

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**SVAŘOVÁNÍ VÝVODŮ BATERIOVÝCH ČLÁNKŮ DO
VOZIDLA FORMULA STUDENT**

**WELDING OF BATTERY CELLS FOR FORMULA STUDENT
MONOPOST**

AUTOR:

Bc. Josef Med

STUDIJNÍ PROGRAM:

Výrobní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE:

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

PRAHA, 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Med** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **473576**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Svařování vývodů bateriových článků do vozidla Formula student

Název diplomové práce anglicky:

Welding of battery cells for Formula student car

Pokyny pro vypracování:

- Analýza problematiky výroby spojů bateriových článků - použití, konstrukce, materiály, požadavky na vozidla v soutěži Formula student
- Návrh vhodných technologií spojování vývodů bateriových článků
- Návrh postupu zkoušení spoje - měření pevnosti, elektrického odporu
- Experimentální provedení spojů vybranými metodami spojování, optimalizace
- Závěr a vyhodnocení spojů

Seznam doporučené literatury:

- [1] Turňa, M.: Špeciálne metódy zvarovania, Alfa, Bratislava, 1989, 384 s. ISBN 80-05- 00097-9
- [2] Hrivňák, I.: Zvarovanie a zvariteľnosť materiálov, STU v Bratislave, Bratislava, 2009
- [3] ASM Handbooks: Welding, Brazing and Soldering, Vol. 6, USA 1995, 1299s
- [4] Firemní podklady: Dukane, Lintech atd.
- [5] Předpisy soutěže Formula student

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **28.10.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **16.01.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.01.2023**

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE za trpělivost, odborné vedení a pomoc při zpracování diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval paní Ing. Eleně Čižmárové, Ph.D. a paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za pomoc při metalografických zkouškách. Nedílnou součástí mého studia bylo působení v týmu eForce, bez kterého by tato práce nevznikla. Velké poděkování patří také týmovým kolegům Ing. Petru Haincovi a Ing. Ondřeji Šeredovi za přínosné informace a pomoc při měření elektrického přechodového odporu.

V neposlední řadě bych rád poděkoval firmě Porsche Engineering Services, s.r.o. za konzultace a možnost využití laboratoře pro měření. Dále firmám LaserTherm spol. s r.o. a LINTECH, spol. s r.o. za možnost využití laserových technologií. Také děkuji firmě Dukane IAS, s.r.o. za poskytnutí technologie ultrazvukového svařování a firmě Omnitron s.r.o. za cenné rady.

Na závěr děkuji rodině za podporu během celého studia.

ANOTACE

Název diplomové práce:	Svařování vývodů bateriových článků do vozidla Formula Student
Jméno autora:	Bc. Josef Med
Jméno vedoucího práce:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Pracoviště:	Ústav strojírenské technologie, FS, ČVUT v Praze
Akademický rok:	2022/2023
<p>Diplomová práce porovnává dvě metody svařování bateriových vývodů. Jedná se o ultrazvukové svařování a svařování laserovým paprskem. Konstrukce porovnávaných vzorků vychází z řešení vyrobené akumulátorové baterie z vozidla FSE.X kategorie Formula Student Electric týmu eForce FEE Prague Formula.</p> <p>Základní materiál byl před výrobou samotných vzorků prozkoumán spektrální a metalografickou analýzou. Svařené vzorky byly zkoumány nejdříve nedestruktivními testy, tedy vizuální a kapilární zkouškou, a dále byl změřen přechodový elektrický odpor. Při destruktivních testech byly měřeny mechanické vlastnosti svaru (pevnost, mikrotvrdość) a také došlo k metalografické analýze samotného svaru.</p> <p>Na závěr byla vyhodnocena vhodná metoda výroby baterií pro nadcházející monopost studentské formule.</p>	
Klíčová slova:	Bateriové vývody, svařování, ultrazvukové svařování, svařování laserovým paprskem, akumulátorová baterie, Formula Student, spektrální analýza, metalografická analýza
Počet stran:	99
Počet obrázků:	90
Počet tabulek:	14
Počet příloh:	2

ANNOTATION

<i>Title of master thesis:</i>	Welding of battery cells for Formula Student car
<i>Author:</i>	Bc. Josef Med
<i>Supervisor:</i>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
<i>Institute/Department:</i>	Department of Manufacturing Technology, Faculty of Mechanical Engineering, CTU in Prague
<i>Academic year:</i>	2022/2023
<p>This diploma thesis compares two welding methods of battery tabs. These methods are ultrasonic welding and laser welding. Guiding principle for manufacturing of compared samples is accumulator battery of Formula Student Electric vehicle FSE.X constructed by eForce FEE Prague Formula team.</p> <p>The base material was examined by spectral and metallographic analysis before the actual samples were produced. Welded samples were at first tested non-destructively, by the visual and the capillary tests. Their electrical resistance was also measured. During the destructive tests, their mechanical characteristics were measured (such as stiffness and microhardness), and the metallographic analysis of the weld was also performed.</p> <p>In conclusion, a suitable method of the manufacturing for upcoming vehicles of Formula Student was evaluated.</p>	
<i>Key words:</i>	Battery tabs, welding, ultrasonic welding, laser welding, battery, Formula Student, spectral analysis, metallographic analysis
<i>Number of pages:</i>	99
<i>Number of pictures:</i>	90
<i>Number of tables:</i>	14
<i>Number of appendices:</i>	2

Obsah

Seznam použitých zkratk, veličin a symbolů	10
1 Úvod	13
Teoretická část	14
2 Tým eForce FEE Prague Formula	14
3 Soutěž Formula Student	16
3.1 Historie Formula Student.....	16
3.2 Disciplíny soutěže a jejich bodování	17
3.3 Pravidla relevantní pro svařování bateriových článků.....	19
4 Typy bateriových článků	20
4.1 Cylindrický článek	20
4.2 Prizmatické články	21
4.3 Sáčkový článek	21
5 Metody spojování bateriových článků.....	22
5.1 Svařování elektrickým odporem – bodové	24
5.1.1 Princip svařování el. odporem	24
5.1.2 Princip bodového svařování	24
5.1.3 Použití bodové svářečky na svařování bateriových článků	25
5.2 Ultrazvukové svařování.....	27
5.2.1 Princip ultrazvukového svařování kovových materiálů	28
5.2.2 Princip svařování elektrickým odporem	31
5.3 Laserové svařování.....	32
5.3.1 Princip laseru	32
5.3.2 Nejčastější typy laserů pro svařování	34
5.3.3 Svařování laserem.....	35
5.3.4 Aplikace laserového svařování v elektromobilitě.....	36
5.4 Mikro TIG svařování	37
5.4.1 Princip svařování metodou mikro TIG	37
5.4.2 Svařování bateriových článků metodou mikro TIG.....	37
5.5 Pájení	38
6 Nedestruktivní kontrola svarových spojů bateriových článků	38

6.1	Vizuální zkouška (VT – visual test)	38
6.2	Kapilární zkouška (PT – penetrant test).....	39
6.3	Měření přechodového elektrického odporu svarového spoje	40
7	Destruktivní kontrola svarových spojů bateriových článků.....	42
7.1	Statická zkouška stříhem	42
7.2	Metalografická zkouška – analýza makro a mikro struktury svarů	43
7.3	Měření mikrotvrdosti svarových spojů.....	45
7.3.1	Zkouška mikrotvrdosti svarových spojů	45
7.3.2	Umístění vpichů pro zkoušku tvrdosti svarových spojů	47
	Experimentální část.....	48
8	Konstrukce akumulátorové baterie	48
9	Základní materiál	50
9.1	Metalografická zkouška – analýza mikrostruktury	50
9.2	Spektrální analýza – měření chemického složení	52
9.3	Výsledky analýzy základního materiálu	54
10	Konstrukce vzorků, podmínky svarového spoje	54
11	Svařování ultrazvukem.....	56
11.1	Popis zařízení pro ultrazvukové svařování.....	56
11.2	Postup nastavení zařízení pro ultrazvukové svařování.....	58
11.3	Výsledné vzorky – svařování ultrazvukem	59
12	Svařování laserem.....	60
12.1	Popis zařízení pro laserové ruční svařování.....	60
12.2	Postup nastavení laserového zařízení	62
12.3	Výsledné vzorky	63
13	Nedestruktivní kontrola vytvořených vzorků	64
13.1	Vizuální kontrola	64
13.2	Kapilární zkouška	65
13.2.1	Zkušební zařízení pro PT zkoušku	65
13.2.2	Popis zkoušky PT	65
13.2.3	Výsledek zkoušky PT	66
13.3	Přechodový elektrický odpor	67
13.3.1	Zkušební zařízení pro měření přechodového elektrického odporu ...	67

13.3.2	Popis měření přechodového elektrického odporu	68
13.3.3	Výsledek měření přechodového elektrického odporu	70
14	Destruktivní kontrola	73
14.1	Metalografická zkouška svarových spojů	73
-	analýza makrostruktury	73
14.1.1	Zkušební zařízení pro metalografickou zkoušku	73
14.1.2	Příprava metalografických vzorků	74
14.1.1	Vyhodnocení makrostruktury pomocí optického mikroskopu	75
14.2	Statická zkouška stříhem	79
14.2.1	Zkušební zařízení pro zkoušku stříhem	79
14.2.2	Popis zkoušky stříhem	80
14.2.3	Výsledky zkoušky stříhem	80
14.3	Zkouška mikrotvrdomosti	82
14.3.1	Zkušební zařízení zkoušky mikrotvrdomosti	82
14.3.2	Popis zkoušky mikrotvrdomosti	82
14.3.3	Výsledky zkoušky mikrotvrdomosti	85
15	Závěr	88
16	Seznam použité literatury	90
	Seznam Obrázků	95
	Seznam Tabulek	99
	Seznam příloh	99

Seznam použitých zkratk, veličin a symbolů

Symbol	Veličina/Význam	Jednotka
16s2p	Elektrická konfigurace zapojení	
5Al2,5Sn	Sumární vzorec titanové slitiny (grade 6)	
Ag	Chemická značka stříbra	
Al	Chemická značka hliníku	
AlZn5,5MgCu	Sumární vzorec hliníkové slitiny (EN AW 7075)	
Ar	Chemická značka argonu	
BMS	Battery Management system	
CAN	Controller Area Network	
CCD	Charge-coupled device	
Cu	Chemická značka mědi	
d	Délka	
DC	Driverless Cup	
DP	Diplomová práce	
DV	Driverless Vehicle	
EDX	Energy Dispersive X-ray Analysis	
EV	Electric Vehicle	
f	Frekvence kmitů	[Hz]
F	Síla	[N]
FEL	Fakulta elektrotechnická	
FS	Fakulta strojní	
FSC	Formula Student Combustion	
FSD	Formula Student Driverless	
FSE	Formula Student Electric	
FSG	Formula Student Germany	
He	Chemická značka helia	
HV	Tvrдость podle Vickerse	

I	Elektrický proud	[A]
iMechE	Institution of Mechanical Engineers	
INS	Inerciální navigační systém	
LARISA	Laserová Ruční Inteligentní Svařečka	
Laser	Light Amplification by stimulated Emission of Radiation	
LiCoO ₂	Lithium Cobalt Oxide	
LiFePO ₄	Lithium-železo-fosfátová baterie	
Mo	Chemická značka molibdenu	
NDT	Non destructive testing – nedestruktivní testování	
Ni	Chemická značka niklu	
PM	Typ elektrického motoru s permanentními magnety	
PR	Public Relations	
PT	Penetrant test – kapilární zkouška	
Q	Množství tepla	[J]
R	Elektrický odpor	[Ω]
RTG	Rentgen	
SAE	the Society of Automotive Engineers	
SiC	Karbid křemíku	
SiO ₂	Oxid křemičitý	
SK	Svarový kov	
t	Čas	[s]
T	Perioda kmitů	[s]
Ta	Chemická značka tantalu	
Ti	Chemická značka titanu	
TIG	Tungsten Inert Gas – Svařování metodou wolfram-inertní plyn	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
U	Elektrické napětí	[V]
UMI	Ústav materiálového inženýrství	
UV	Ultrafialové záření	

v	Fázová rychlost šíření vln	[m/s]
VT	Visual test – vizuální zkouška	
W	Chemická značka wolframu	
ZM	Základní materiál	
Zr	Chemická značka zirkonia	
α	Úhel	[°]
λ	Vlnová délka	[m]

1 Úvod

Diplomová práce vznikla na základě stavby závodního vozidla formulového typu na elektrický pohon v týmu eForce FEE Prague Formula. Tento tým již více než deset let každoročně soutěží v soutěži Formula Student v kategorii pro elektrické pilotované vozy. Od roku 2019 nově také soutěží v kategorii autonomních elektrických vozidel. Cílem soutěže je navrhnout vozidlo, zkonstruovat ho a následně s ním závodit. Kompletní monopost plní pravidla Formula Student Germany. Jako člen mechanické skupiny si autor diplomové práce vybral užší zaměření své práce na konstrukci vysokonapěťové akumulátorové baterie. Byl zodpovědný za mechanický návrh zástavby celého akumulátoru, výběr materiálů a jejich zkoušek a určení vhodné metody spojování článků, vše v souladu se striktními pravidly Formula Student.

Hlavním tématem diplomové práce je porovnání vybraných metod spojování vývodů bateriových článků. Princip konstrukce svaru vychází z již vyrobeného akumulátoru desáté generace elektrické formule týmu eForce, u kterého bylo použito ultrazvukové svařování z důvodu dostupnosti. Cílem práce je podrobnější analýza vlastností jednotlivých typů svarů a zvolení svařovací metody na nastávající sezónu.

Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. Teoretická část se zabývá představením soutěže Formula Student, prezentací týmu eForce, rešerší typů bateriových článků a metod jejich spojování. Dále jsou popsány metody kontroly svarových spojů pomocí nedestruktivních a destruktivních zkoušek. Experimentální část popisuje konkrétní provedení zkušebních svarových spojů pomocí ultrazvukového a laserového svařování. Jejich vlastnosti byly následně měřeny za účelem ověření mechanických a elektrických vlastností. V závěru jsou shrnuty experimentální zjištění, popsány výsledky a jsou navržena možná vylepšení pro další generaci akumulátorové baterie.

Teoretická část

2 Tým eForce FEE Prague Formula

Tým eForce vznikl v roce 2010 s vizí vyvíjet plně elektrická závodní vozidla pod Fakultou elektrotechnickou. Navázal tak na činnost Fakulty strojní, která pod názvem týmu CTU CarTech konstruuje formule se spalovacím motorem již od roku 2007. Po dvou letech působení týmu eForce byla postavena první elektrická formule v České republice a od té doby se týmu dařilo každou sezónu postavit nový monopost.

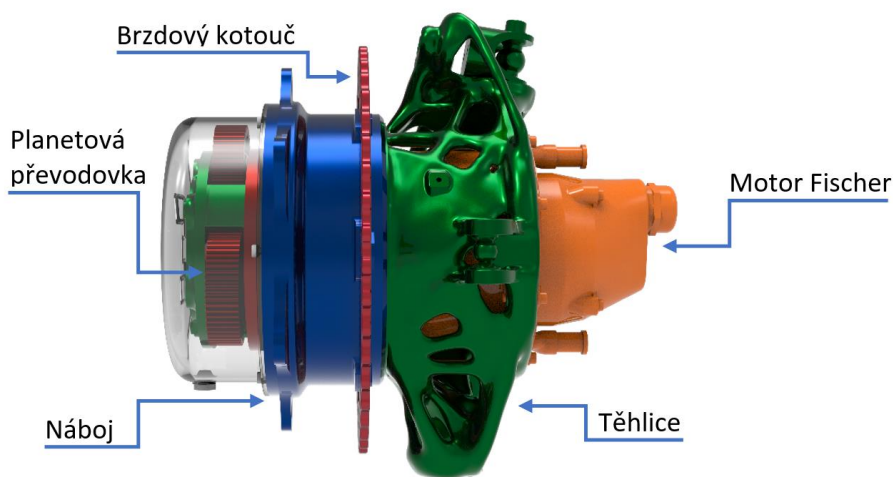
Vyvinout a postavit funkční automobil za méně než rok, a to ve svém volném čase, není úkol pro jedince, ale pro desítky studentů nejenom z Fakulty elektrotechnické, ale i z Fakulty strojní a dalších součástí ČVUT v Praze. V týmu eForce je stabilně 40 aktivních členů napříč všemi studijními obory. Tým má svou strukturu, která je rozdělena do menších skupin, které společně vyvíjejí monopost na nadcházející závodní sezónu.

To, co dělá tento školní projekt jedinečným, je beze sporu možnost uplatnit své studiem načerpané znalosti v praxi a získat zkušenosti ve všem, co patří k výrobě automobilu, a to od samého návrhu konstrukce, zajištění výroby jednotlivých součástí vozu až po jeho celkovou montáž. Na obrázku 2.1 je vyfocen desátý pilotovaný monopost FSE.X a první autonomní formule DV.01. Každým rokem se monoposty vylepšují a tým stále více konkuruje nejlepším týmům světa. Proto je cílem využívat nejnovější dosažitelné technologie současné doby.



Obrázek 2.1 Elektrický pilotovaný FSE.X a autonomní monopost DV.01 [zdroj: archiv eForce]

Revoluční desátý monopost FSE.X je kompletně přepracovaný od deváté generace. Akumulátorová baterie byla nově umístěna pod koleno pilota, čímž došlo k výraznému zkrácení celomonokoku, který se vyrábí ze sendvičové kompozitové struktury. Další hlavní změnou byla kolová sestava, kde byla při návrhu využita topologická optimalizace a pomocí 3D tisku z hliníkové slitiny byly vyrobeny těhlice. Uvnitř kolové zástavby každého kola je zabudovaný motor o výkonu 35 kW viz obrázek 2.2. Základní parametry vozidla jsou uvedeny v tabulce 1 níže. [1]



Obrázek 2.2 Model kolové zástavby s popisky [zdroj: archiv eForce]

Tabulka 1 Specifikace FSE.X [1]

Maximální výkon	141,48 kW/ omezeno na 80 kW dle pravidel
Rozvor x rozchod	1525 mm x 1200 mm
Hmotnost	195 kg
Rozložení hmotnosti (vpředu : vzadu)	49,5 : 50,5 %
Rám	Kompozitní monokok sendvičové struktury z uhlíkových vláken s hliníkovým voštinovým jádrem
Zavěšení kol	Nezávislé zavěšení kol, dvojitá A-ramena
Odpružení	Typ push-rod na obou nápravách
Ráfky	Hliníkové 10" – Keizer
Pneumatiky	Hoosier 16x7,5-10
Motory	Synchronní PM motory Fischer (4x 35,37 kW)
Maximální točivý moment	1450 Nm do 60 km/hod
Celková energie	7,45 kWh
Maximální napětí	604,8 V, dle pravidel omezeno na 600 V
Elektronika	Dvě sběrnice CAN Kontrola trakce – jednotka INS (navigace pro lepší snímání) Torque vectoring – elektronický diferenciál v každém kole (pomáhá k rychlejšímu průjezdu zatáčkou) Volantová jednotka, pedálová jednotka

3 Soutěž Formula Student

Cílem studentské soutěže Formula Student je zkonstruovat a vyrobit jednomístný automobil formulového typu během jednoho roku a poté s ním závodit. Vítěz ale nemusí být tým, který má nejrychlejší formuli, ale i ten, který dokáže svá technická řešení nejlépe obhájit a odprezentovat. Soutěž Formula Student je nejkreativnější forma motorsportu, která má vysokou prestiž. Účastní se jí téměř 1000 univerzit z celého světa. Na závodech se v první řadě kontroluje, jestli jsou monoposty postaveny dle pravidel a vše splňuje bezpečnostní nároky. Evropské týmy se řídí podle pravidel od německých pořadatelů FSG (Formula Student Germany), v Americe jsou pravidla od organizace SAE (the Society of Automotive Engineers). V současné době existují 3 kategorie, ve kterých se soutěží. Spalovací a hybridní (FSC), elektrická (FSE) a autonomní (FSD). Studenti ČVUT v Praze soutěží ve všech kategoriích, tým eForce (působící na FEL) konstruuje elektrické pilotované a autonomní formule a CTU CarTech (působící na FS) vyrábí monoposty se spalovacím a nově i s hybridním pohonem.

Hlavním smyslem soutěže je vychovávat mladé inženýry, kteří si již při studiu zažijí, jaké to je něco vyvíjet, konstruovat, plánovat výrobu, spolupracovat v týmu, řešit marketing, sponzorství, PR a další potřebné záležitosti spojené s výše zmíněnou soutěží Formula Student. Absolventi potom mají i lepší šanci se uplatnit na trhu práce. [2]

3.1 Historie Formula Student

V roce 1981 organizace SAE založila soutěž Formula SAE, které se účastnilo zhruba 140 studentských týmů z celého světa. V roce 1998 se poprvé konaly závody v Anglii ve spolupráci s iMechE, tyto závody se konají každoročně na okruhu F1 v Silverstonu. V Austrálii se závody pořádají od roku 1999.

Pro Evropu byl velkým milníkem rok 2005, kdy pořadatelé FSG (Formula Student Germany) organizovali nultý ročník závodů pod SAE pravidly. Od roku 2007 zveřejňuje FSG svá pravidla, která jsou téměř totožná jako SAE. Německé závody bývají považovány za nejprestižnější a nejuznávanější ve světě. [2]

I v České republice se od roku 2013 každoročně pořádají závody na mosteckém polygonu, pořádané Ing. Michalem Vašíčkem, Ph.D., absolventem Fakulty strojní ČVUT

v Praze. Dále je možné v rámci Evropy účastnit se oficiálních závodů v Německu, Holandsku, Maďarsku, Rakousku, Itálii, Španělsku, Velké Británii a od roku 2022 se k nim přidaly i závody v Chorvatsku pořádané firmou Buggati Rimac. Mezi nové pořadatele patří závody ve Švýcarsku, Portugalsku a Polsku. Aby se závody staly oficiálními a mohly být počítány do světového žebříčku, musí se konat minimálně třikrát.

Rok 2022 byl pro tým eForce jeden z nejúspěšnějších, s monoposty FSE.11 a DV.01 dokázal vybojovat nemálo vysokých umístění. Pro pilotovanou FSE.11 byly hned první závody ve Švýcarsku těmi vítěznými. Poté se tým umístil dvakrát na celkovém druhém místě na závodech v České republice a v Chorvatsku. Také se může pyšnit účastí na nejprestižnějším závodě v Německu, kde vybojoval 24. pozici. Autonomní formule se účastnila tří závodů, první byly v Itálii, kde tým vybojoval pátou příčku. Poté se účastnil také závodů v České republice, kde vyhrál dvě dynamické disciplíny Autocross a Acceleration a celkově obsadil třetí příčku. Poslední závody pro autonomní formuli byly v Maďarsku na okruhu Hungaroring, kde po technických problémech obsadil až 19. místo.

3.2 Disciplíny soutěže a jejich bodování

Soutěž Formula Student se skládá ze dvou sektorů disciplín, statických a dynamických. Níže jsou popsány jednotlivé disciplíny. V roce 2022 došlo k zásadní změně v bodování na nejprestižnějších závodech v Německu, kdy se dynamické disciplíny rozrostly o disciplíny autonomní, čímž získaly výhodu týmy, které již konstruují autonomní formule. V tabulce 2 níže je vyobrazeno bodování jednotlivých disciplín. Jednotlivé disciplíny hodnotí inženýři z automobilového průmyslu, ale i ze závodního prostředí, jako je Formule 1. [2]

Statické disciplíny se dělí na:

- Engineering Design Event – studenti mají za úkol obhájit svá technická řešení jednotlivých sestav formule,
- Cost & Manufacturing – ekonomické zpracování celého monopostu, v rámci sériové výroby,

- Business Plan – libovolné téma propojené s monopostem Formula Student, úkolem je přesvědčit potencionálního investora.

Dynamické disciplíny pro pilotované monoposty:

- Acceleration – zrychlení vozidla na vzdálenosti 75 m,
- Skid Pad – trať ve tvaru „osmičky“, prověření boční stability vozidla,
- Autocross – kvalifikační závod na vzdálenost zhruba 1 km, podle časů se týmy umísťují na počáteční pozice od nejpomalejších po nejrychlejší do hlavního závodu zvaného „Endurance“,
- Endurance – známá jako „královská disciplína“ – je to vytrvalostní závod na vzdálenosti 22 km, respektive na 22 kol, s povinným střídáním pilotů v polovině závodu,
- Efficiency – neboli efektivita, zhodnocení úspornosti vozidla (je měřeno, kolik vozidlo spotřebuje energie vzhledem k celkovému času).

Dynamické disciplíny pro autonomní monoposty:

- Acceleration, Skid Pad, Autocross Driverless – stejné jako u pilotovaných monopostů,
- Trackdrive – za nejvyšší bodové ohodnocení, závod na 10 kol, které formule musí ujet na jedno nastartování, po sražení kuželů nesmí formule vyjet z trati celou svojí délkou, sražené kužely se nevrací na původní pozici. [3; 2; 4]

Tabulka 2 Bodové hodnocení všech disciplín [4]

Disciplíny		FSC, FSE	Driverless Cup (DC)
Statické	Business Plan	75 bodů	---
	Cost and Manufacturing	100 bodů	---
	Engineering Design	150 bodů	150 bodů
Dynamické	Acceleration	50 bodů	---
	Acceleration Driverless	75 bodů	75 bodů
	Skid Pad	50 bodů	---
	Skid Pad Driverless	75 points	75 bodů
	Autocross	100 bodů	---
	Autocross Driverless	---	100 bodů
	Endurance	250 bodů	---
	Efficiency	75 bodů	---
	Trackdrive	---	200 bodů
	Celkově	1000 bodů	600 bodů

3.3 Pravidla relevantní pro svařování bateriových článků

Jelikož se diplomová práce týká elektrického monopostu Formula Student, musí splňovat pravidla, která jsou vydána od německých pořadatelů FSG. Tato pravidla udávají obecné technické charakteristiky, bezpečnostní prvky vozidla, hodnocení na soutěži, podmínky technických přejímek. Každým rokem se pravidla aktualizují, diplomové práce se týká aktuálního vydání 2023, verze 1.1. [4]

Výběr pravidel pro výrobu akumulátorové baterie po mechanické stránce:

