.14) ukazuje hranici mezi HAZ a BM. Je patrné, že v HAZ docházelo k rozpouštění fází, které se v BM vyskytují ve formě částic.

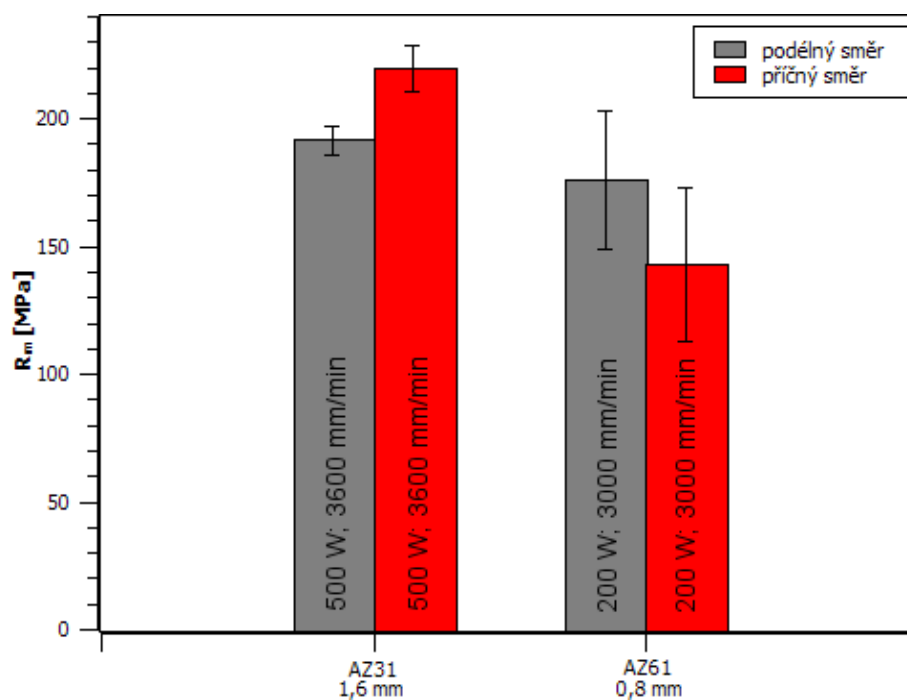
V případě slitiny AZ61 (příčný směr – obr. P4.15 až obr. P4.18) se ve svarovém spoji vyskytuje porozita, která přispěla ke vzniku trhliny u kořene svaru (obr. P4.15). Struktura svarového spoje je prakticky totožná jako v podélném směru.

Základní mechanické vlastnosti svarových spojů

Hodnoty meze pevnosti pro experimentální materiál svařený kontinuálním vláknovým laserem jsou uvedeny v tab. 4.19 a graficky znázorněny na obr. 4.44. Pro obě slitiny byl svařen jeden svařovací pár v každém směru. Slitina AZ31 dosáhla větší meze pevnosti ve směru příčném, slitina AZ61 ve směru podélném.

Tab. 4.19 Hodnoty meze pevnosti experimentálního materiálu

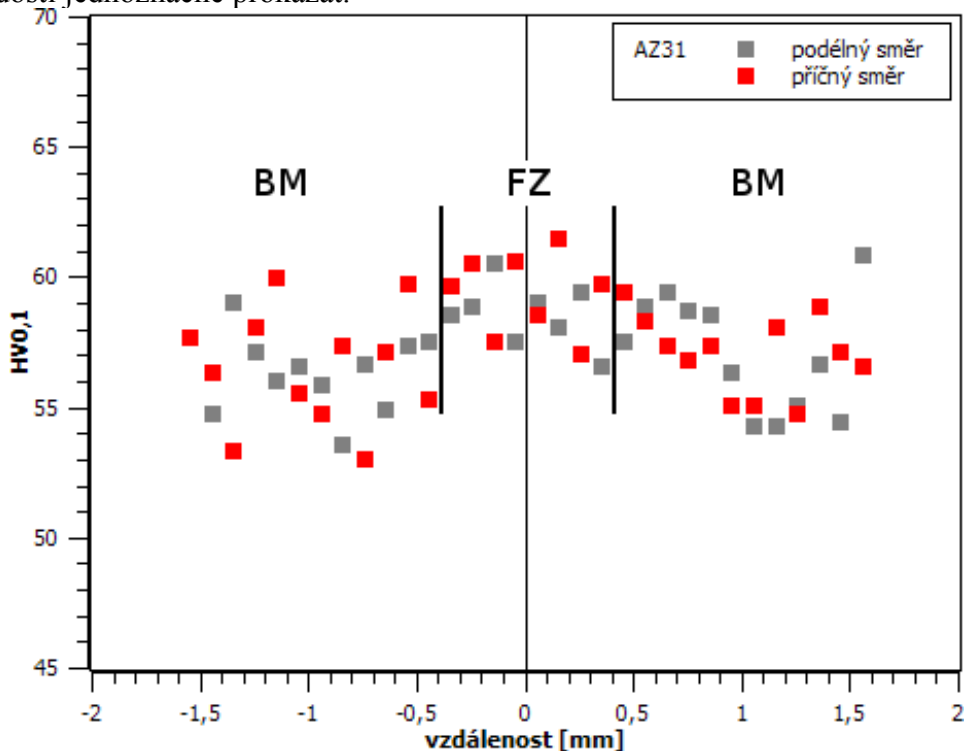
Slitina	Orientace vůči rozměru plechu	Výkon [W]	Rychlost svařování [mm/min]	\bar{x}	s	R_m [MPa]
AZ31 (1,6 mm)	podélný směr	500	3600	\bar{x}		191,5
	příčný směr	500	3600	s		5,7
AZ61 (0,8 mm)	podélný směr	200	3000	\bar{x}		176,1
	příčný směr	200	3000	s		27,2
				\bar{x}		143,0
				s		30,1



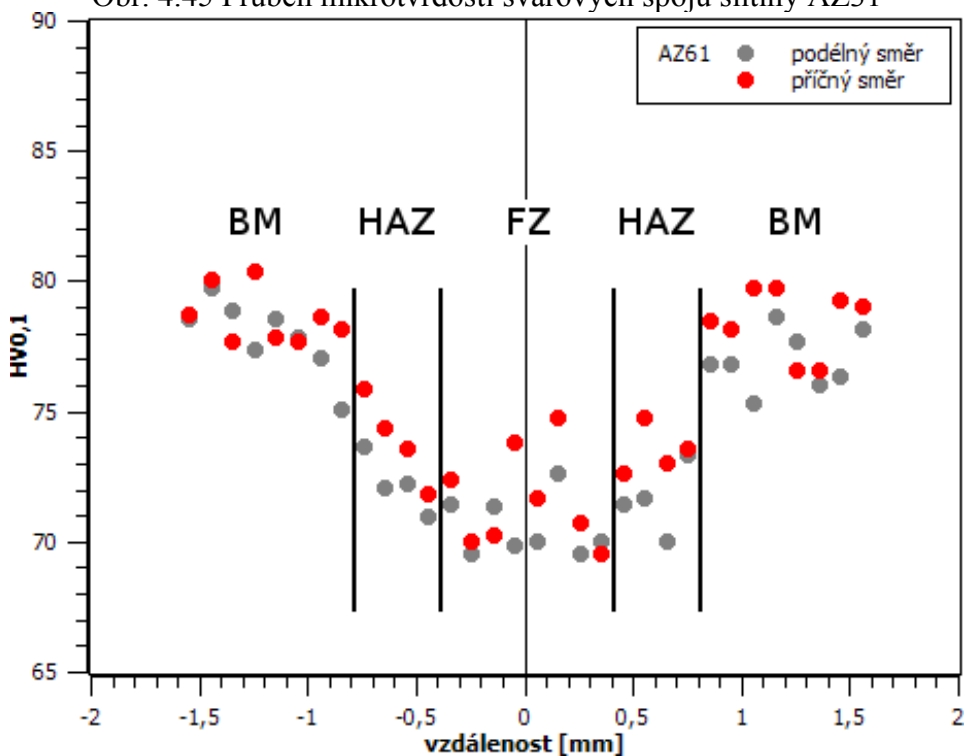
Obr. 4.44 Hodnoty meze pevnosti experimentálního materiálu

Grafické znázornění průběhu mikrotvrdosti svarových spojů je uvedeno na obr. 4.45 a obr.4.46. V případě slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm, obr. 4.45) je patrný mírný nárůst tvrdosti v oblasti FZ (v podélném i příčném směru), hodnota mikrotvrdosti základního materiálu osciluje okolo hodnoty 56 HV0,1.

Slitina AZ61 (podélném i příčném směru) disponuje v FZ nižší tvrdostí než v BM (okolo 70 HV0,1), v HAZ následuje mírný růst tvrdosti na 74 HV0,1 a mikrotvrdost v BM se pohybuje okolo hodnoty 78 HV0,1 (obr. 4.46). Oblast PMZ se nepodařilo pomocí mikrotvrdosti jednoznačně prokázat.



Obr. 4.45 Průběh mikrotvrdosti svarových spojů slitiny AZ31



Obr. 4.46 Průběh mikrotvrdosti svarových spojů slitiny AZ61

4.5.4 Komplexní hodnocení napěťových charakteristik svarových spojů

Grafická vyjádření meze pevnosti svarových spojů a procentuální meze pevnosti přepočtené na procenta ve vztahu k základnímu materiálu jsou pro jednotlivé materiály AZ31, AZ61, ZE10 a ZE41 uvedena na obr. 4.47 až obr. 4.51.