1. **EV 4.5.16** Pájené spoje ve vysokoproudé cestě jsou možné jen tehdy, pokud jsou splněny následující podmínky:
 - připojení PCB (deska plošných spojů),
 - připojená zařízení nejsou bateriové články nebo kabely,
 - přístroje jsou dodatečně mechanicky zajištěny proti uvolnění.
2. **EV 5.5.10** Vývody sáčkových článků nesmí nést mechanické zatížení. Sáčkové články mohou přenášet zatížení pouze v případě zatížení na velkých plochách.
3. **EV 5.8.5** Maximální povolená teplota bateriových článků je 60 °C nebo limitní teplota uvedená v technickém listu výrobce článků, záležití, která hodnota je nižší.
4. **T 11.7.7** Akumulátorové baterie založené na chemii lithia jiné než lithium železo fosfát baterie (LiFePO₄) musí:
 - mít ohnivzdorný obal dle pravidla T 1.2.1,
 - obsahovat nadproudovou ochranu, která se vypne při nebo pod maximálním specifikovaným vybíjecím proudem článků,
 - obsahovat ochranu proti přehřátí pro alespoň 30 % článků, splňujících EV 5.8.4, která se vypne, když kterýkoli článek opustí povolený teplotní rozsah, podle technického listu výrobce. Ale ne více než 60 °C, po překročení se baterie odpojí po 1 s,
 - obsahovat napěťovou ochranu všech článků, které se odpojí, když jakýkoli článek opustí povolený rozsah napětí podle technického listu výrobce na více než 500 ms,
 - být možné zobrazit všechna napětí článků a naměřené teploty například po připojení notebooku. [4]

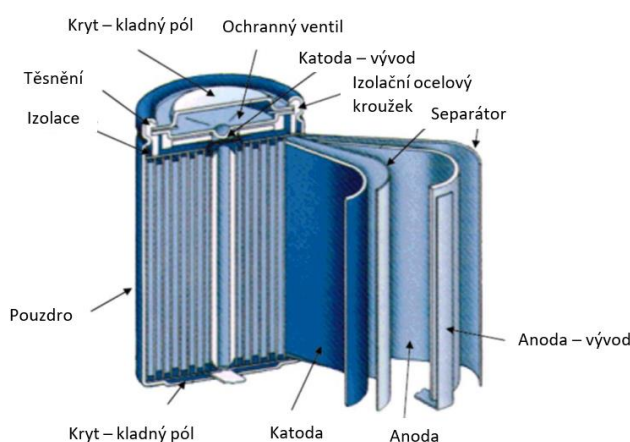
4 Typy bateriových článků

V současné době se pro elektromobily převážně používají lithium-iontové baterie na bázi elektrolytu. Tyto bateriové články se dělí do tří kategorií podle mechanické konstrukce. Princip jejich fungování je obdobný, jsou odlišné hlavně v mechanické konstrukci, v požadavcích na ně a použitých materiálech. V následujících podkapitolách budou popsány jednotlivé typy bateriových článků podrobněji. [5]

4.1 Cylindrický článek

Světově nejpoužívanější typ bateriových článků. Jedná se o cylindrické články též známé jako tzv. válcové články viz obrázek 4.2. Skládají se vždy z jedné anody a katody, které jsou oddělené separátorem a navinuty do válcového svitku. Hlavní výhodou je, že článek je uzavřený v pevném válcovém obalu, který zabraňuje nafukování, což je nežádoucí jev u baterií, kdy se mezi vrstvami hromadí plyny. Průřez článku je vidět na obrázku 4.1.

První sériové použití cylindrických článků bylo aplikováno v laptotech, které obsahovaly běžně 3 až 9 článků. Největší rozmach měla na svědomí americká automobilka Tesla, která začala tyto články používat ve vozidlech na elektrický pohon. Nevšední aplikace těchto článků je ve vesmírných satelitech Rover, díky jejich odolnosti vůči tlaku. Dále se využívají například v elektrokolech, v lékařských přístrojích či do Formule E. [6]



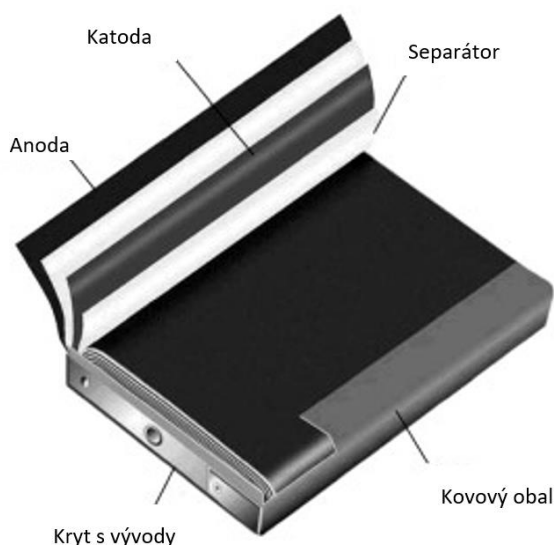
Obrázek 4.1 Průřez cylindrickým Lithium-iontovým článkem [7]



Obrázek 4.2 Populární Lithium-iontový cylindrický článek 18650 [8]

4.2 Prizmatické články

Na rozdíl od cylindrických článků jsou prizmatické články ve tvaru kvádrů. Chemický obsah článku je uložen v hliníkovém obalu. Díky uložení v kovovém pouzdru jsou články bezpečnější viz obrázky 4.3, 4.4. Tvar je také výhodný pro efektivní skládání článků do modulů, čímž se zvýší kapacita a napětí. Tyto články se čím dál častěji používají v elektrovozidlech, nebo jako úložiště energie v domácnosti, například ze solárních panelů. [5; 6]



Obrázek 4.3 Průřez prizmatickým článkem [8]



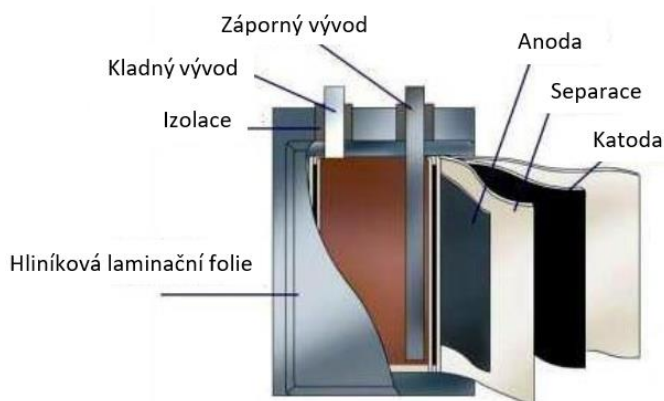
Obrázek 4.4 Prizmatický článek [5]

4.3 Sáčkový článek

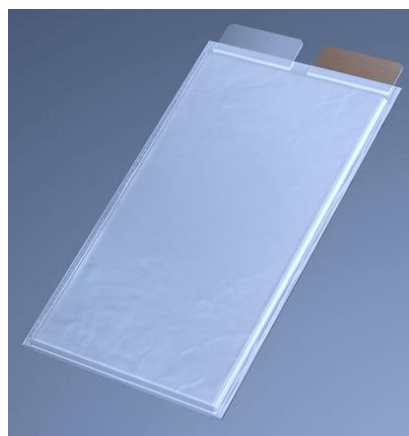
Sáčkový článek je ve světě nazýván jako „Pouch cell“. Sáčkový článek se od ostatních typů článků liší tím, že se jeho rozměry dají libovolně přizpůsobovat dle potřeby. Obsahuje veškerou chemii zatavenou do hermeticky uzavřeného hliníkového měkkého obalu viz obrázek 4.6. Obě elektrody jsou vyvedeny ve formě tenkých kovových plíšků, průřez je vyobrazen na obrázku 4.5. Tento typ článků dosahuje největší hustoty energie na jednotku hmotnosti i objemu. Největší nevýhodou těchto článků je jejich nebezpečnost při manipulaci, při poškození může dojít k explozi či požáru. Nežádoucím jevem je nafukování těchto článků, dochází k němu po uplynutí jeho cyklické životnosti, nebo při špatném managementu nabíjení. Používány jsou pro spotřební elektroniku jako například laptopy a mobilní telefony. V automobilovém

průmyslu se jednotlivé sáčkové články skládají do tzv. modulů (stacků), aby měly větší kapacitu a napětí.

Tento typ článků byl použit pro výrobu akumulátorové baterie pro monopost FSE.X týmu eForce. Celý akumulátor se skládá z 9 segmentů po 32 člancích, dohromady 288 článků (viz obrázek 4.7), Lithium kobalt LiCoO_2 . [9]



Obrázek 4.5 Průřez sáčkového článku [10]



Obrázek 4.6 Sáčkový článek [5]

5 Metody spojování bateriových článků

V současné době, kdy elektromobilita začíná pomalu ovládat automobilový průmysl, je řešené téma spojování bateriových článků velice aktuální. Níže jsou uvedeny principy technologií spojování článků, ať už cylindrických, či sáčkových článků.

Vždy jde o to, abychom dokázali propojit články, přidaným materiálem nebo přímým spojením vývodů z bateriových článků. Zejména se jedná o kovové materiály o tloušťce 0,2 - 0,6 mm. Nejčastěji se jedná o vývody z materiálů jako měď (často s povrchovou úpravou z niklu), nikl, hliník. Tyto materiály se obvykle spojují svařováním nebo pájením. Pro použití do řešené diplomové práce je pájení pravidly Formula Student zakázáno používat (viz kapitola č. 3.3). Svařování je proto nejekonomičtější způsob vytvoření trvalého nerozebíratelného spoje. Spojované materiály jsou nejčastěji stejné (jedná se tedy o homogenní spoje), lze ale spojovat i různorodé materiály (tzn. vytvářet spoje heterogenní). [11]

Nároky kladené na svarové spoje bateriových článků jsou obecně: zajištění mechanicky stabilního spoje, co nejmenší elektrický přechodový odpor, odolnost proti vibracím (tzn. zaručení co největší životnosti). Níže (viz tabulka 3) jsou proto popsány výhody a nevýhody vybraných spojovacích technologií. V další části diplomové práce jsou blíže popsány pouze svařovací metody, které splňují tyto uvedené podmínky a lze je použít na svařování výše uvedených materiálů malých tlouštěk.

Tabulka 3 Výhody a nevýhody spojovacích metod bateriových článků [12]

Technologie spojování	Výhody	Nevýhody	Problémy a obavy
Svařování elektrickým odporem	Rychlý proces, nízká cena, dobrá kontrola kvality, snadná automatizace	Obtížné svaření vysoce vodivých materiálů, špatně svařitelné odlišné materiály	Obtížnost výroby velkých svarových spojů při spojování více než dvou vrstev
Ultrazvukové svařování	Rychlý proces, vysoká pevnost a nízký odpor, možnost spojovat různé materiály, nízká energetická spotřeba	Vhodné pouze pro sáčkové články, nutnost oboustranného přístupu ke svařovaným dílům	Přístup lože a sonotrody, musí být dobře navrženo, specifický nástroj na každý typ spoje
Svařování laserem	Vysoká rychlost, menší teplotní ovlivnění při vstupu, bezkontaktní proces, snadná automatizace	Vysoké investiční náklady, vyžaduje dodržování podmínek bezpečnosti práce kvůli záření	Potřebuje dokonalé uchycení (těsné spojení), vysoce reflexní materiály
Mikro TIG/ pulzní obloukové svařování	Nízká cena, vysoká pevnost spoje a nízký el. odpor, možnost spojovat různé materiály, snadná automatizace	Vysoký tepelný vstup a tepelně ovlivněná oblast, pórovitost	Obtížné spojení hliníku s ocelí
Pájení	Spojování různých materiálů, široce rozšířené v elektrotechnickém průmyslu	Potřeba tavidla	Pevnost spoje, možné útržky, neutralizace tavidel
Mechanické spojení	Snadná demontáž a recyklace, snadné opravy, studený proces	Dodatečná hmotnost, zdouhavý proces, neekonomické	Potenciální mechanické poškození, povolení šroubu

5.1 Svařování elektrickým odporem – bodové

Jedná se o konvenční tlakovou metodu svařování. Je to nejdostupnější a neekonomičtější metoda svařování bateriových článků. Nejvíce se používá pro spojování cylindrických článků, na článek se přivaří nejčastěji niklový pásek, který slouží k propojení více článků.

5.1.1 Princip svařování el. odporem

Svařování el. odporem představuje koordinované působení el. proudu a mechanického tlaku během určitého času. Svařované díly jsou k sobě přitlačeny pomocí vodivých elektrod, které do dílů přenášejí proud. Přejedem elektrického proudu ve stykové ploše do svařovaných materiálů vzniká teplo, protože zde působí silný elektrický odpor. V místě, kde působí největší odpor (největší teplo), dochází k natavení materiálů a spolu s působením mechanického tlaku tzv. vzniká svarová čočka, čímž se vytvoří bodový svarový spoj.