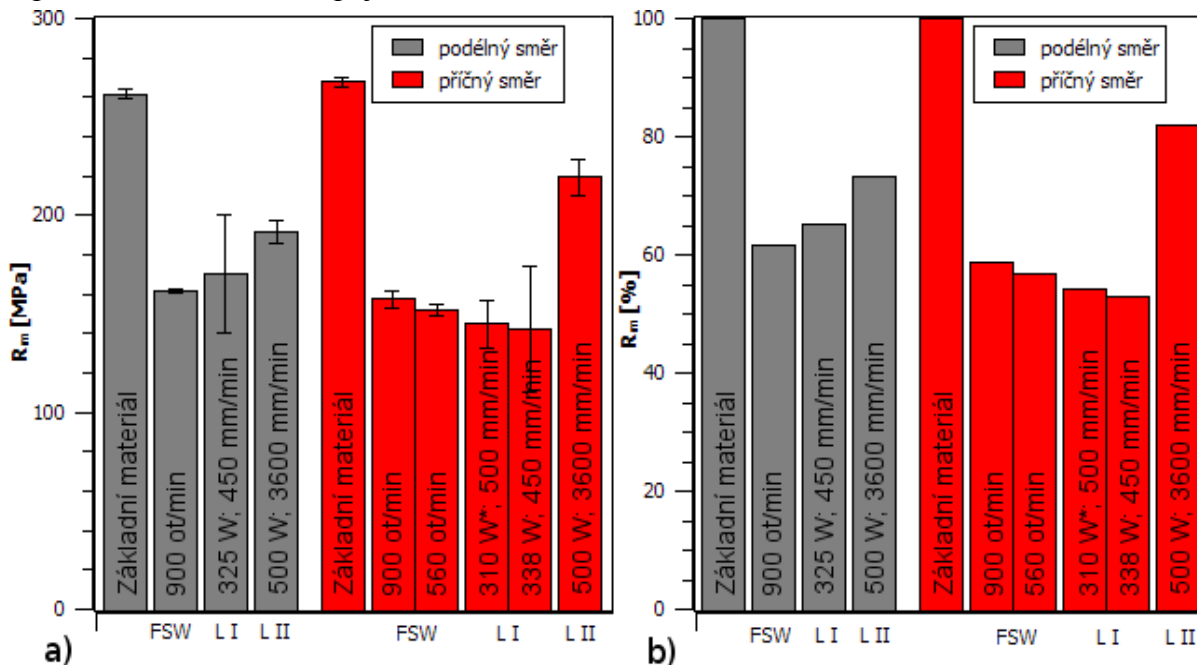
Z výsledků zkoušek tahem svarových spojů slitiny AZ31 o tl. 1,6 mm provedených jednotlivými metodami, je zřejmé, že nejvyšší hodnoty meze pevnosti byly dosaženy při použití vláknového laseru (až 80 % pevnosti základního materiálu). Při svařování slitiny metodou FSW a pevnolátkovým laserem bylo u svarového spoje naměřeno pouze okolo 60 % hodnoty meze pevnosti základního materiálu.

Slitina AZ31 o tl. 3 mm (obr. 4.48) byla svařována pouze metodou FSW a největší meze pevnosti (hodnota 83,7% meze pevnosti základního materiálu) bylo dosaženo v příčném směru při svařování s nejnižší rychlostí rotace nástroje.

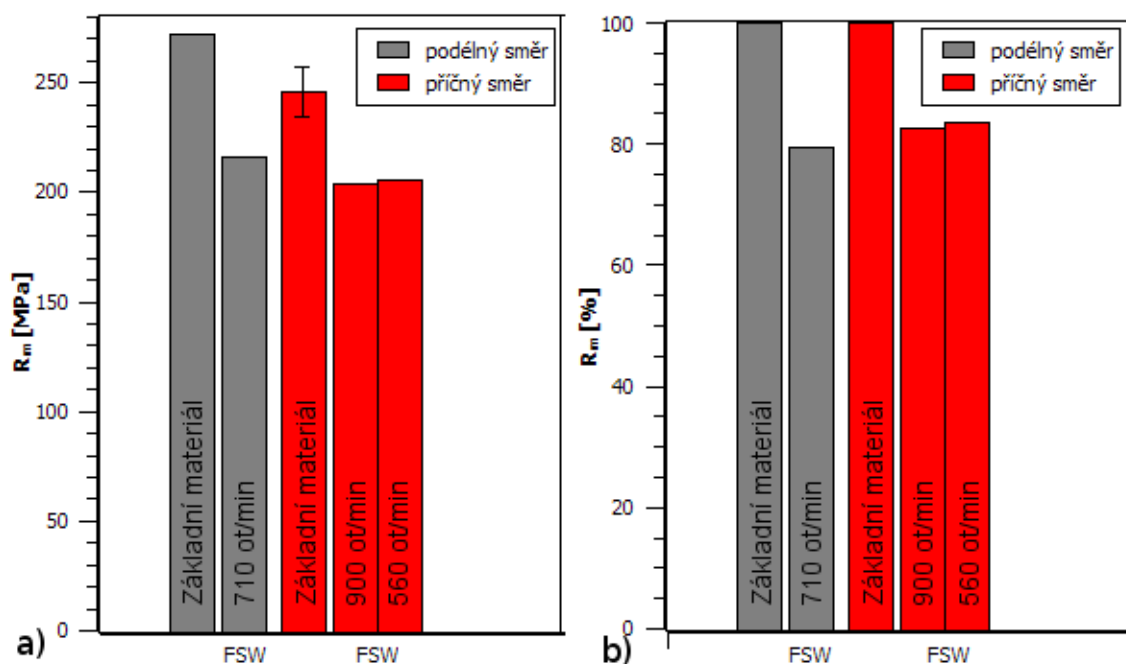
V případě slitiny AZ61 (obr. 4.49) bylo v obou směrech svařování dosaženo největší meze pevnosti při svařování metodou FSW a to při použití nejvyšších rychlostí rotace nástroje. Hodnoty meze pevnosti svarových spojů zhotovených pevnolátkovým laserem byly mírně nižší než u metody FSW. Meze pevnosti svarových spojů svařovaných vláknovým laserem klesly na hodnoty 50 % meze pevnosti základního materiálu.

Slitiny ZE10 (obr. 4.50) a ZE41 (obr. 4.51) byly svařovány pouze metodou FSW. Při svařování slitiny ZE10 pevnolátkovým laserem se ve svarovém spoji vyskytovaly trhliny (při jednostranném i oboustranném svařování). Nejlepších pevnostních charakteristik bylo dosaženo v příčném směru při použití nižší rychlosti rotace nástroje než při svařování ve směru podélném. Slitina ZE41 dosahovala po svařování metodou FSW v příčném směru prakticky 90 % meze pevnosti základního materiálu.

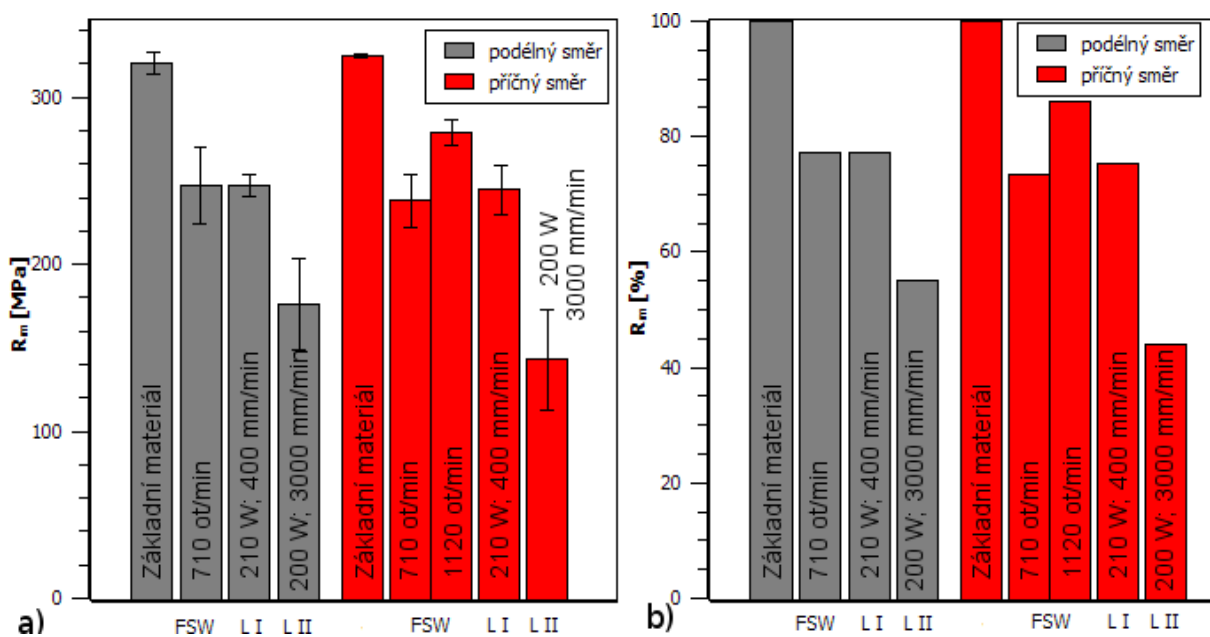
Porušení vzorku při statické zkoušce tahem nastalo u všech materiálu na rozhraní oblasti nugget (Stir Zone) a TMAZ. V případě svarových spojů svařovaných laserem došlo k porušení ve svarovém spoji.



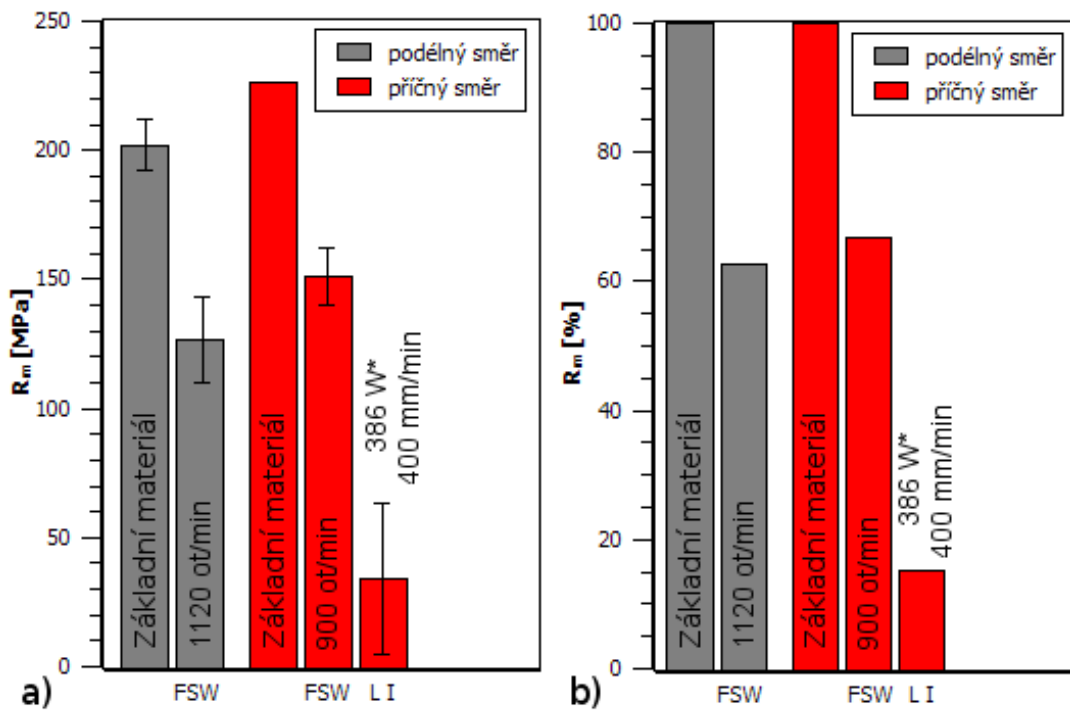
Obr. 4.47 Meze pevnosti svarových spojů slitiny AZ31 - tl. 1,6 mm (a), procentuální vyjádření meze pevnosti vzhledem k základnímu materiálu (b). L I – pevnolátkový laser; L II – vláknový laser



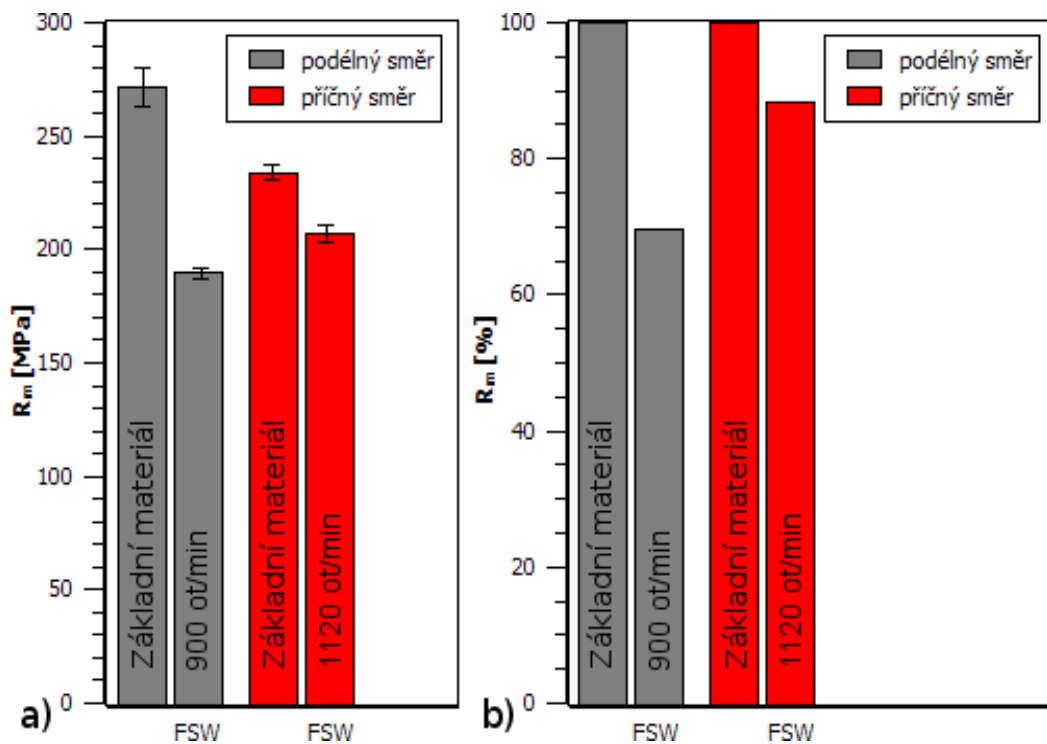
Obr. 4.48 Meze pevnosti svarových spojů slitiny AZ31 - tl. 3 mm (a), procentuální vyjádření meze pevnosti vzhledem k základnímu materiálu (b)



Obr. 4.49 Meze pevnosti svarových spojů slitiny AZ61 (a) a procentuální vyjádření meze pevnosti vzhledem k základnímu materiálu (b). L I – pevnolátkový laser; L II – vláknový laser



Obr. 4.50 Meze pevnosti svarových spojů slitiny ZE10 (a) a procentuální vyjádření meze pevnosti vzhledem k základnímu materiálu (b). L I – pevnolátkový laser



Obr. 4.51 Meze pevnosti svarových spojů slitiny ZE41 (a) a procentuální vyjádření meze pevnosti vzhledem k základnímu materiálu (b)

5. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Metalografické hodnocení základního materiálu

Vzhled mikrostruktury jednotlivých slitin základního materiálu se v podélném a příčném směru (vzhledem k rozměru plechu) prakticky nelišil. Lze tedy předpokládat, že materiál byl po válcování rekrystalizačně žhán pro odstranění struktury vzniklé válcováním. Základní materiál vyráběný metodou Twin Roll Casting (AZ31 tl. 3 mm a AZ61) vykazoval jemnozrnější strukturu než slitiny vyrobené metodou Direct Chill Casting (AZ31 tl. 1,6 mm, ZE10 a ZE41). Pro leptání všech slitin bylo použito leptadlo acetic picral, které dle [5] reaguje na krystalografickou orientaci a v rovinách rovnoběžných s bazální praská, slitiny ZE10 a ZE41 byly dále leptány 10% nitalem, které reaguje na chemickou strukturu.

Mikrostruktura tvářených slitin AZ31 neobsahovala fázi γ ($Mg_{17}Al_{12}$), která se často vyskytuje v litých slitinách hořčíku. V průběhu tváření za tepla došlo zřejmě k jejímu rozpuštění do tuhého roztoku δ . Ve struktuře se vyskytovaly pouze vměstky na bázi AlMn a nečistoty na bázi Si.

Mikrostruktura slitiny AZ61 byla velmi jemnozrná a obsahovala drobné částice o průměru méně než 1 μm – jednalo se o fázi γ ($Mg_{17}Al_{12}$) a vměstky na bázi AlMn. Fáze $Mg_{17}Al_{12}$ zůstala v tomto případě z důvodu většího obsahu hliníku ve slitině částečně zachována.

Slitina ZE10 byla naleptána dvěma leptadly. Leptadlo nital reaguje na chemické složení slitiny a vykreslilo pásy, které se na světelném mikroskopu jeví jako hnědé. Z důvodu nízké detekční schopnosti nebylo možné zjistit jejich chemické složení. Leptadlo acetic picral zvýrazňuje hranice zrn. Obě leptadla naleptala fázi T (Mg_7Zn_3RE).

Slitina ZE41 byla také naleptána nejprve 10% nitalem. V mikrostruktuře se vyskytují výrazné pásy, které se na mikroskopu jeví jako hnědé a fáze T (Mg_7Zn_3RE), která má přirozenou chromatičnost modré barvy. V porovnání se slitinou ZE10 jsou hnědé pásy výraznější a množství fáze T vyšší. Pomocí EDS analýzy bylo zjištěno, že hnědé pásy obsahují vyšší množství zinku a zirkonia. Dále byly v mikrostruktuře nalezeny fáze ZnZr. Fáze $Mg_{12}RE$ [11] nebyla ve struktuře nalezena. V litém stavu se fáze T (Mg_7Zn_3RE) vylučuje na hranicích zrn a není zaznamenán výskyt hnědých pásů. Lze předpokládat, že při procesu tváření dochází k postupnému rozpouštění fáze T (Mg_7Zn_3RE) a jeho vylučování ve formě částic. Výskyt hnědých pásů ve tvářené struktuře je pravděpodobně způsoben rozpouštěním částic ZnZr a rozpadem fáze T (Mg_7Zn_3RE).

Napětové a deformační charakteristiky základního materiálu

Napětové a deformační charakteristiky základního materiálu byly hodnoceny ve směru podélném a příčném (vzhledem k rozměru plechu). U tvářené slitiny AZ31 je mez pevnosti, smluvní mez kluzu a tažnost vyšší v příčném směru válcování [63]. Z toho vyplývá, že v případě AZ31 (tl. 1,6 mm) je podélným směrem válcování směr označený jako podélný (vzhledem k rozměru plechu) a v případě slitiny AZ31 (tl. 3 mm) je podélným směrem válcování směr označovaný jako příčný.