Množství tepla lze vyjádřit pomocí Joulova-Lenzova zákona:

$$Q = I^2 * R * t \quad (5.1)$$

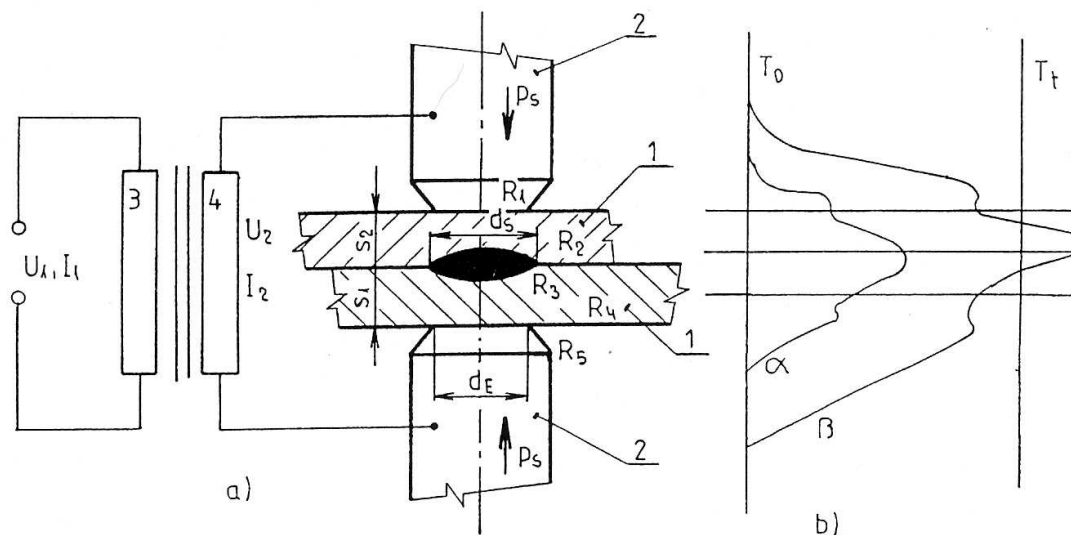
kde Q je množství tepla [J], R je odpor svarového spoje [Ω], I je svařovací proud [A] a t je doba působení svařovacího proudu (s). Všechny tyto parametry jsou důležité pro nastavení svařování. Pokud se použije proud o malé intenzitě a dlouhém svařovacím času jedná se o tzv. měkký svařovací režim, jestliže se použije svařovací proud o velké intenzitě a krátkém svařovacím času jedná se o tzv. tvrdý svařovací režim. Hodnota přechodových odporů významně závisí na kvalitě povrchu a typu svařovaných materiálů, materiálu elektrod a na tlaku mezi elektrodami.

Způsoby odporového svařování: bodové svařování, švové svařování, výstupkové svařování, vysokofrekvenční svařování, stykové tlakové svařování, stykové odtavovací svařování. [11; 13; 14]

5.1.2 Princip bodového svařování

Tento druh svařování je jedním z nejvíce používaných. Nejčastějšími svařovanými materiály jsou plechy různých tvarů, které se navzájem přeplátují a stlačí mezi

měděnými elektrodami. Zdroj svařovacího proudu je transformátor, který má primární a sekundární vinutí. Do elektrod se přivádí proud ze sekundárního vinutí transformátoru. V důsledku průchodu proudem materiálem se vytvářejí lokální (bodové) svary (viz obrázek 5.1).



Obrázek 5.1 Schéma odporového bodového svařování [14]
 a) schéma uspořádání: 1 – svařované materiály, 2 – elektrody, 3 – primární a 4 – sekundární vinutí
 b) průběh teplot: α – po uplynutí 0,02 s, β – po uplynutí 0,1 s

Celkový přechodový odpor R zmíněný ve vzorci 5.1 je tvořen součtem všech přechodových a materiálových odporů. Mezi tyto dílčí odpory náleží: přechodové odpory ve styku elektroda – svařovaný materiál (na obrázku 5.1 odpory R_1 a R_5), vlastní odpor svařovaných materiálů (na obrázku 5.1 odpory R_2 a R_4) a přechodový odpor ve styku povrchů základních materiálů (na obrázku 5.1 odpor R_3). Tyto odpory během svařování nejsou konstantní, mění se na základě velikosti přitlačné síly, teploty, na stavu povrchů kontaktních materiálů. [15; 14; 16]

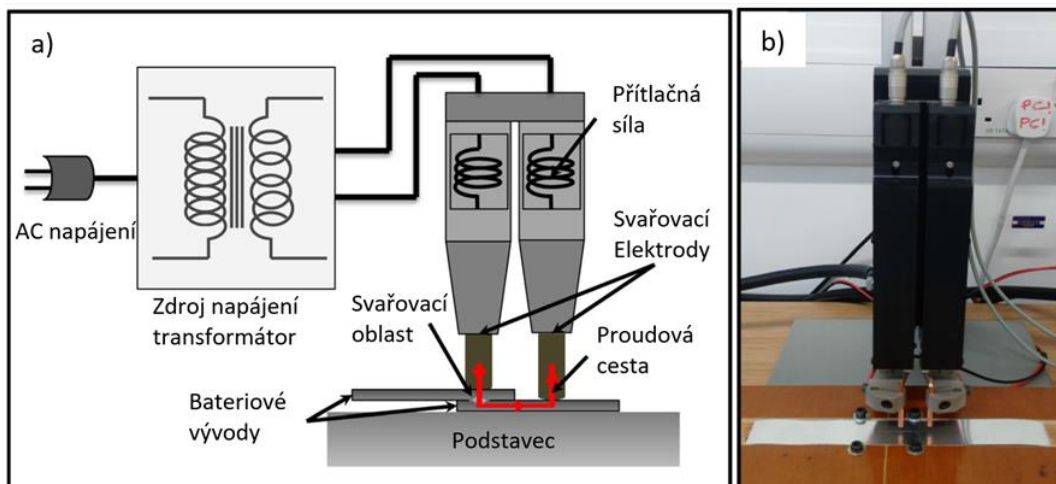
5.1.3 Použití bodové svářečky na svařování bateriových článků

Svařování bateriových článků bodovou svářečkou je významné díky nízkému tepelnému ovlivnění při svařování. Používá se tvrdý svařovací režim, tedy vysoké proudy a krátký čas. Na obrázku 5.3 je schéma bodové svářečky a uspořádání sestavy pro svařování bateriových vývodů. Pro svařování materiálů na spojování bateriových článků jako je měď, hliník, stříbro je potřebný velký proud. Díky tomu, že tyto materiály

jsou dobře vodivé, a i při vysokých proudech mají nízký odpor, nedosahují tedy potřebných teplot pro vznik svarového spoje. Proto se pro svařování cylindrických článků nejčastěji používá materiál z oceli a niklu, méně používané jsou hliník a měď. V tabulce 4 jsou obecné parametry pro odporové bodové svařování.

Tabulka 4 Parametry odporového bodového svařování

Druh svařovacího materiálu	nelegované a legované oceli, hliník, měď, nikl a jejich slitiny
Rozsah svařovacích tloušťek	do 0,4 mm
Svařovací proud	$10^3 - 10^5$ A
Pracovní napětí	0,5 – 330 V
Druh svařovacího proudu	Stejnoseměrný (střídavý)
Svařovací čas	0,04 - 2 s
Svařovací tlak	15 – 200 MPa
Rychlost náběhu teplot	až 10^4 °C/s



Obrázek 5.2 Ilustrace odporového bodového svařování, a) schéma svařovacího systému b) svařování baterií [17]



Obrázek 5.3 Příklad bodové svářečky – LITH-HDP-3000 [18]

5.2 Ultrazvukové svařování

Spadá mezi tlakové metody svařování. Slovo „ultrazvuk“ se používá pro definování mechanicko-akustického vlnění s frekvencí nad 20 kHz, tato frekvence leží nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha. Svarový spoj vzniká v kombinaci s vysokofrekvenčním kmitáním (ultrazvuku) a současného působení tlaku. Pro výrobu akumulátorových baterií je to jedna z často používaných metod, u které je jedna z největších výhod kvalitní svaření široké škály kovů (Např. měď, nikl, hliník), tenkých kovových vrstev (filmů), ale i kombinací těchto materiálů. Nejčastějšími typy vytvářených svarů jsou svary bodové nebo švové. Přehled materiálů, které lze, či nelze svařovat, je vyobrazen na obrázku 5.5. [19]

	Copper alloys										Alumi. alloys			Nickel alloys		Silver alloys		Iron alloys		Others													
	Copper (Pure)	Brass	Brass Leaded	Bronze	Bronze Leaded	Be-Cu	Cu-Ni	Ni-Silver	#1000, #2000	#3000, #6000	#5000, #7000	Nickel (Pure)	Monel (Ni-Cu)	Ni-Fe(invarkovar)	Inconel	Silver (Pure)	Sterling Silver	Silver-Cd-Ox	Iron (Soft)	Steel	Cast Iron	S.S. (#300)	S.S. (#400)	Tantalum	Lithium	Lead	Gold	Titanium	Cobalt alloys	Zinc alloys	Tungsten alloys	Platinum alloys	
Copper alloys	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Aluminum alloys	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Nickel alloys	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Silver alloys	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Iron alloys	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Others	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

● Kvalitní spojení
 ▲ Možné spojení
 □ Nemožné nebo špatné spojení

Obrázek 5.4 Přehled materiálů pro ultrazvukové kovové svařování [20]

5.2.1 Princip ultrazvukového svařování kovových materiálů

Princip vzniku svarového spoje je vysokofrekvenční tření jednoho dílu o druhý. Svarový spoj vzniká po zahřátí, které je vyvolané třením, v bodě dotyku za současného působení tlaku. Ultrazvuk je akustický jev od 20 kHz, nižší frekvence je známa jako infrazvuk. Účinek ultrazvukové energie závisí na intenzitě (amplitudě výchylky), frekvencí kmitů a vlastnostech prostředí. Fyzikální podstata ultrazvukového vlnění a zvukového vlnění je stejná, ale fyzikální účinky na prostředí, ve kterém se šíří, jsou rozdílné. Charakteristickou veličinou každého vlnění je vlnová délka λ , kterou lze vypočítat prostřednictvím rovnice 5.2.

$$\lambda = v * T = \frac{v}{f} \quad (5.2)$$

Kde: λ je vlnová délka [m], T je perioda kmitů [s], f je frekvence kmitů [Hz] a v je fázová rychlost šíření vln [m/s]. Vlnová délka je vzdálenost, kterou urazí vlnění během jedné periody. Ultrazvuk má tuto délku velice krátkou (např. frekvenci 20 kHz odpovídá ve vzduchu vlnová délka přibližně 1,7 cm/s). Díky těmto vlastnostem je možné využít ultrazvuk v mnoha průmyslových odvětvích. Podle intenzity vlnění jsou dva typy ultrazvuku: pasivní (nedestruktivní – v lékařství znám jako zařízení sono, nebo ve strojním průmyslu jako defektoskop), druhé je aktivní ultrazvukové vlnění, důsledkem je změna fyzikálních i chemických vlastností prostředí (strojní průmysl – obrábění, svařování, čištění) [11; 21]

Nejčastějšími zdroji ultrazvuku jsou piezoelektrické nebo magnetostrikční měniče (konventory, transducery). Tato zařízení mění vysokou frekvenci elektrické energie na energii mechanických kmitů ultrazvukové frekvence. [19]

Magnetostrikční měnič

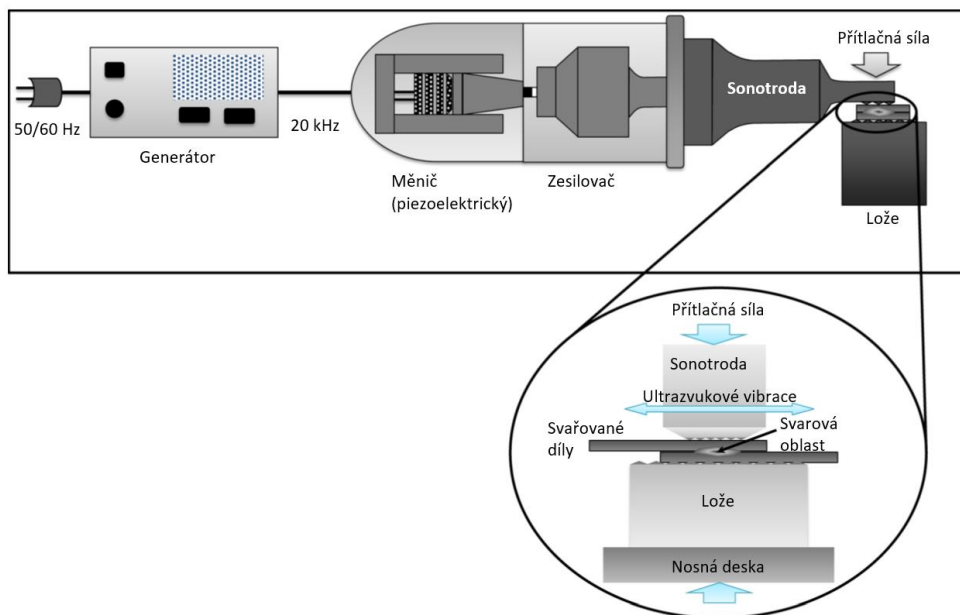
Pracuje na principu změny délek určitých materiálů (např: slitiny niklu) při vstupu do magnetického pole. Vlivem přívodu střídavého napětí do cívky, která je navinutá na duté tyči z niklu, vzniká magnetické pole, kvůli kterému dochází k cyklickým změnám délky tyče. Pokud je frekvence vibrací dostatečně vysoká, došlo ke vzniku ultrazvuku. Tento druh měniče se v dnešní době v ultrazvukovém svařování

už nepoužívá, vzhledem k nízké schopnosti elektro-akustického přenosu. Tento princip také vyžaduje chlazení kapalinou a je nákladný na provoz. [21; 22]

Piezoelektrický měnič

Při mechanické deformaci některých materiálů (krystalických látek) vzniká na jejich povrchu elektrický náboj, který má velikost přímo úměrnou deformaci. Pokud se k piezoelektrickému krystalu připojí elektrody, do kterých je přivedeno střídavé napětí, krystal se po průchodu elektrické energie začne deformovat, čímž se periodicky rozvibruje. Klasickým piezoelektrickým materiálem je křemen (SiO_2), který se používal v začátcích ultrazvukové techniky. Moderní piezoelektrický měnič se skládá ze dvou polykrystalických (keramických) prvků (zirkonát a titanát olova), které jsou vrstveny na sebe mezi měděnými pláty, jež je oddělují. Celkové zařízení je vystaveno velké upínací síle a dále je naladěno na určitou frekvenci. [19; 22]