Slitina AZ61 dosahovala nejvyšších hodnot meze pevnosti a smluvní meze kluzu, což je dáno vyšším obsahem hliníku. Tato slitina měla zároveň nejnižší tažnost. Pro určení směru válcování je nutné provést analýzu struktury metodou EBSD.

Slitina ZE10 naopak disponovala nejnižšími hodnotami napětových charakteristik (vlivem nízkého obsahu legujících prvků) a nejvyššími deformačními charakteristikami. Odlišná změna krystalografické orientace zrn ve slitině ZE10 v průběhu tváření (oproti slitinám typu AZ) má za následek rozdílné mechanické chování slitiny. Slitina ZE10 má v podélném směru vyšší smluvní mez kluzu a mez pevnosti a nižší tažnost [63]. Podélný směr válcování plechů je tedy směr označený jako příčný.

Slitina ZE41 vykazuje stejné chování jako slitina ZE10 – v podélném směru válcování

byla naměřena vyšší smluvní mez kluzu, mez pevnosti a nižší tažnost. Podélný směr válcování je tedy označený podélný směr vzhledem k orientaci plechu. Směrodatná odchylka tažnosti v podélném směru je poměrně vysoká, dá se proto předpokládat, že hodnota tažnosti v tomto směru byla mírně nižší než v příčném.

Teplotní pole

Z porovnání teplot naměřených při svařování slitiny AZ31 třemi různými metodami vyplývá, že k nejmenšímu tepelnému ovlivnění materiálu dochází při svařování vláknovým laserem. V případě svařování metodou FSW jsou jednotlivé křivky zobrazující teplotu termočlánku poměrně široké, tj. materiál je dlouho zahříván. Průběh teplot při svařování pevnolátkovým laserem je výrazně ostřejší. Svařování materiálu probíhá kratší dobu a s větší intenzitou. Při svařování vláknovým laserem je průběh teplot ještě užší, což bylo dáno vyšší rychlostí svařování. Nejvyšších teplot v ose svaru bylo dosaženo při svařování vláknovým laserem.

Pro srovnání rozdílné tepelné vodivosti slitin bylo měřeno teplotní pole také u slitiny ZE10, u které byly v průběhu svařování naměřené teploty nižší v porovnání s AZ31.

Způsob měření a vyhodnocování teploty při svařování pevnolátkovým laserem pravděpodobně nebyl dostatečně přesný na to, aby zachytil maximální teplotu v ose svaru.

Metalografické hodnocení svarových spojů

V průběhu svařování metodou FSW bylo pozorováno zformování oblasti nuggetu pouze u slitiny ZE41. U všech slitin došlo v oblasti SZ, příp. v oblasti nuggetu k rekrystalizaci zrn. Jemnozrnější struktura je také pozorována v oblasti TMAZ, což je ve shodě s literaturou [58]. Dynamická rekrystalizace v hořčkových slitinách probíhá již při teplotě 250 °C [58], které bylo dle záznamů teplotního pole dosaženo. Při svařování slitin typu AZ nevznikla dostatečná teplota k rozložení vměstků na bázi AlMn.

Ze snímků mikrostruktury je patrný vliv tažnosti základního materiálu na formování mikrostruktury svarových spojů zhotovených metodou FSW. Protože má základní materiál slitiny ZE10 v podélném směru vyšší tažnost, byla pro zhotovení svaru rovnoběžného s podélným směrem (tj. označení svaru příčný – vzhledem k rozměrům plechu) zvolena nižší rychlost rotace svařovacího nástroje. Přesto bylo v tomto směru (obr. P3.29 a P3.30) dosaženo výrazně jemnozrnější struktury, než ve svarovém spoji podélném.

Z důvodu prakticky stejné tažnosti v obou směrech slitiny ZE41 byly zvoleny dvě různé rychlosti rotace nástroje. Při použití vyšších otáček nastalo zformování rovnoměrnější struktury nuggetu než v případě nižších otáček.

Porovnáním svarových spojů slitiny AZ31 zhotovených pevnolátkovým a vláknovým laserem bylo zjištěno, že pevnolátkový laser vnesl do svaru mnohem více energie a svar byl déle udržován na zvýšené teplotě. Svědčí o tom mikrostruktura FZ, která je tvořena dendrity s vyloučenou γ fází po jejich hranicích. Při svařování vláknovým laserem, kde byl ohřev intenzivnější a kratší, k formování této struktury nedocházelo. Obdobné poznatky jsou ve shodě s literaturou [44]. U slitiny AZ61 docházelo při svařování pevnolátkovým laserem ke vzniku svaru o stejných rozměrech na vrchu a kořenu svaru, na rozdíl od vláknového laseru, u kterého byl dokumentován svarový spoj ve tvaru klínu. V průběhu svařování docházelo k rozpuštění pravděpodobně fáze γ . Při svařování slitiny ZE10 pevnolátkovým laserem docházelo ke vzniku interkrystalických trhlin v oblasti FZ, které pravděpodobně měli příčinu ve vysoké tepelné vodivosti a roztažnosti hořčkové slitiny ZE10 [35]. Vysoká tepelná vodivost je potvrzena vzniklou jemnozrnější strukturou ve FZ.

Napět'ové charakteristiky experimentálního materiálu

Slitina AZ31 (tl. 1,6 mm) byla svařena všemi dostupnými metodami. Při svařování slitiny AZ31 v příčném směru se ukázalo, že rychlost rotace nástroje neměla na výslednou mez pevnosti výrazný vliv. Pevnolátkovým laserem bylo realizováno svařování jednostranné a oboustranné, naměřené meze pevnosti obou svarů se prakticky nelišily. Nejlepších napět'ových charakteristik bylo dosaženo při svařování vláknovým laserem (dosaženo 73 % meze pevnosti základního materiálu v podélném směru, resp. 82 % v příčném směru).

Slitina AZ31 o tl. 3 mm byla svařována pouze metodou FSW a nejvyšší meze pevnosti bylo dosaženo při nejnižších otáčkách. Zvýšení rychlosti rotace nástroje vedlo k velmi mírnému poklesu hodnot meze pevnosti. Meze pevnosti všech zhotovených svarů se pohybovaly okolo hodnoty 80 % původní meze pevnosti základní materiálu.

V případě slitiny AZ61 bylo nejvyšší meze pevnosti dosaženo u svarového spoje zhotoveného metodou FSW při použití vyšších otáček (87 % hodnoty základního materiálu). V podélném směru byla naměřena stejná hodnota meze pevnosti pro svařování metodou FSW a pevnolátkovým laserem. Meze pevnosti experimentálního materiálu svařeného vláknovým laserem dosahovaly hodnot pouze 50 % základního materiálu. To bylo způsobeno pravděpodobně nevhodnou volbou svařovacích podmínek. Literatura [59] uvádí, že optimalizací podmínek se podařilo svařit slitinu AZ61 o tl. 2,5 mm a dosáhnout tak 94 % meze pevnosti základního materiálu.

Slitina ZE10 byla svařována metodou FSW a pevnolátkovým laserem. Při použití metody svařování pevnolátkovým laserem slitiny ZE10 došlo ve svarovém spoji k výskytu trhlin (při jednostranném i oboustranném svařování), další pokusy se svařováním slitin ZE proto nebyly realizovány. Z důvodu lepší tažnosti v podélném směru základního materiálu bylo pro zhotovení svarového spoje rovnoběžného s podélným směrem (orientace vzhledem k rozměrům plechu) zvolena nižší rychlost rotace nástroje. V tomto směru bylo také dosaženo nejlepších napět'ových charakteristik. Přesto byl pokles meze pevnosti svarových spojů v obou směrech oproti základnímu materiálu až 40 %.

Slitina ZE41 byla svařena pouze metodou FSW. V příčném směru dosahovala mez pevnosti svarového spoje hodnotu prakticky 90 % meze pevnosti základního materiálu.

Porušení vzorku při statické zkoušce tahem ve shodě s literaturou [53] nastalo u všech svarových spojů zhotovených metodou FSW na rozhraní nugget (Stir Zone) a TMAZ.

Průběh mikrostruktury svarových spojů

Průběh mikrotvrlosti slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm) byl pro všechny podmínky svařování metodou FSW prakticky totožný. Při svařování slitiny rychlostí rotace nástroje 900 ot/min neměl na průběh mikrotvrlosti vliv směr orientace základního materiálu. Při použití nižších otáček bylo ve svarovém spoji v oblasti hrotu svařovacího nástroje dosaženo mírně vyšší tvrdosti. Oblast nárůstu mikrotvrlosti na hranici svarového spoje a BM indikuje pravděpodobně přítomnost TMAZ.

Měření mikrotvrlosti svarových spojů zhotovených metodou FSW slitiny AZ31 o tloušťce 3 mm nebyl pozorován vliv rychlosti rotace nástroje na výslednou mikrotvrlost svaru. Pro všechny zhotovené svary v odlišných směrech a při různých podmínkách svařování byly průběhy mikrotvrlosti prakticky shodné. Dosažení podobných průběhů hodnot mikrotvrlosti pro všechny podmínky svařování jsou ve shodě s poznatky získanými měřením mikrotvrlosti svarového spoje.

Mikrotvrlost svarových spojů slitiny AZ61 zhotovených metodou FSW se pro různé směry a podmínky prakticky nelišila. Pokles hodnot mikrotvrlosti v oblasti svarového spoje je pravděpodobně způsoben rozpouštěním fáze γ původně se vyskytující ve formě částic.

U slitiny ZE10 v příčném směru nebyl pozorován stejný průběh mikrotvrlosti na vzestupné a sestupné straně. Vzhledem k rozdílným základním mechanickým

charakteristikám slitiny ZE10 v podélném a příčném směru mohla být rychlost rotace nástroje 900 ot/min dostatečně vysoká na to, aby docházelo na vzestupné straně příčného směru (tj. pravé) k počátku formování nuggetu. Náhlý růst mikrotvrlosti na hranici svarového spoje a BM pravděpodobně dokumentuje oblast TMAZ.

Průběh mikrotvrlosti pro slitinu ZE41 svařovanou metodou FSW v podélném směru (900 ot/min) dokumentuje pokles tvrdosti svarového spoje v oblasti pod hrotem. Ve vzdálenosti 2 až 3 mm je průběh tvrdosti velmi uniformní, pravděpodobně se jedná o více zrekrytalizovanou část nuggetu. V příčném směru (1120 ot/min) nedošlo k poklesu tvrdosti materiálu, což bylo pravděpodobně způsobeno výraznějším protvářením materiálu. Ve vzdálenosti 1,5-4 mm byl naměřen malý rozptyl hodnot mikrotvrlosti, který zasahuje větší oblast než v případě svaru v podélném směru. Vlivem vyšších rychlostí rotace nástroje bylo dosaženo nižšího rozdílu tvrdosti v jednotlivých oblastech.

Mikrotvrdot FZ svarového spoje slitiny AZ31 byla při svařování pevnolátkovým laserem vyšší, než v případě svařování vláknovým laserem, což je pravděpodobně způsobeno vyloučením fáze γ po hranicích dendritů. Při svařování pevnolátkovým laserem se tvrdost ve svarovém spoji zvýšila s vyšším svařovacím výkonem. Vyšší tvrdost FZ oproti BM je ve shodě s literaturou [3], kde je její nárůst vysvětlován zvýšenou mikrostrukturní heterogenitou oproti BM.

Průběh mikrotvrlosti slitiny AZ61 svařované pevnolátkovým laserem v příčném směru ukazuje v oblasti 0,35-0,65 mm od osy svaru pokles tvrdosti svarového spoje. Svar zhotovený pevnolátkovým laserem měl také širší HAZ (0,9 mm oproti 0,4 mm HAZ vláknového laseru). Hodnoty průběhů mikrotvrlosti svarových spojů zhotovených pevnolátkovým a vláknovým laserem jsou prakticky totožné. Ve FZ a HAZ došlo oproti BM k významnému poklesu tvrdosti, který byl pravděpodobně způsoben rozpuštěním fáze γ .

Slitina ZE10 svařovaná pevnolátkovým laserem měla při oboustranném svařování větší tvrdost ve FZ než při svařování jednostranném. Průběh tvrdosti v PMZ a BM byl pak dále prakticky totožný.

6. ZÁVĚRY

Za účelem posouzení svarových spojů tvářených hořčikovými slitin byly svařeny slitiny AZ31, AZ61, ZE10 a ZE41 metodou Friction Stir Welding a pomocí pulzního pevnolátkového laseru a kontinuálního vláknového laseru.

- Mikrostruktura slitiny AZ31 o tloušťce 1,6 mm vyrobené metodou Direct Chill Casting byla tvořena ze zrn substitučního tuhého roztoku δ (Al v Mg) o průměrné velikosti cca 15 μm a částicemi na bázi AlMn a Si. Struktura slitiny AZ31 (tl. 3 mm) vyrobené metodou Twin Roll Casting byla také tvořena ze substitučního tuhého roztoku δ (Al v Mg) o průměrné velikosti cca 10 μm a částicemi na bázi AlMn a Si. Mikrostruktura slitiny AZ61 o tloušťce 0,8 mm vyrobená také metodou Twin Roll Casting byla tvořena zrn substitučního tuhého roztoku δ (Al v Mg) o průměrné velikosti 7 μm a velmi jemnými částice fáze γ ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$) a částicemi na bázi AlMn. Struktura slitiny ZE10 (tl. 1,6 mm) vyrobené metodou Direct Chill casting byla tvořena zrn substitučního tuhého roztoku δ (Zn v Mg) o průměrné velikosti cca 25 μm , částicemi fáze T $\text{Mg}_7\text{Zn}_3\text{RE}$ a prakticky nerozpuštěným zirkoniem. Mikrostruktura slitiny ZE41 (tl. 2 mm), která byla vyrobena metodou Direct Chill casting, se skládala ze zrn substitučního tuhého roztoku δ (Zn v Mg) o průměrné velikosti cca 20 μm , částicemi fáze T $\text{Mg}_7\text{Zn}_3\text{RE}$ a částicemi na bázi ZnZr. Pásky, které se na světelném mikroskopu jeví jak hnědé, obsahovaly větší množství zinku a zirkonia.
- Smluvní mez kluzu slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm) byla v podélném směru rovna hodnotě 156,2 MPa, v příčném směru byla vyšší, tj. 185,5 MPa. Mez pevnosti v podélném směru byla rovna hodnotě 261,6 MPa, v příčném směru 267,7 MPa. Tažnost se v obou směrech prakticky nelišila, pohybovala se okolo hodnoty 17%. U slitiny AZ31 o tloušťce 3 mm se naměřená hodnota smluvní meze kluzu v podélném a příčném směru prakticky nelišila (okolo 160 MPa). Hodnota meze pevnosti byla v podélném směru vyšší (272,1 MPa) než v příčném směru (246 MPa). Tažnost slitiny AZ31 (tl. 3 mm) byla v podélném směru 12 %, v příčném směru 7 %. Smluvní mez kluzu slitiny AZ61 dosahovala v podélném směru hodnot 241,6 MPa a v příčném směru 267,8 MPa. Mez pevnosti se v podélném a příčném směru prakticky nelišila, pohybovala se okolo hodnoty 322 MPa. Tažnost slitiny byla velmi nízká, v obou směrech cca pouze 6 %. Slitina ZE10 o tloušťce 1,6 mm dosahovala v podélném směru smluvní meze kluzu 97,5 MPa a v příčném směru 149,3 MPa. Mez pevnosti v podélném směru byla rovna hodnotě 201,9 MPa a v příčném 226,4 MPa. Tažnost se v obou směrech výrazně lišila, v podélném směru (35,9 %) byla prakticky dvakrát vyšší než v příčném (19,7 %). Rozdílná tažnost v obou směrech je způsobena odlišnou změnou krystalografické orientace zrn slitiny ZE10 v průběhu tváření (oproti slitinám typu AZ). Slitina ZE41 vykazovala smluvní mez kluzu vyšší v podélném směru (226,6 MPa), než ve směru příčném (139,2 MPa). V podélném směru byla vyšší i mez pevnosti (271,6 MPa, v příčném 234 MPa). Tažnost byla pro oba směry prakticky totožná (23,2 %, resp. 22,5 %). Hodnota modulu pružnosti se u slitin typu AZ pohybovala okolo hodnoty 40 MPa, u slitin typu ZE okolo hodnoty 30 MPa.
- Na základě analýz a dalších poznatků získaných z literatury byly určeny směry válcování u slitin AZ31, ZE10 a ZE41. Z literatury bylo zjištěno, že u tvářené slitiny AZ31 je smluvní mez kluzu, mez pevnosti a tažnost nižší ve směru válcování. Porovnáním s hodnotami získaných z tahové zkoušky bylo zjištěno, že podélným směrem válcování u slitiny AZ31 tl. 1,6 mm byl směr označovaný vůči rozměru plechu jako podélný. V případě slitiny AZ31 tl. 3 mm byl směrem válcování směr označovaný jako příčný. Dle poznatků z literatury disponuje tvářená slitina ZE10 v podélném

směru vyšší smluvní mezí kluzu a mezí pevnosti a nižší tažnosti. Porovnáním získaných hodnot ze zkoušky tahem lze usuzovat, že podélný směr válcování byl směr označovaný jako příčný. Podobné závěry z literatury lze aplikovat pro slitinu ZE41, podélným směrem válcování je tedy směr označovaný jako podélný.