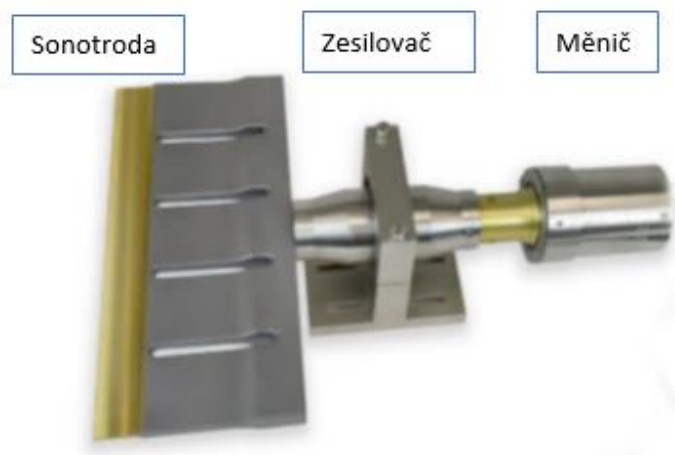
Ultrazvuková svářečka (viz obrázek 5.5) se skládá z několika podstatných součástí. Ze sítě je přivedena nízkofrekvenční elektrická energie (50–60 Hz) do generátoru. Zde se energie změní na vysokofrekvenční elektrickou energii (15–50 kHz). Takto vzniklá energie putuje do měniče (piezoelektrického), kde je transformována na vysokofrekvenční mechanickou energii. Následně zesilovač upraví amplitudu výkmitu potřebnou pro svaření. Posledním nástrojem je sonotroda, ta je mechanicky stlačena na svařovaný materiál, který je opřený o statický díl s názvem lože (kovadlina). Svarový spoj vzniká zahřátím dílů z důsledku tření a za současného působení tlaku na svařované díly. [17; 23]



Obrázek 5.5 Schéma ultrazvukového svařování [17]

Sonotroda a lože mají na styčných plochách se svařovanými díly vroubkování, které reprezentuje to, jak vypadá finální svar. Typickým vroubkováním je přímé rýhování, nebo kosoúhlé vroubkování. Materiály, ze kterých jsou vyrobeny sonotrody jsou různé, záleží na kompromisu mezi nastavením spojovaných součástí, konstrukcí součástí, materiálem součástí a jejich produkovaném množství. Pro větší sonotrody s menšími amplitudami a nižší produkcí se jedná o slitinu hliníku, pokud je ale sonotroda zatěžována pro sériovou výrobu, s vysokými amplitudami, je vyrobena z titanu.

Zesilovač (booster) slouží k úpravě amplitudy kmitů vycházejících z měniče pokračujících do sonotrody. Také funguje jako prvek pro uchycení ultrazvukové sestavy. Sestava jednotlivých zařízení, jak jsou propojeny, je vyobrazena na obrázku 5.6.



Obrázek 5.6 Sestava ultrazvukového nástroje [24]

5.2.2 Princip svařování elektrickým odporem

Svařování el. odporem představuje koordinované působení el. proudu a mechanického tlaku během určitého času. Svařované díly jsou k sobě přitlačeny pomocí vodivých elektrod, které do dílů přenášejí proud. Přejdem elektrického proudu ve stykové ploše do svařovaných materiálů vzniká teplo, protože zde působí silný elektrický odpor. V místě, kde působí největší odpor (největší teplo), dochází k natavení materiálů a spolu s působením mechanického tlaku tzv. vzniká svarová čočka, čímž se vytvoří bodový svarový spoj.

Množství tepla lze vyjádřit pomocí Joulova-Lenzova zákona:

$$Q = I^2 * R * t, \quad (5.1)$$

kde Q je množství tepla [J], R je odpor svarového spoje [Ω], I je svařovací proud [A], a t je doba působení svařovacího proudu [s]. Všechny tyto parametry jsou důležité pro nastavení svařování. Pokud se použije proud o malé intenzitě a dlouhém svařovacím času jedná se o tzv. **měkký svařovací režim**, jestliže se použije svařovací proud o velké intenzitě a krátkém svařovacím času jedná se o tzv. **tvrdý svařovací režim**. Hodnota přechodových odporů významně závisí na kvalitě povrchu a typu svařovaných materiálů, materiálu elektrod a na tlaku mezi elektrodami.

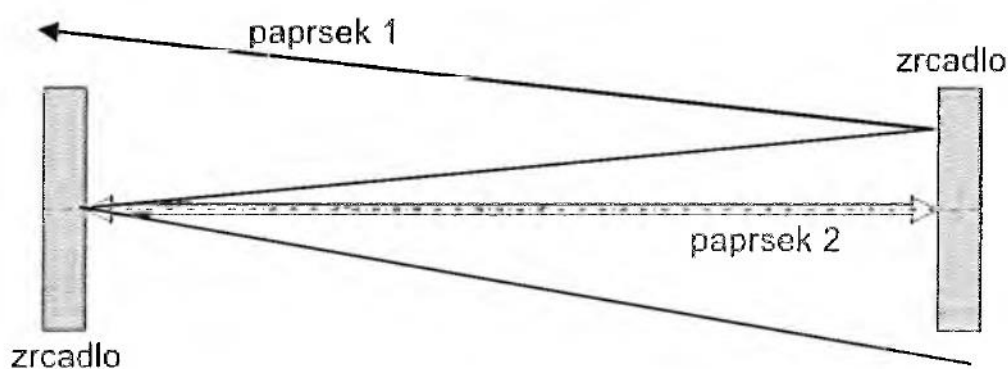
Způsoby odporového svařování: bodové svařování, švové svařování, výstupkové svařování, vysokofrekvenční svařování, stykové tlakové svařování, stykové odtavovací svařování. [11; 13; 14]

5.3 Laserové svařování

Jedná se o tavnou metodu bezkontaktního svařování, která využívá koncentrované energie laserového paprsku k natavení svařovaných materiálů. Slovo „laser“ je zkratka z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu značí princip vzniku laserového záření (zesílení světla stimulovanou emisí záření). [13]

5.3.1 Princip laseru

Laser je zdroj elektromagnetického záření, které má koherentní svazek, synchronizované vlny a úzkopásmový spektrální rozsah. Laserů je několik druhů. Historicky první laser byl vytvořen v roce 1950 a skládá se ze dvou základních částí: optického rezonátoru a aktivního prostředí. **Optický rezonátor** tvoří dvě rovinná navzájem rovnoběžná zrcadla, mezi kterými se odráží světelný paprsek. Na obrázku 5.7 jsou zobrazeny dva paprsky, paprsek 1 se odrazí mezi zrcadly a rezonátor opustí. Paprsek 2 se šíří rovnoběžně v optické ose mezi zrcadly, může zde kmitat „do nekonečna“.

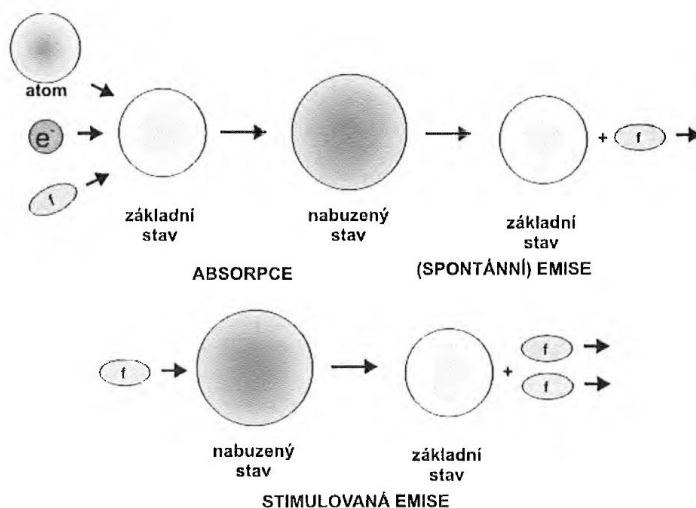


Obrázek 5.7 Optický rezonátor [14]

Aktivní prostředí zvyšuje intenzitu paprsku. Toto zintenzivnění závisí na typu aktivního prostředí a dochází k němu pouze na určité vlnové délce paprsku (barvě světla). Zesilovací efekt je možný díky jevu stimulované emise. Každá látka je schopna pohlcovat dopadající energii (záření, kinetickou energii částic). Běžně však dochází ke spontánní emisi tak, aby se základní látky vrátily na svou původní energetickou úroveň. Z kvantové mechaniky je známo, že hodnoty energie v částicích nemohou nabývat libovolných hodnot, ale pouze určitých energetických hladin. Emitovaná

energie je proto rovná rozdílu energií horní a spodní hladiny. V některých typech atomů nebo molekul existují energetické hladiny (zakázané hladiny), které dokážou absorbovanou energii jednoduše vyzářit návratem do základního stavu, a proto teoreticky bez vnějšího zásahu zůstanou v nabuzeném stavu nekonečně dlouho. Jev stimulované emise dokazuje, že návrat do klidového stavu je vyvolán blízkým průchodem kvanta záření (fotonu) kolem nabuzeného atomu (molekuly). Cílem tohoto fotonu je, aby jeho energie byla rovna rozdílu energií zakázané hladiny a základního stavu. Pokud je tento cíl splněn, dojde ke stimulované emisi, při které se vyzářená přebytečná energie ve formě fotonu rovná fotonu, který návrat do základního stavu spustil, jako je zobrazeno na obrázku 5.8. Na výše uvedeném principu funguje laser.

[14; 19]

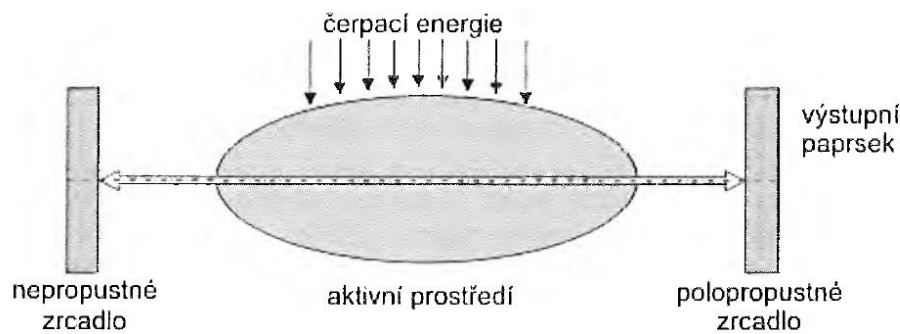


Obrázek 5.8 Výměny energie probíhající v atomech a molekulách [14]

V laseru se mezi zrcadla optického rezonátoru umístí některý z druhů aktivního prostředí. Pokud zesílení intenzity je vyšší než ztráty na zrcadlech, vznikne lavinovitý nárůst intenzity záření paprsku kmitajícím mezi zrcadly rezonátoru. Pokud je jedno ze zrcadel polopropustné, dochází k úniku v podobě úzkého, nerozbíhavého a monochromatického laserového paprsku. U laseru se také rozlišuje provoz, a to kontinuální nebo pulzní, záleží na způsobu použití.

Lasery se nejčastěji rozdělují podle typu aktivního prostředí na: plynové, kapalinové, pevnolátkové, polovodičové. Nebo dle typu buzení aktivního prostředí:

čerpání elektrickým výbojem, optické čerpání, čerpání chemickou reakcí. Princip fungování běžně používaného laseru popisuje obrázek 5.9. [14; 19]

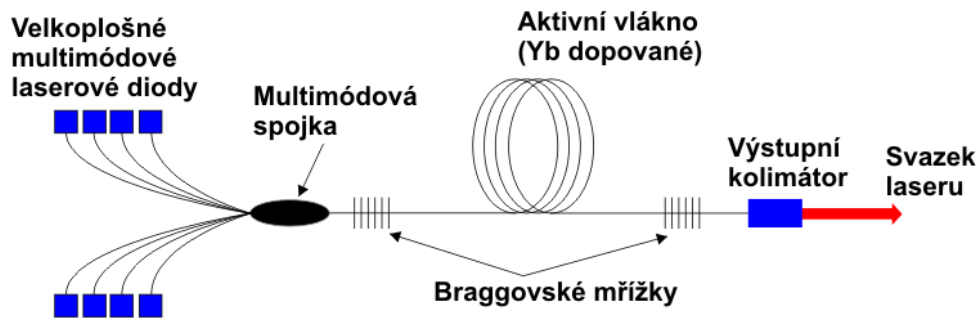


Obrázek 5.9 Princip laseru [14]

Výše popsaný princip se používá do laserových systémů, které mají velmi široké využití nejen v průmyslu, ale i v celé řadě dalších oborů (např. lékařství, potravinářství). Ve strojírenství mají lasery velkou škálu aplikací: svařování, popisování – značení a gravírování, tepelné dělení – řezání materiálu, tepelné zpracování, vrtání, čištění od koroze atd. Dále budou zmíněny pouze hlavní typy laserů, které se dnes používají zejména pro svařování materiálů.

5.3.2 Nejčastější typy laserů pro svařování

Vláknový (fiber) laser je technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru, aktivní prostředí tvoří dlouhé optické vlákno dopované ytterbiem. Buzení z laserových diod je vedeno přes optickou spojku do aktivního vlákna a namísto zrcadel jsou zde tzv. Braggovské mřížky, což jsou struktury vytvořené přímo na optickém vlákně. Vlákno je pak ukončeno optickým kolimátorem. (viz obrázek 5.10). Vláknové lasery se dělí na kontinuální, pulsní a kvazipulsní. Mezi jeho největší výhody patří: vysoká účinnost (30-35 %), jednoduchý princip, obrovská životnost, nízké náklady a téměř nulové nároky na údržbu. [25]



Obrázek 5.10 Schématické zobrazení vláknového laseru [25]

CO2 laser – plynový laser, buzený elektrickým výbojem.