- Při svařování metodou Friction Stir Welding slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm) byla ve vzdálenosti 4 mm od osy svaru naměřena teplota 430 °C, která postupně klesala až na hodnotu 100 °C měřenou na posledním termočlátku umístěném 24 mm od osy svaru. U slitiny ZE10 byla maximální teplota naměřená 4 mm od osy svaru 380 °C, na termočlátku vzdáleném 24 mm byla teplota jen 70 °C. Tyto záznamy teplot svědčí o lepší tepelné vodivosti slitiny ZE10. Teplota rekrystalizace hořčkových slitin se pohybuje okolo teploty 250 °C, které bylo dle měření dosaženo. Z toho poznatku vyplývá, že by mělo při svařování metodou FSW dojít k rekrystalizaci v oblasti svarového spoje.
- Mikrostruktura svarového spoje zhotoveného metodou FSW slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm) zhotoveném v podélném směru byla tvořena zrna o velikost 15 μm, v příčném směru je struktura jemnozrnější (10 μm). V případě svarových spojů slitiny AZ31 o tloušťce 3 mm se velikosti zrn pohybují okolo hodnoty 10 μm pro všechny směry a podmínky svařování. Částice na bázi AlMn se ve struktuře dále vyskytovaly, nedošlo tedy k jejich rozpouštění v průběhu svařování. Průměrná velikost zrn u svarových spojů slitiny AZ61 v podélném a příčném směru I se pohybovala okolo hodnoty 10 μm, u příčného směru II byla velikost částic nepatrně vyšší. Ve svarovém spoji se vyskytuje menší množství fází vyloučených ve formě částic. U svarových spojů slitiny ZE10 se v podélném směru pohybovala průměrná velikost zrna okolo hodnoty 10 μm. V příčném směru proběhla výraznější rekrystalizace, průměrná velikost zrn klesla na rozměr 5 μm. Při svařování slitiny ZE41 došlo v obou směrech k zformování nuggetu. Tato oblast byla tvořena z velmi jemných zrn (průměrná velikost pod 5 μm) a velmi drobných částic pravděpodobně fáze MgZnRE. Při použití vyšší rychlosti rotace nástroje nastalo rovnoměrnější zformování nuggetu.
- Při svařování slitiny AZ31 (1,6 mm) neměla rychlost rotace nástroje na výslednou mez pevnosti významný vliv. U slitiny AZ31 svařené v obou směrech při rychlosti 900 ot/min se hodnota meze pevnosti pohybovala okolo hodnoty 160 MPa. Při snížení rychlosti rotace nástroje došlo jen k nepatrnému snížení meze pevnosti (151,8 MPa). Slitina AZ31 (3 mm) dosáhla v podélném směru meze pevnosti 216,4 MPa, v příčném směru se mez pevnosti při změně rychlosti rotace nástroje prakticky nezměnila, pohybovala se okolo hodnot 204 MPa. Ve všech případech svařování slitiny AZ31 (o tloušťce 3 mm) došlo k zachování přibližně 80 % meze pevnosti základního materiálu. Meze pevnosti slitiny AZ61 svařené v obou směrech nástrojem s rychlostí rotace 710 ot/min byly pro oba případy prakticky totožné (240 MPa). Při zvýšení rychlosti rotace na 1120 ot/min došlo ke zvýšení meze pevnosti na 280 MPa. Mez pevnosti slitiny ZE10 byla za použití vyšších rychlostí rotace nástroje v příčném směru nižší (126,5 MPa, 1120 ot/min) než ve směru podélném (151,3 MPa, 900 ot/min). Slitina ZE41 dosáhla v podélném směru meze pevnosti 189,6 MPa, v příčném směru 206,6 MPa.
- Průběh mikrotvrdosti slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm) vykazoval pro všechny svařovací podmínky (metoda FSW) a směry podobný charakter. V oblasti polohy svařovacího nástroje byla zdokumentována tvrdost 55 HV_{0,1}, směrem k základnímu materiálu došlo k jejímu prudkému růstu na hodnotu 67 HV_{0,1}. Základní materiál se pak vyznačoval tvrdostí 59 HV_{0,1}. Průběh tvrdosti u slitiny AZ31 o tloušťce 3 mm vykazoval stejný charakter, ale rozdíly mezi oblastmi nebyly tolik patrné. U svarových

spojů slitiny AZ61 byla pozorována snížená tvrdost v oblasti osy svaru (okolo 70 HV_{0,1}), tvrdost směrem k základnímu materiálu narůstala až na hodnotu 80 HV_{0,1}. Pokles hodnoty tvrdosti ve svarovém spoji je pravděpodobně způsoben rozpouštěním fáze γ . Slitina ZE10 dosahovala v podélném směru v oblasti pod svařovací hrotem mírně nižších hodnot tvrdosti (49 HV_{0,1}) než v základním materiálu (52 HV_{0,1}). Směrem k základnímu materiálu tvrdost vzrostla na hodnotu 59 HV_{0,1}. Průběh hodnot mikrotvrdosti na vzestupné a sestupné straně se v příčném směru lišil. Zatímco na vzestupné straně byla tvrdost svarového spoje nejvyšší v oblasti svařovacího hrotu nástroje a postupně klesala směrem do BM, na sestupné straně byla tvrdost v oblasti svařovacího hrotu na úrovni BM, směrem k základnímu materiálu následoval prudký nárůst tvrdosti, a poté pokles na hodnotu tvrdosti BM.

- Při svařování slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm) pulzním pevnolátkovým laserem byla v ose svaru naměřena teplota 800 °C, která postupně směrem od svarového spoje klesala až na hodnotu 40 °C (termočlánek umístěn 24 mm od osy svaru). Při svařování slitiny ZE10 byla maximální teplota v ose svaru 430 °C, na termočlánek umístěném 24 mm od osy svaru byla naměřena teplota 70 °C. Větší teplota na slitině ZE10 na vzdáleném termočlátku je způsobena použitím vyššího svařovacího výkonu. Vzhledem k teplotě tavení hořáku (660 °C) lze usuzovat, že způsob měření a vyhodnocování teploty zvolený externím pracovištěm nebyl pro svařování laserovým paprskem vhodný.
- Oba jednostranné svary zhotovené na slitině AZ31 (tl. 1,6 mm) pulzním pevnolátkovým laserem byly propadlé a v tavné oblasti (FZ) se vyskytovaly póry. FZ byla dále tvořena dendritickou strukturou s vyloučenou fází (pravděpodobně γ – Mg₁₇Al₁₂) po hranicích dendritů. Ostré rozhraní mezi HAZ a základním materiálem nebylo pozorováno. V případě oboustranného svařování na snímcích mikrostruktury patrná hloubka penetrace svazku. Při svařování slitiny AZ61 se zformoval svar o stejných rozměrech vrchní části a kořenu svarového spoje. V FZ byla opět patrná dendritická struktura. V případě slitiny AZ61 byla rozlišitelná hranice mezi HAZ a BM, neboť v HAZ docházelo vlivem zahřátí materiálu k rozpouštění částic přítomných v základním materiálu. Při svařování slitiny ZE10 (jednostranně i oboustranně) docházelo ke vzniku trhlin s interkystalickým průběhem ve FZ. Na rozhraní FZ jsou patrná kolumnární zrna tvořící PMZ.
- Hodnota meze pevnosti svarového spoje zhotoveného pulzním pevnolátkovým laserem slitiny AZ31 v podélném směru byla 170,7 MPa. Jednostranné a oboustranné svařování v příčném směru nemělo na hodnotu meze pevnosti vliv, pohybovala se v obou případech okolo 143 MPa. Slitina AZ61 byla svařena v obou směrech za stejných podmínek a meze pevnosti byly pro oba směry prakticky totožné 245 MPa.
- Průběh mikrotvrdosti slitiny AZ31 ukazoval vyšší tvrdost v oblasti FZ (63 HV_{0,1}) oproti základnímu materiálu (61 HV_{0,1}), při použití vyššího svařovacího výkonu tvrdost ve FZ narostla na hodnotu 69 HV_{0,1}. Zvýšená tvrdost FZ oproti BM byla pravděpodobně způsobena vyloučením γ fáze po hranicích dendritů. V případě slitiny AZ61 byla tvrdost ve svarovém spoji 70 HV_{0,1} a směrem k základnímu materiálu mírně narůstala. V HAZ se pohybovala okolo hodnoty 71 HV_{0,1} a v základním materiálu 78 HV_{0,1}. Pokles tvrdosti ve svarovém spoje je pravděpodobně způsoben rozpouštěním částic fáze γ . Při oboustranném svařování slitiny ZE10 došlo k nárůstu tvrdosti ve FZ oproti BM, naopak při jednostranném svařování k jejímu poklesu.
- Při svařování kontinuálním vláknovým laserem byla v ose svaru naměřena teplota 1050 °C. Na termočlánek umístěném ve vzdálenosti 8 mm od osy svaru byla naměřena teplota pouze cca 80 °C, termočlánek umístěný 24 mm od svarového spoje naměřil hodnotu prakticky rovnou teplotě okolí. Pro měření teploty při svařování

- vláknovým laserem byla zvolena jiná metodika , která se ukázala být přesnější.
- Mikrostruktura svarového spoje slitiny AZ31 (tl. 1,6 mm) v oblasti FZ je tvořena zrnny tuhého roztoku δ a drobnými částicemi. Svarový spoj slitiny AZ61 zhotovený pomocí vláknového laseru se v oblasti FZ vyznačuje dendritickou strukturou. Opět je na svaru patrná hranice mezi HAZ a BM, neboť v HAZ docházelo pravděpodobně k rozpouštění fáze γ .
 - Meze pevnosti svarového spoje slitiny AZ31 v podélném směru dosahuje hodnot 191,5 MPa, v příčném je mez pevnosti vyšší – 219,4 MPa. Svarové spoje slitiny AZ61 dosahuje v podélném směru meze pevnosti 176,1 MPa, v příčném směru 143,0 MPa.
 - Průběh mikrotvrdomosti slitiny AZ31 ukazuje vyšší tvrdost v oblasti FZ, než v základním materiálu. V případě slitiny AZ61 je tvrdost ve FZ nižší než v HAZ, resp. BM. Pokles tvrdosti ve FZ a HAZ je opět způsoben rozpouštěním fáze γ .
- Slitina AZ31 (tl. 1,6 mm) byla svařena všemi dostupnými metodami. Nejvyšší meze pevnosti bylo dosaženo při svařování vláknovým laserem (73 % meze pevnosti v podélném směru, resp. 82 % meze pevnosti v příčném směru v porovnání se základním materiálem). Při svařování pevnolátkovým laserem a metodou FSW došlo k poklesu meze pevnosti až o 40 % ve srovnání se základním materiálem. Slitina AZ31 (tl. 3 mm) byla svařena pouze metodou FSW. U všech zhotovených svarových spojů byla naměřena mez pevnosti pohybující se okolo hodnoty 80 % meze pevnosti základního materiálu. V případě slitiny AZ61 bylo svařování uskutečněno všemi dostupnými metodami. Nejvyšší meze pevnosti v podélném i příčném směru bylo dosaženo při svařování metodou FSW (77 %, resp. 87 % meze pevnosti základního materiálu). Zvýšení rychlosti rotace nástroje ze 710 ot/min na hodnotu 1120 ot/min mělo za následek zvýšení meze pevnosti svarového spoje o 10 %. Svarové spoje zhotovené pevnolátkovým laserem dosáhly meze pevnosti mírně nižší (77 %, resp. 75 % hodnoty meze pevnosti základního materiálu) než svarového spoje zhotovené metodou FSW. Pevnost svarových spojů vytvořených vláknovým laserem se pohybovala okolo hodnot 50 % meze pevnosti základního materiálu, což bylo pravděpodobně způsobeno nevhodnou volbou svařovacích podmínek. Slitina ZE10 byla svařena metodou FSW a pevnolátkovým laserem. Při svařování slitiny ZE10 laserem došlo ve svarovém spoji k výskytu trhlin (při jednostranném i oboustranném svařování), další pokusy se svařování slitin typu ZE proto nebyly realizovány. Nejvyšší hodnoty meze pevnosti svarového spoje (67 % meze pevnosti základního materiálu) bylo dosaženo u příčného směru za použití nižších rychlostí rotace nástroje (900 ot/min). V podélném směru byla dosažena hodnota 63 % meze pevnosti základního materiálu při použití vyšších rychlostí rotace nástroje (1120 ot/min). Slitina ZE41 dosahovala při svařování v podélném směru hodnot 70 % meze pevnosti základního materiálu. Pevnosti svarového spoje v příčném směru byla výrazně vyšší, dosáhla prakticky 90 % meze pevnosti základního materiálu.