Nd YAG laser – pevnolátkový laser, aktivním prostředím je válcová tyč Yttrium-hlinitého granátu, která je dopována ionty prvku Nd^{3+} , buzeno optickým zářením.

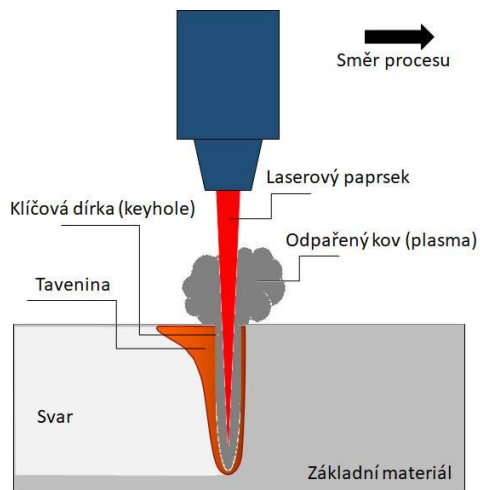
Polovodičový laser – pevnolátkový laser, buzený elektrickým proudem.

Diskový laser – obdobný princip jako u Nd:YAG laserů, ale aktivní prostředí je místo tyče tvořeno malým diskem (který je možno daleko lépe chladit).

5.3.3 Svařování laserem

V dnešní době se používají laserové svařovací zdroje na principu vláknového laseru, jelikož je jejich efektivita jedna z nejvyšších. Ty se pak dělí na zdroje kontinuální a pulzní. Poté záleží, jestli se používají manuálně nebo automatizovaně. Při svařování laserem záleží na mnoha parametrech, které se musí vhodně zkombinovat (výkon laseru, svařovací rychlost, potřebný čas samotného svařování) společně s vhodným tvarem svarového spoje, pro daný svařovaný materiál. Pro svařování laserem u větších tloušťek materiálů je typické, že vzniká svar metodou tzv. „keyhole“ (česky se někdy označuje jako metoda svařování průchozím paprskem, doslovný, někdy používaný překlad je „svařování na klíčovou díрку“). Bodově přehřátý materiál se okamžitě odpaří (až do elektricky vodivého plazmatu) a vzniká dutina naplněná parami odpařeného materiálu, jejíž stěny jsou tvořeny roztaveným materiálem. Roztavený materiál je vytlačován párou ven a vzniká úzký a hluboký otvor, který má tvar „klíčové dírky“ (viz obrázek 5.11). Roztavený kov proudí kolem dutiny, tuhne po stranách a vytváří se hluboký úzký svar. Hloubka svaru může být až desetkrát větší než šířka svaru. Do oblasti svaru se přivádí ochranná atmosféra pro zabránění oxidace a vzniku pórů ve

svaru. Volba ochranného plynu má také vliv na geometrii svaru (Ar, He apod.) Většinou se svařuje bez přídavných materiálů, ale dnes už lze využít i automaticky podávaný drátový přídavný materiál. Lasery umožňují velmi rychlý ohřev a svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí – jako jsou např. Cu, Ag, Al i materiály s vysokou teplotou tavení, např. W, Mo, Ta, Zr, Ti atd. Laserové svařování lze využít pro všechny typy svarů. Jednou z hlavních výhod laserového svařování je vytváření spojů přeplátováním, kdy je možno svařit i několik materiálů navrstvených na sebe. Navíc vhodnou regulací výkonu se nemusí spodní vrstva zcela provařit a spodní strana je pak neporušená svarem. Jedinou podmínkou je dokonalé přitlačení materiálů navzájem a dostatečný výkon laseru. [14; 26]



Obrázek 5.11 „Hluboké“ svařování laserem [26]

5.3.4 Aplikace laserového svařování v elektromobilitě

Laserové svařování má v elektromobilitě široké uplatnění. Při výrobě bateriových článků se jedná o: svařování přípojníc, svařování bateriových fólií, svařování vývodů sáčkových článků, svařování senzorů stavu nabíjení, svařování kombinovaných Cu-Al spojů.

Pulzní vláknové lasery se při svařování bateriových článků používají čím dál častěji (viz obrázek 5.12), na rozdíl od kontinuálních jsou schopny svařovat heterogenní, tedy rozdílné, kovové materiály jako jsou např. Ni + Al nebo Cu + Al. Při svařování heterogenních materiálů kontinuálními lasery vznikají v místě spojení vrstev oblasti s intermetalickými fázemi, které snižují pevnost svaru. I z toho důvodu je v tomto případě použití pulzních laserů vhodnější. Samozřejmě stejně jako v případě

jakéhokoli jiného svařování je zapotřebí dodržet dobrý termický kontakt svařovaných vrstev, většinou podpořený vhodným přitlačným mechanismem. Bezpečnost práce s laserovými zdroji při svařování musí být dodržována na základě normy ČSN EN 60825-1. [5; 27]



Obrázek 5.12 Svařování niklových pásků k bateriovým cylindrickým článkům [27]

5.4 Mikro TIG svařování

Tato metoda je též známá pod názvem pulzní obloukové svařování. Patří mezi tavné metody svařování, při svařování se obvykle nepoužívá přídavný materiál.

5.4.1 Princip svařování metodou mikro TIG

Princip svařování je obdobný jako u běžného obloukového svařování netavicí se elektrodou v inertním plynu. Rozdíl je ale v impulsu oblouku (má velmi krátkou dobu trvání, v řádu desítek milisekund), v parametrech při svařování (velmi nízké hodnoty), také v pulzu (střídavě se aplikuje vysoký a nízký proud), takže tepelný příkon je mnohem menší než u konvenčního svařování. Výhodou je, že lze svařovat kovy s vysokou tepelnou vodivostí i tenčí kovy, aniž by došlo k jejich spálení (měď, hliník, nikl). [28]

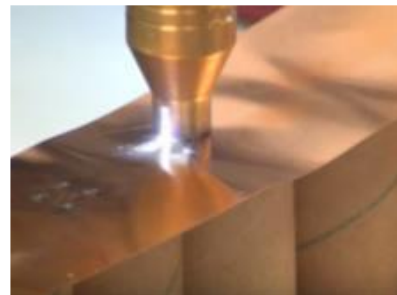
5.4.2 Svařování bateriových článků metodou mikro TIG

I při výrazně sníženém tepelném příkonu je však stále klíčové kontrolovat parametry svařování, aby nedošlo k přehřátí baterie. Mikro TIG je vhodný pro svařování niklových, měděných nebo ocelových propojek k bateriovým cylindrickým článkům.

Pro svařování bateriových článků se používá např. zařízení Amada Micro Arc Welding Torch se speciálním hořákem. Jedná se o ruční bezkontaktní svařování (viz obrázek 5.13). Detail svařování je vidět na obrázku 5.14. [12; 29]



Obrázek 5.13 AMADA Micro Arc Welding Torch – ruční svařovací zařízení, hořák na použití svařování bateriových článků [29]



Obrázek 5.14 Aplikace svařování metodou mikro TIG

5.5 Pájení

Pro spojování článků pro monoposty Formula Student je tato metoda pravidly zakázaná. Proto této metodě nebyla v DP věnována pozornost.

6 Nedestruktivní kontrola svarových spojů bateriových článků

Mezi základní nedestruktivní (NDT – Non destructive testing) metody kontroly svarových spojů, kterými lze indikovat vady typu necelistvostí, patří vizuální kontrola a kapilární zkouška. Tyto zkoušky byly proto aplikovány na realizované svarové spoje vyrobené při experimentech v rámci řešení DP a jsou podrobněji popsány v kapitolách níže.

6.1 Vizuální zkouška (VT – visual test)

Vizuální kontrola je jednou z nejjednodušších, nejlevnějších a nejčastěji využívaných metod nedestruktivní kontroly kvality svarových spojů. Slouží k detekci povrchových vad, které jsou viditelné lidským okem. Při tzv. všeobecné kontrole se zkoumá, zda svarové spoje odpovídají výkresové dokumentaci, tzn. dodržení počtu svarů, jejich umístění a tvar. Dále se provádí místní kontrola, kde je detailně hodnocena kvalita spoje a je prováděno měření vnějších rozměrů a přípustnost nalezených vad.

VT by měla být prováděna vždy jako první metoda kontroly, protože při odhalení jakékoliv nepřipustné povrchové vady není nutné dále vzorek podrobovat dalšímu testování, čímž jsou snižovány náklady na kontrolu.

Provádění zkoušky pro kontrolu svarových spojů popisuje norma ČSN EN ISO 17 637 – Nedestruktivní zkoušení svaru.

Vizuální kontrola se obvykle provádí jako místní kontrola, při níž se povrch kontroluje lidským okem ze vzdáleností menší než 600 mm a pod úhlem 30° a větším. Dále je nutné, aby kontrolované plochy byly dostatečně osvětleny světelným zdrojem s minimální intenzitou osvětlení 500 luxů. Přípustnost vad je poté hodnocena podle příslušného stupně kvality svaru (B, C, D) a normy ČSN EN ISO 13919–1. [30; 31]

6.2 Kapilární zkouška (PT – penetrant test)

Kapilární zkouška obecně využívá specifických vlastností některých kapalin (detekčních tekutin), které jsou označovány jako tzv. penetranty. Přesněji využívá jejich smáčivost, vzlínavost, barevnost, příp. fosforeskující schopnost. Pomocí těchto kapalin jsou zjišťovány necelistvosti svarového spoje, v podobě povrchových vad, spojitých s povrchem. Výhodou PT je její jednoduchost, ekonomická nenáročnost a vysoká univerzálnost použití.

Během zkoušky je nejprve zkoumaný povrch řádně očištěn a poté je na něj nanesena detekční kapalina (penetrant) tak, aby vnikala do povrchových necelistvostí. Dále je přebytek penetrantu z povrchu odstraněn. Jeho zbytky v povrchových vadách následně vzlínají působením vývojky, která je taktéž nanesena na povrch zkoušené součásti a díky kontrastnímu zbarvení vývojky (bílá barva) vůči penetrantu (obvykle jasně červená barva) je možné detektovat tzv. indikace vad. Tyto vady se poté hodnotí vizuálně. Podle metody indikace je možné kapilární metodu rozdělit na:

- metodu barevné indikace – indikace vady se projeví vznikem kontrastní barevné indikace (tzn. penetrant obsahuje barvivo a ke zviditelnění indikací se používá vývojka – vyhodnocení se provádí ve viditelném spektru záření),
- metodu fluorescenční – indikace vady se projeví při ozáření ultrafialovým světlem (tzn. penetrant obsahuje fluorescenční látku a ke zviditelnění se

nepoužívá vývojka, ale ozáření UV záření, při minimální intenzitě osvětlení viditelným zářením),

- metodu dvouúčelovou – indikace vady se projeví barevnou nebo fluorescenční indikací v závislosti na použitém světle (tzn. penetrant obsahuje barvivo i fluorescenční látku).

Obecné zásady provádění PT jsou popsány v normě ČSN EN ISO 3452-1 nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady. Podle normy ČSN EN ISO 23 277 se pak vyhodnocuje přípustnost nalezených indikací vad. Indikace mohou být lineární a nelineární. [30; 31]

6.3 Měření přechodového elektrického odporu svarového spoje

Další nedestruktivní zkouška, která byla použita, se standardně pro zkoušení svarových spojů nepoužívá. Nicméně v rámci diplomové práce, kdy hlavním úkolem svarového spoje je propojit bateriové články a vést elektrickou energii, bylo nutné změřit elektrický přechodový odpor spojů vyrobených různými metodami svařování.

Pro svarové spoje bateriových článků je důležité, aby spoje měly co nejnižší el. přechodový odpor. Při měření se setkáváme s odpory v rámci desítek mΩ, proto se zde využívá metoda měření malých odporů čtyřsvorkovou metodou, která je velmi přesná a eliminuje většinu odchylek, které by mohly ovlivnit výsledek měření.

Elektrický odpor vyjadřuje Ohmův zákon (viz rovnice 6.3).

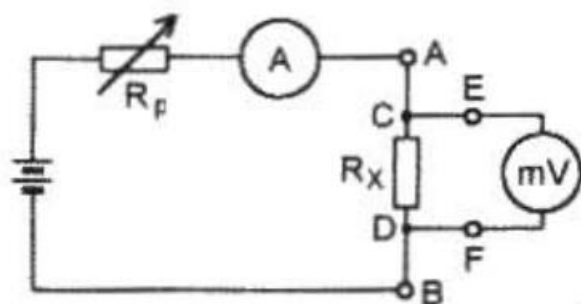
$$R = \frac{U}{I} \quad (6.3)$$

Kde: R je odpor [Ω], U je úbytek napětí na měřeném odporu [V], I je proud protékající měřeným odporem [A].

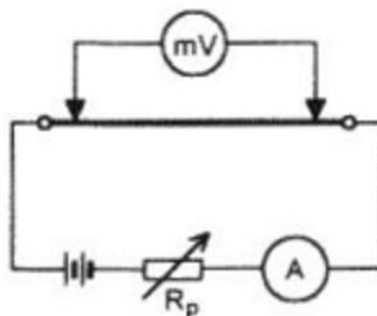
Pro měření malých el. odporů se používá připojení rezistoru pomocí čtyřsvorkového zapojení a taková metoda měření, která eliminuje vliv přechodových odporů svorek a vliv odporu přívodů. Při čtyřsvorkovém zapojení je odpor měřen voltmetrem (mV) a ampérmetrem (A), dle zobrazení na obrázku 6.1. Ze zapojení je

patrné, že úbytek napětí na proudových svorkách A a B není měřen připojeným milivoltmetrem (mV), nepřičítá se k úbytku napětí na měřeném rezistoru. Měření odpor je definován mezi svorkami C a D. Napěťové svorky E a F jsou v sérii s milivoltmetrem a jejich přechodový odpor lze vůči vstupnímu odporu milivoltmetru většinou zanedbat. Na obrázku 6.2 je zobrazeno praktické využití čtyřsvorkové metody při měření měrného odporu vodiče (obdobné použití u svarového spoje). Délka vodiče, která odpovídá měřenému odporu, je definována vzdáleností mezi hroty přívodů k milivoltmetru.

Dalším rušivým vlivem, který se při měření může uplatnit, je vliv termoelektrických napětí. Tím, že úbytek napětí je na malém odporu také malý, mohou termoelektrická napětí ovlivnit výsledek měření. Tento vliv je možné eliminovat dvojitým měřením při komutaci proudu, kdy úbytek napětí na odporu bude mít opačnou polaritu, zatímco polarita termoelektrických napětí na směru proudu prakticky nezávisí. [32]



Obrázek 6.1 Čtyřsvorkové zapojení pro měření malých odporů [32]



Obrázek 6.2 Měření odporu vodičů [32]

7 Destruktivní kontrola svarových spojů bateriových článků

Komplexní otestování svarového spoje se neobejde bez destruktivních zkoušek, které prověří nejen mechanické vlastnosti, ale i strukturu a tvrdost svarového spoje. Tyto vlastnosti se ověří pomocí následujících typů zkoušek:

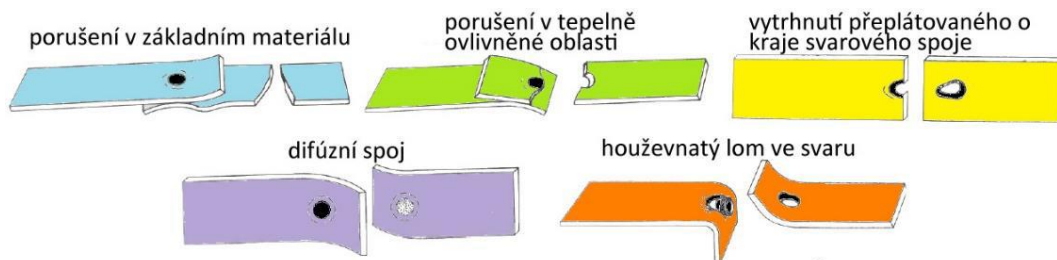
- příčná zkouška tahem (ČSN EN ISO 4136),
- zkouška ohybem lámavosti (ČSN EN ISO 5173),
- zkouška rázem v ohybu (ČSN EN ISO 9016),
- zkouška rozlomením (ČSN EN ISO 9017),
- zkouška tvrdosti (ČSN EN ISO 9015-2),
- zkouška mikro a makro struktury (ČSN EN ISO 17 639).

V rámci diplomové práce budou níže popsány pouze zkoušky, které byly vybrány a použity v experimentální části.

7.1 Statická zkouška stříhem

Mechanické (pevnostní) vlastnosti se nejčastěji posuzují na základě příčné zkoušky tahem. Nicméně pro realizovaný případ spoje nelze tahovou zkoušku použít, proto byla zvolena zkouška stříhem. Cílem zkoušky je prověření, jak velkou střížnou sílu dokáže svarový spoj vydržet do porušení. Statická zkouška stříhem se provádí dle normy ČSN EN ISO 14 273 - která popisuje rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů.

Výstupem statické zkoušky stříhem je maximální síla (F_{\max}) potřebná pro ustřížení svaru, typ porušení. Všechny maximální síly F_{\max} by měly vyhovět podmínce $F_{\max} \geq F_{\min}$. Typy porušení jsou ukázány na obrázku 7.1. [33]



Obrázek 7.1 Typy porušení vzorků při stříhové zkoušce [33]

7.2 Metalografická zkouška – analýza makro a mikro struktury svarů

Metalografická analýza je základní metodou zkoumání struktury kovů. Vzorky jsou při této metodě pozorovány pomocí světelného mikroskopu. Díky této zkoušce lze posoudit například jakost výroby materiálu, vhodnost jeho použití a lze díky ní i hodnotit svarové spoje nebo měřit tloušťky povlaků.

Pro metalografickou zkoušku je nutné připravit výbrus z materiálu, který bude následně zkoumán mikroskopem.

Příprava výbrusů

Příprava výbrusu pro metalografickou zkoušku se skládá z několika kroků. Prvotně je nutné odebrat vzorky materiálu a to tak, aby nedošlo k deformaci jejich povrchu nebo svarového spoje, k tepelnému ovlivnění struktury. [34]

Dále je vzorek zalit do epoxidové pryskyřice nebo zalisován za tepla do fenolické pryskyřice. Takto se upravují pouze materiály menších tlouštěk a rozměrů, větší vzorky jsou po odebrání hned broušeny a dále upravovány. Po zalití vzorků následuje jejich broušení bruskou nebo brusnými papíry od nejhrubších po nejjemnější. Vzorky je možné brousit několika metodami, a to buď automatizovaně nebo ručně. Nejčastěji se však používá broušení za mokra, během kterého vzorek zůstává ve stejné poloze, pootáčí se pouze o 90° při přechodu na jemnější brusivo. Poté jsou vzorky leštěny, aby byly odstraněny veškeré rýhy, za pomoci leštící emulze. Leštění je prováděno ve většině případů mechanicky, ale lze i elektrolyticky. [34]

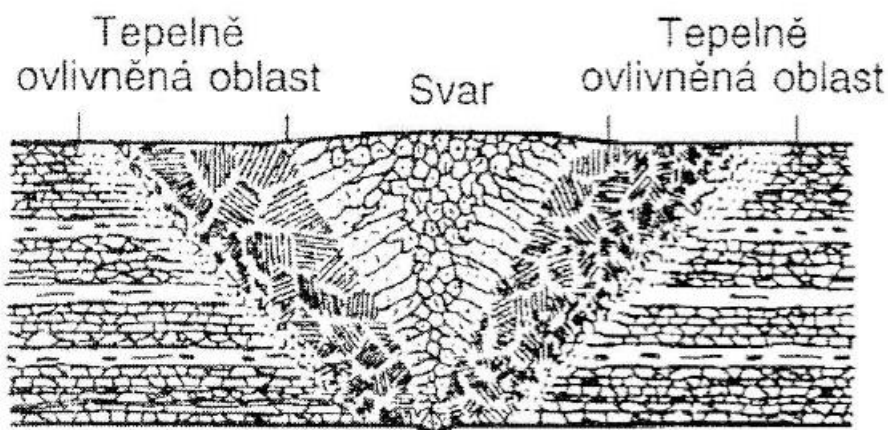
Takto upravené vzorky jsou leptány v misce s leptadlem. Leptat je možné chemicky, elektrolyticky nebo tepelně. Výběr leptadla závisí na zkoumaném materiálu.

Nakonec se vzorek opláchne destilovanou vodou a lihem a osuší se teplým proudem vzduchu. Takto opracovaný výbrus je připraven na práci s mikroskopem. [34]

Makroskopická a mikroskopická kontrola

Metalografickou zkoušku lze rozdělit na makroskopickou a mikroskopickou kontrolu. Při makroskopické kontrole jsou vzorky pozorovány ve skutečné velikosti nebo při malém zvětšení. Makroskopicky je možné hodnotit svarový spoj nebo zkoumat způsob kladení jednotlivých svarových vrstev a velikost jednotlivých oblastí spoje. Naopak mikroskopickým zkoumáním je možné pozorovat jednotlivá zrna materiálu a jejich hranice nebo strukturní složky (fáze) materiálu svaru. Zkušební vzorky svarových spojů jsou obvykle zkoumány na příčném řezu. [35; 34]

Při hodnocení vlastností svarových spojů sledujeme hlavně ovlivněné oblasti a vnitřní vady svarových spojů. Podle velikosti zrn a struktury materiálu lze pozorovat oblasti svaru: svarový kořen, hranice závaru, tepelně ovlivněná oblast (viz obrázek 7.2). Také jsou zde zviditelněny vnitřní vady, jako například trhliny, dutiny, pevné městky, studené spoje a neprůvary, vady tvaru a rozměru. [15]



Obrázek 7.2 Svar a tepelně ovlivněné oblasti [15]

7.3 Měření mikrotvrlosti svarových spojů

Tvrlost je mechanická vlastnost, která je definovaná jako odpor, který klade materiál vůči vnikání jiného tělesa. Výhodou zkoušek tvrdosti je jejich rychlost a ekonomická nenáročnost. Tvrlost je možné zkoušet různými metodami, které se dělí podle:

- principu (vnikací, vrypové, odrazové a kyvadlové),
- rychlosti zatěžující síly (statické a dynamické),
- velikosti zatěžující síly (0,1 N až 500 N) a účelu měření:
 - zkoušky makrotvrlosti,
 - zkoušky mikrotvrlosti,
 - nanotvrlost. [34]

Tvrlost svarových spojů se měří jako průběh tvrdosti (linie) příčným řezem svarového spoje (pro zkoušku tvrdosti lze proto s výhodou využít vzorek z metalografické zkoušky). V každé oblasti svarového spoje se provedou dle normy ČSN EN ISO 9015-2 minimálně 3 vpichy (tzn. v ZM, TOO, SK). [14]

Materiál v předložené práci je velice měkký a tenký (0,2 mm), z tohoto důvodu bylo nutné použít malé zatížení při vlastní zkoušce, proto byla použita zkouška mikrotvrlosti. Ta je nejčastěji měřena na principu zkoušky podle Vickerse. [35]

7.3.1 Zkouška mikrotvrlosti svarových spojů

Základní požadavky pro zkoušky mikrotvrlosti jsou upraveny normou ČSN EN ISO 6507-1, 2, 3- Zkoušení tvrdosti podle Vickerse. Měření v rámci DP bylo dále provedeno v souladu s normou pro měření mikrotvrlosti svarových spojů – ČSN EN ISO 9015-2.

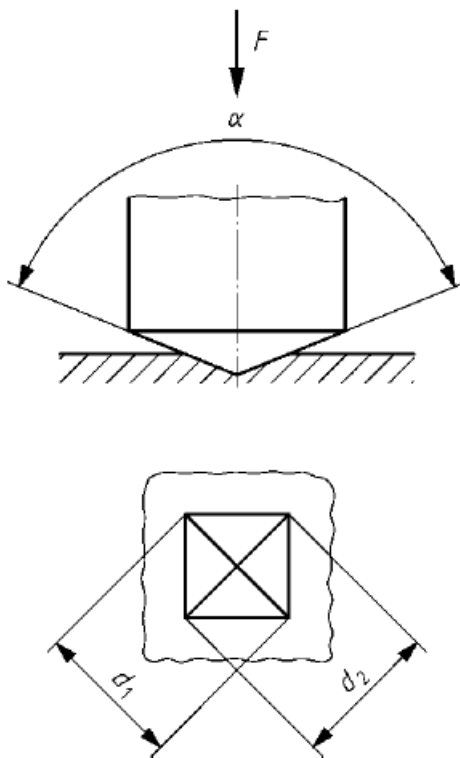
Tvrlost svarů je měřena metodou podle Vickerse. Princip této zkoušky spočívá ve vtlačování diamantového čtyřbokého pravidelného jehlanu do povrchu materiálu zkušební zatížením F (viz tabulka 5). Vrcholové strany jehlanu svírají úhel α , který má nominálně 136°. Po odlehčení jehlanu jsou změřeny délky úhlopříček vpichu d_1 a d_2 (viz obrázek 7.3). a vypočten jejich aritmetický průměr d . Při měření průběhu tvrdosti svarovým spojem musí být vzdálenost mezi středy jednotlivých vpichů alespoň

1,5 * d. Úhlopříčky se měří s přesností $\pm 0,001$ mm. Doba zatížení plného vzorku je 10 až 15 s. [36]

Tvrdość podle Vickerse je vyjádřena vzorcem (7.1).

$$HV = 0,1891 * \frac{F}{d^2} \quad (7.1)$$

Kde F je zkušební zatížení [N], d je aritmetický průměr délek úhlopříček [mm]. [36]



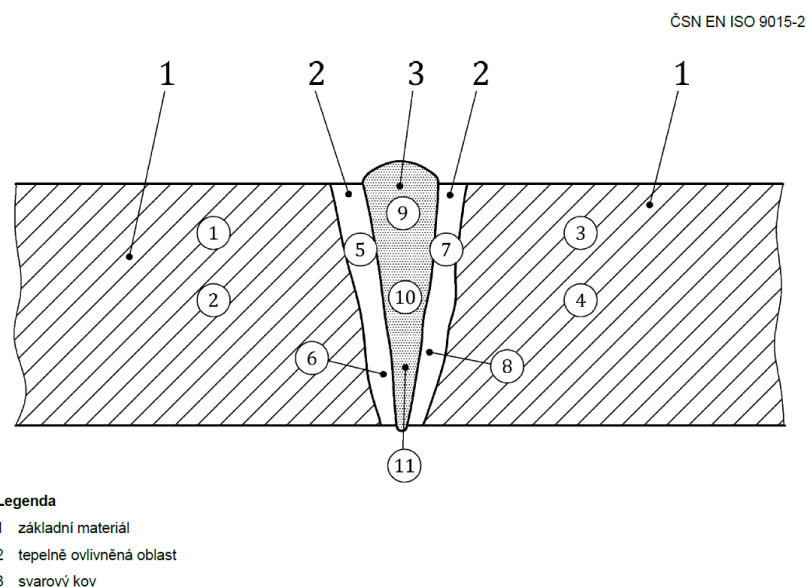
Obrázek 7.3 Princip zkoušky, geometrie vnikacího tělesa a vpichu podle Vickerse

Tabulka 5 Rozsahy zkušebního zatížení [36]

Rozsahy zkušebního zatížení F [N]	Značka tvrdosti	Název
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti podle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	$HV 0,2$ až $< HV 5$	Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	$HV 0,01$ až $< HV 0,2$	Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse

7.3.2 Umístění vpichů pro zkoušku tvrdosti svarových spojů

Pro měření tvrdoměrem/mikrotvrdoměrem je důležité vybrat správné umístění vpichů (viz obrázek 7.2). Nejčastěji se měří tvrdosti svarového spoje ve všech ovlivněných oblastech svaru: svarový kov, hranice závaru, tepelně ovlivněná oblast. Pro výzkum je nutné mít vstupní hodnotu pro porovnání, ta se zjistí změřením neovlivněné oblasti základního materiálu dál od svaru. Poté se porovnává větší/menší tvrdost, podle této hodnoty se vyhodnocuje míra ovlivnění konkrétní oblasti, případně se mohou predikovat vady, resp. pevnostní změny. [37]



Obrázek 7.4 Příklad ukazující oblasti vpichů, čísla v kroužcích se odvolávají na umístění vpichů [37]

Experimentální část

8 Konstrukce akumulátorové baterie

Hlavním cílem diplomové práce je otestovat svarový spoj, který je aplikovatelný do akumulátorové baterie ve vozidle Formula Student. Inspirací pro práci byla akumulátorová baterie, která byla vyrobena do desáté generace pilotované elektrické studentské formule týmu eForce (viz obrázek 8.2). Pro kompletaci akumulátoru byly zvoleny sáčkové články značky Melasta, které byly spojeny ultrazvukovým svařováním (z důvodu dostupnosti). Veškeré parametry akumulátorové baterie shrnuje tabulka 6.