Dílčí závěry lze shrnout do následujících bodů:

- Z výsledků svařování tvářených slitin hořčíku metodou Friction Stir Welding je zřejmé, že se jedná vhodnou metodu pro svařování hořčíkových slitin a pro slitinu ZE41 lze považovat zvolené podmínky za prakticky optimální (při tahové zkoušce bylo dosaženo 88 % meze pevnosti základního materiálu).
- Výkon pevnolátkového laseru dostačoval jen pro svařování plechů slitiny AZ61 (tl. 0,8 mm), mez pevnosti svarových spojů dosahovala hodnot okolo 75 % meze pevnosti základního materiálu. Pevnost svarových spojů zhotovených na slitině AZ31 o tloušťce 1,6 mm dosahovala hodnot pouze okolo 60 % meze pevnosti základního

materiálu. Při svařování slitiny ZE10 docházelo ke vzniku trhlin a dosud se nepodařilo nalézt optimální podmínky. Z důvodu vysoké tepelné vodivosti těchto slitin budou experimentální práce zaměřeny na nalezení vhodných podmínek pro svařování, tj. využití jiných vstupních parametrů, předehřevu, atd.

- Výkon vláknového laseru byl dostatečný na zhotovení svarových spojů na slitině AZ31 (tl. 1,6 mm) o pevnosti dosahující hodnoty 82 % meze pevnosti základního materiálu. Pro svařování slitiny AZ61 nebyly zvolené podmínky svařování. Svarové spoje slitiny AZ61 dosahovaly hodnoty meze pevnosti pouze okolo 50 % meze pevnosti základního materiálu, lze tedy předpokládat, že vstupní parametry pro svařování této slitiny nebyly optimální.
- Z výsledků experimentů lze předpokládat, že pro svařování hořčíkových slitin laserovým paprskem je vhodnější využití vláknového laseru z důvodu větší účinnosti a menšího tepelného ovlivnění materiálu.
- Pro posouzení teplotního pole při svařování hořčíkových slitin je zřejmé, že vhodnější je měření teploty pomocí přivařených termočlánků a s ústřednou s dostatečnou snímací frekvencí pro měření reálného průběhu teplot.

7. PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	tažnost [%]
AC	Alternate Current (střídavý proud)
ASTM	American Society for Testing and Materials
BM	Base Material (základní materiál)
BCC	Body Center Cubic (mřížka kubická prostorově středěná)
DCEP	Direct Current Electrode Positive (stejnoseměrný proud – elektroda kladná)
ECAP	Equal Channel Angular Pressing
FSW	Friction Stir Welding
FZ	Fusion Zone (tavná oblast)
GP	Guinier-Preston
HAZ	Heat Affected Zone (tepelně ovlivněná oblast)
HCP	Hexagonal Close Packet (hexagonální těsně uspořádaná mřížka)
I	hustota výkonu svazku [W/cm^2]
MIG	Metal Inert Gas
Nd:YAG	neodymem dopovaný granát hliníku a yttria
PMZ	Partial Melted Zone (částečně natavená oblast)
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu [MPa]
R_m	mez pevnosti [MPa]
SZ	Stir Zone (
TIG	Tungsten Inert Gas
TMAZ	Thermomechanically Affected Zone (tepelně mechanicky ovlivněná oblast)

8. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] LIU, L. and CH. DONG. Gas tungsten-arc filler welding of AZ31 magnesium alloys. *Materials Letters*. 2006, vol. 60, s. 2194-2197. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [2] CAO, X., M. JAHAZI, J. P. IMMARIGEON and W. WALLACE. A review of laser welding techniques for magnesium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, vol. 171, s. 188-204. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [3] COMMIN, L., M. DUMONT, R. ROTINAT, F. PIERRON, J.-E. MASSE and L. BARRALLIER. Texture evolution in Nd:YAG-laser welds of AZ31 magnesium alloy hot rolled sheets and its influence on mechanical properties. *Materials Science and Engineering:A*. 2011, vol. 528, s. 2049-2055. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [4] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [5] AVEDESIAN, M. and H. BAKER. *ASM Speciality Handbook - Magnesium and Magnesium Alloys*. USA: ASM International Ohio, 1999, 314 s. ISBN 0-87170-138-3.
- [6] ZARANDI, F. and S. YUE. Magnesium Sheet; Challenges and Opportunities. In CZERWINSKI, F. *Magnesium alloys – Design, Processing and Properties*. InTech, 2011, 526 s. ISBN 978-953-307-520-4.
- [7] DRAPALA, J., et al. *Hořčík, jeho slitiny a binární systém hořčík – příměs*. Ostrava: Vysoká škola báňská – TU Ostrava, 2004, 172 s. ISBN 80-248-0579-0.
- [8] www.askiitians.com. Obrázek [online]. [citováno 2011_02_06]. Dostupné z: http://www.askiitians.com/onlinetest/studymaterial_images/18_electrolysis%20of%20magnesium.JPG.
- [9] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [10] POLMEAR, I. *Light Alloys – From Traditional Alloys to Nanocrystals*. 4. vyd. Velká Británie: Elsevier, 2006, 421 s. ISBN 0 7506 6371 5.
- [11] RODRIGO, P., M. CAMBO, B. TORRES, M.D. ESCALERA, E. OTERO and J. RAMS. Microstructure and wear resistance of Al-SiC composites coatings on ZE41 magnesium alloy. *Applied Surface Science*. 2009, vol. 255, s. 9174-9181. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [12] PARK, J. P., M. G. KIM, U. S. YOON and W. J. KIM. Microstructures and mechanical properties of Mg-Al-Zn-Ca alloys fabricated by high frequency electromagnetic casting method. *Journal of Material Science*. 2008, vol. 44, s. 47-54. Dostupné z: www.springerlink.com.
- [13] ZHANG, B., Y. TU, J. CHEN, H. ZHANG, Y. KANG and H. G. SUZUKI. Preparation and characterization of as-rolled AZ31 magnesium alloy sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, vol. 184, s. 102-107. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [14] NEIL, W. C., M. FORSYTH, P. C. HOWLETT, C.R. HUTCHINSON and B. R. W. HINTON. Corrosion of magnesium alloy ZE41 – The role of microstructural features. *Corrosion Science*. 2009, vol. 51, s. 387-394. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [15] DING, R., Ch. CHUNG, Y. CHIU and P. LYON. Effect of ECAP on microstructure and mechanical properties of ZE41 magnesium alloy. *Material Science and Engineering:A*. 2010, vol. 527, s. 3777-3784. Dostupné z: www.sciencedirect.com.

- [16] Současné trendy ve zpracování hořčkových slitin. *MM Průmyslové Spektrum*. 2005, č. 10, s. 59. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-ve-zpracovani-horcikovych-slitin-tvarenim>.
- [17] Magnesium and its alloys [online]. [citováno 2011_02_03]. Dostupné z: http://www.sut.ac.th/Engineering/Metal/pdf/Nonferrous/03_Magnesium%20and%20magnesium%20alloys.pdf.
- [18] GARCÍA, M. E. *Influence of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of extruded Mg-Zn based alloys* (disertační práce) [online]. Berlin: Technische Universität Berlin, 2010. 151 s. Dostupné z: http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2010/2798/pdf/mezagarcia_enrique.pdf.
- [19] JUCHMANN, Peter. Magnesium Sheet parts for automotive applications – Material and Process chain. In *Innovative Developments for Lightweight Vehicle Structures 26 – 27 May, 2009 Wolfsburg, Germany*. Germany. s. 141-156. ISBN 978-3-00-027891-4. Dostupné z: http://www.superlightcar.com/public/docs/Conference_Transcript.pdf.
- [20] www.substech.com. Obrázek [online]. [citováno 2011_04_02]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=vertical_direct_chill_dc_casting.png
- [21] www.jfe-21st-cf.or.jp. Obrázek [online]. [citováno 2011_03_25]. Dostupné z: http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_6/6h_1_img.html.
- [22] Joining Magnesium Alloys [online]. [citováno 2011_01_31]. Dostupné z: <http://www.magnesium-elektron.com/data/downloads/DS250JO.PDF>.
- [23] Welding of Magnesium-base Alloys [online]. [citováno 2011_01_31]. Dostupné z: <http://www.keytometals.com/Article35.htm>.
- [24] CARDARELLI, F. *Materials Handbook. A Concise Desktop Reference*. London: Springer, 2000, 595 s. ISBN 1-85233-168-2.
- [25] PADMANABAN, G. and V. BALASUBRAMANIAN. Metallurgical characterization of pulsed current gas tungsten arc, friction stir and laser beam welded AZ31B magnesium alloy joints. *Materials Chemistry and Physics*. 2011, vol. 125, s. 686-697. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [26] LIU, L. Introduction to the welding and joining of magnesium. In LIU, Liming. *Welding and Joining of magnesium alloys*. 1st ed. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2010, s. 389. ISBN 987-1-84569-692-4.
- [27] SOMASEKHARAN, A. C. and L. E. MURR. Microstructures in friction stir-welded dissimilar magnesium alloys and magnesium alloys to 6061-T6 aluminium alloy. *Materials Characterization*. 2004, vol. 52, s. 49-64. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [28] MIN, D., J. SHEN, S. LAI and J. CHEN. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of tungsten inert gas arc butt-welded AZ61 magnesium alloy plates. *Materials Characterization*. 2009, vol. 60, s. 1583-1590. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [29] Gas Tungsten Arc Welding (TIG or GTAW) for Magnesium Alloys [online]. [citováno 2011_01_31]. Dostupné z: <http://www.welding-technology-machines.info/welding-of-magnesium-and-its-alloys/gas-tungsten-arc-welding-TIG-GTAW-for-magnesium-alloys.htm>.

- [30] LIU, L. Gas-tungsten arc welding of magnesium alloys. In LIU, Liming. *Welding and Joining of magnesium alloys*. 1st ed. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2010, s. 389. ISBN 987-1-84569-692-4.
- [31] NUNES, R. M., et al. *ASM Handbook, Volume 6, Welding, Brazing and Soldering*. 2. vyd. USA: ASM International Ohio, 1994, 2873 s. ISBN 0-87170-377-7(V.1).
- [32] XU, N., J. SHEN, W. XIE, L. WANG, D. WANG and D. MIN. Abnormal distribution of microhardness in tungsten inert gas arc butt-welded AZ61 magnesium alloy plates. *Materials Characterization*. 2010, vol. 61, s. 713-719. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [33] CZERWINSKI, F. Welding and Joining of Magnesium alloys. In CZERWINSKI, F. *Magnesium alloys – Desing, Processing and Properties*. InTech, 2011, 526 s. ISBN 978-953-307-520-4.
- [34] WEMAN, K. *Welding processes handbook*. 1. vyd. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2003, s. 189. ISBN 1-85573-689-6.
- [35] SHAN, J. Laser welding of magnesium alloys. In LIU, Liming. *Welding and Joining of magnesium alloys*. 1st ed. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2010, s. 389. ISBN 987-1-84569-692-4.
- [36] CHEHAÏBOU, A. and J.-C. GOUSSIAN. High Density Energy Beam Welding Processes: Electron Beam and Laser Beam. In BLONDEAU, R. *Metallurgy and Mechanics of Welding*. 1st ed. Wiley-ISTE, 2008, s. 512. ISBN 978-1-84821-038-7.
- [37] SCHRAM, A. and CH. KETTLER. Joining Magnesium Alloys. In KAINER, K.U. *Magnesium Alloys and Technology*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, s. 285. ISBN 3-527-30570-X.
- [38] www.orc.soton.ac.uk [online]. [cit. 2011-04-21]. How Fibre Lasers Works. Dostupné z: <http://www.orc.soton.ac.uk/61.html>.
- [39] DHAHRI, M., J. E. MASSE, J. F. MATHIEU, G. BARREAU and M. AUTRIC. Laser Welding of AZ91 and WE43 Magnesium Alloys for Automotive and Aerospace Industry. *Advanced Engineering Materials*. 2001, vol. 3, s. 504-507. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com>.
- [40] LEHNER, C., G. REINHART and L. SCHALLER. Welding of die-casted magnesium alloys for production. *J. Laser. Appl.* 1999, vol. 11, s. 206-210. Dostupné z: <http://jla.aip.org>.
- [41] AGHION, E. and B. BRONFIN. Magnesium alloys development towards 21st century. *Materials Science Forum*. 2000, vol. 350-351, s. 19-30. Dostupné z: <http://www.scientific.net>.
- [42] HAFERKAMP, H. Laser beam welding of magnesium alloys. In *Proceedings of the 1997 International Welding and Joining Research Conference and WTIA 45th Annual Conference 10 – 12 November, 1997 Melbourne, Australia*. Paper no. 21.
- [43] WEISHEIT, A., R. GALUN and B. L. MORDIKE. CO₂ laser beam welding of magnesium-based alloys. *Welding Journal*. 1998, vol. 77, s. 149-154. Dostupné z: <http://www.refdoc.fr>.
- [44] QUAN, Y. J., Z. H. CHEN, X. S. GONG and Z. H. YU. Effects of heat input on microstructure and tensile properties of laser welded magnesium alloy AZ31. *Materials Characterization*. 2008, vol. 59, s. 1491-1497. Dostupné z: www.sciencedirect.com.

- [45] PADMANABAN, G. and V. BALASUBRAMANIAN. Optimization of laser beam welding process parameters to attain maximum tensile strength in AZ31B magnesium alloy. *Optics & Laser Technology*. 2010, vol. 42, s. 1253-1260. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [46] SRINIVASAN, P. B. Mechanical properties and stress corrosion cracking behaviour of AZ31 magnesium alloy laser weldments. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011, vol. 21, s. 1-8. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [47] KANNAN, M. B., W. DIETZEL, C. BLAWERT, S. RIEKHERT and M. KOCAK. Stress corrosion cracking behavior of Nd:YAG laser butt welded AZ31 Mg sheet. *Materials Science and Engineering:A*. 2007, vol. 444, s. 220-226. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [48] AL-KAZZAZ, H., M. MEDRAJ, X. CAO and M. JAHAZI. Nd:YAG laser welding of aerospace grade ZE41A magnesium alloy: Modeling and experimental investigations. *Material Chemistry and Physics*. 2008, vol. 109, s. 61-79. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [49] MARYA, M. and G. R. EDWARDS. Influence of laser beam variables on AZ91D weld fusion zone microstructure. *Science and technology of welding and joining*. 2002, vol. 7, s. 286-293. Dostupné z: <http://www.refdoc.fr>.
- [50] MARYA, M., G. R. EDWARDS and D. L. OLSON. Welding of magnesium alloys for transportation applications. In *Proceedings from Materials Solution '00 on Joining of Advanced and Specialty Materials, 9 – 11 October, 2000 St. Louis, Missouri. USA*. Ohio: ASM: International, 2001. s. 122-128. ISBN 0871707306.
- [51] MISHRA, R.S. et al. Friction Stir and Processing. USA: ASM International Ohio, 2007, 368 s. ISBN 978-0-87170-840-3.
- [52] MISHRA, R.S. and Z. Y. MA. Friction stir welding and processing. *Material Science and Engineering: R*. 2005, vol. 50, s. 1-78. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [53] COMMIN, L., M. DUMONT, J.-E. MASSE and L. BARRALLIER. Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy rolled sheets: Influence of processing parametrs. *Acta Materialia*. 2009, vol. 57, s. 326-334. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [54] ZHANG, H. Friction stir welding of magnesium alloys. In LIU, Liming. *Welding and Joining of magnesium alloys*. 1st ed. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2010, s. 389. ISBN 987-1-84569-692-4.
- [55] KANNAN, B. M., W. DIETZEL, R. ZENG, R. ZETTLER and J. F. DOS SANTOS. A study on the SCC susceptibility of friction stir welded AZ31 Mg sheet. *Materials Science and Engineering: A*. 2007, vol. 460-461, s. 243-250. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [56] SUHUDDIN, U. F. H. R., S. MIRONOV, Y. S. SATO, H. KOKAWA and C.-W. LEE. Grain structure evolution during friction-stir welding of AZ31 magnesium alloy. *Acta Materialia*. 2009, vol. 57, s. 5406-5418. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [57] AFRIN, N., D. L. CHEN, X. CAO and M. JAHAZI. Microstructure nad tensile properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2008, vol. 472, s. 179-186. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [58] PARK, S. H. C., Y. S. SATO and H. KOKAWA. Effect of micro-texture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test. *Scripta Materialia*. 2003, vol. 49, s. 161-166. Dostupné z: www.sciencedirect.com.

- [59] SRINIVASAN, P. B., R. ZETTLER, C. BLAWERT and W. DIETZEL. A study on the effect of plasma electrolytic oxidation on the stress corrosion cracking behaviour of a wrought AZ61 magnesium alloy and its friction stir weldment. *Materials Characterization*. 2009, vol. 60, s. 389-369. Dostupné z: www.sciencedirect.com.
- [60] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha, Český normalizační institut, 2010, 64 s.
- [61] ČSN EN 895. *Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem*. Praha, Český normalizační institut, 1997, 16 s.
- [62] ČSN EN 1043-2. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkouška tvrdosti – Část 2: Zkouška mikrotvrdosti*. Praha, Český normalizační institut, 1998, 12 s.
- [63] YI, S., J. BOHLEN, F. HEINEMANN and D. LEITZIG. Mechanical anisotropy and deep drawing behaviour of AZ31 and ZE10 magnesium alloys sheet. *Acta Materialia*. 2010, vol. 58, s. 592-605. Dostupné z: www.sciencedirect.com.

9. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Mikrostruktura základního materiálu	1
Příloha 2	Metalografické hodnocení svarových spojů – svařování metodou Friction Stir Welding	21
Příloha 3	Metalografické hodnocení svarových spojů – svařování pevnolátkovým pulzním laserem	45
Příloha 4	Metalografické hodnocení svarových spojů – svařování kontinuálním vláknovým laserem	61