Tabulka 6 Specifikace článku a akumulátoru monopostu FSE.X [3; 38]

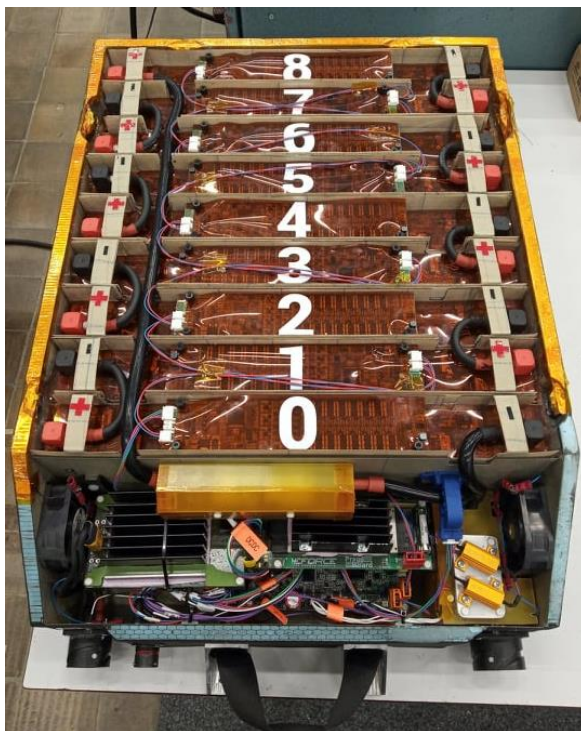
Parametry použitého článku	
Označení	Melasta SLPBA942126
Nominální kapacita	7 Ah
Maximální/nominální/minimální napětí	4,2 V/3,7 V/3,0 V
Energie	202 Wh/kg
Vnitřní odpor článku	1.3 mΩ
Parametry akumulátorové baterie	
Elektrická konfigurace zapojení článků	144s2p (288 kusů)
Počet stacků (el. zapojení článků)	9 (16s2p)
Celková energie	7,45kWh
Maximální/nominální/minimální napětí	600 V/532 V/432 V
Celková hmotnost	46 kg

Hlavním nosným prvkem je kompozitní box sendvičové struktury, vyrobený z kombinace uhlíkových vláken, skelných vláken a nomexové voštiny jako jádro mezi potahy. Tyto materiály jsou nehořlavé, aby splňovaly nároky dané pravidly. Do této nosné konstrukce se vkládají jednotlivé moduly (stacky), které jsou ohraničené kompozitními přepážkami. [39]

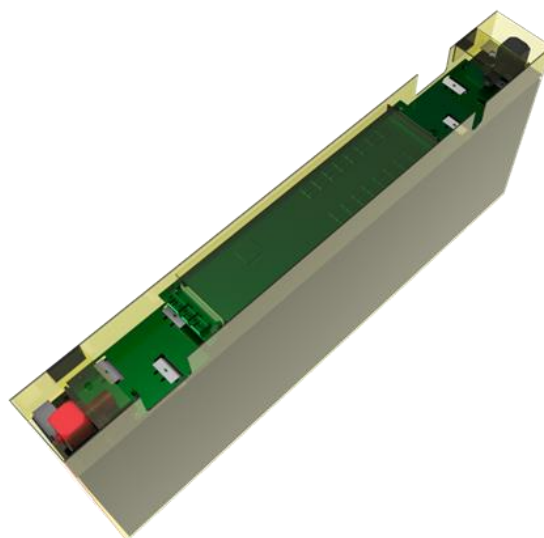
Dohromady je v akumulátoru 9 modulů, které jsou mezi sebou zapojeny sériově. Jeden modul obsahuje 32 článků. Spojení bateriových článků je realizováno bez přídavného materiálu, vývody článků jsou svařeny přímo k sobě navzájem. To, jak přesně jsou články svařeny, určuje elektrická konfigurace zapojení. V tomto případě se jedná o konfiguraci 16s2p tzn. základní jednotkou jsou 2 dvojice článků, které jsou

k sobě svařeny paralelně. Takto vzniklé čtveřice jsou mezi sebou svařeny sériově a dohromady čítají 32 článků. V rámci modulu jsou dvě BMS desky. Jedna je měřicí a je připojena přímo na vývody z článků a obsahuje senzory, které měří teploty a napětí článků. Druhá BMS deska je řídicí a je konektorem propojena na měřicí. BMS řídicí desky jsou navzájem propojeny kabelem vedeným do řídicí jednotky celého akumulátoru. Model kompletního modulu je vyobrazen na obrázku 8.2. [38]

V přední části akumulátoru je umístěna veškerá řídicí elektronika. Rozmístění všech komponent vyobrazuje obrázek 8.1.



Obrázek 8.1 Fotografie akumulátorové baterie monopostu FSE.X



Obrázek 8.2 Model jednotlivého stacku s BMS deskami

9 Základní materiál

Základním svařovaným materiálem jsou vývody z bateriového sáčkového článku viz obrázek 9.1. Z technického listu od výrobce článku Melasta je známo, že materiál se skládá z poniklované mědi o tloušťce 0,2 mm. Pro ověření typu materiálu a efektivnější nastavení svařovacích metod bylo nutné provést metalografickou a spektrální analýzu tohoto materiálu.



Obrázek 9.1 Bateriový článek Melasta SLPBA9421

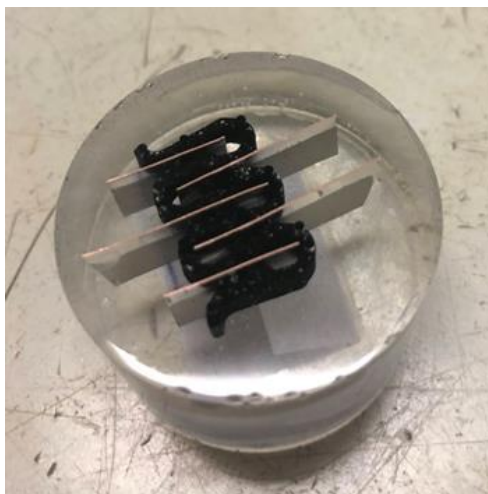
9.1 Metalografická zkouška – analýza mikrostruktury

Materiál byl zkoumán v metalografické laboratoři na Ústavu materiálového inženýrství. Zde byla sledována mikrostruktura základního materiálu. Nejprve bylo nutné zafixovat vzorky pro následnou lepší manipulaci. Jelikož základní materiál je měkký, nebylo možné vzorky vyrobit klasickou metodou lisováním za tepla. Vzorky proto byly zality epoxidovou pryskyřicí Struers EpoFix Kit do tvaru válce.

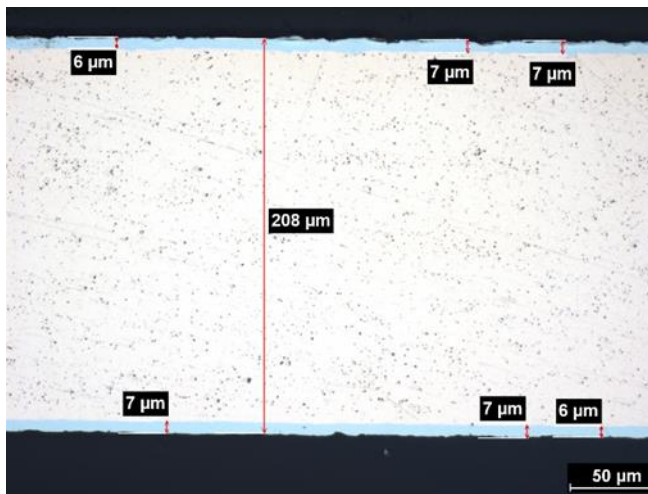
Tento vzorek (viz obrázek 9.2) byl postupně opracován broušením a leštěním na automatické brusce/leštičce Struers Tegramin 30. Broušení bylo prováděno na brusných papírech SiC za mokra. Byly použity papíry o drsnosti v rozmezí 180 až 2000. Pro následné leštění byla nejdříve použita diamantová suspenze a poté křemíková emulze SiC.

Na následné leptání byl použit chlorid železitý. Cílem je dokonalý povrch zkoumané plochy, aby nebyly vidět žádné rýhy.

Na závěr byl vzorek pozorován pomocí světelného metalografického mikroskopu Neophot 32 vybaveného CCD kamerou (viz obrázek 9.4). Pomocí mikroskopu bylo možné změřit tloušťky jednotlivých plechů i povrchových vrstev základních materiálů (viz obrázek 9.3). Na obrázku č. 9.3 jsou označeny potřebné tloušťky. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 8 v kapitole 9.3. [40; 41]



Obrázek 9.2 Připravený výbrus na měření mikroskopem



Obrázek 9.3 Hodnoty naměřené pomocí mikroskopu



Obrázek 9.4 Pracoviště pro měření mikroskopem na UMI

9.2 Spektrální analýza – měření chemického složení

Dalším experimentem byla spektrální analýza základního materiálu, díky které byl ověřen použitý základní materiál a určeno přesné chemické složení materiálu.

Pro rychlou orientační kontrolu chemického složení byl nejprve použit přenosný ruční RTG spektrometr (spektrální analyzátor) kovových materiálů DELTA Professional (viz obrázek 9.5). Jedná se o relativně přesnou a rychlou nedestruktivní chemickou analýzu kovových a nekovových materiálů, s možností okamžitého ověření jakosti a dodržení norem materiálů se zohledněním stopových prvků. Výhodou je napájení z baterie a relativně jednoduchá obsluha zařízení. Pomocí přenosného spektrometru DELTA byly naměřeny hodnoty v tabulce 7. Tyto výsledky jsou zkreslené, protože měření bylo provedeno z povrchu vzorku materiálu bez odstranění povrchové vrstvy. [42]



Obrázek 9.5 Ruční RTG spektrometr [42]

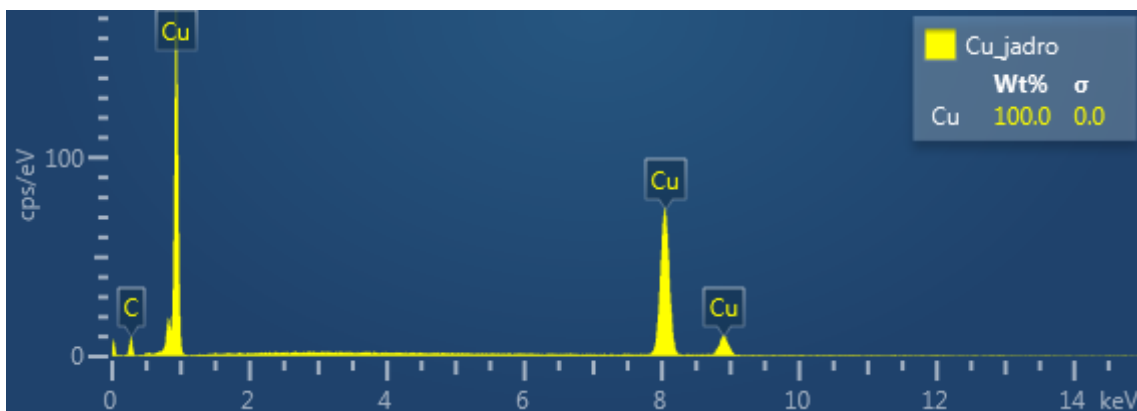
Tabulka 7 Zkreslené hodnoty z měření ručního spektrometru

Prvek	Obsah v %
Al	0,36 ± 0,07
Si	0,54 ± 0,02
P	0,016 ± 0,005
Ni	12,95 ± 0,05
Cu	86,12 ± 0,08

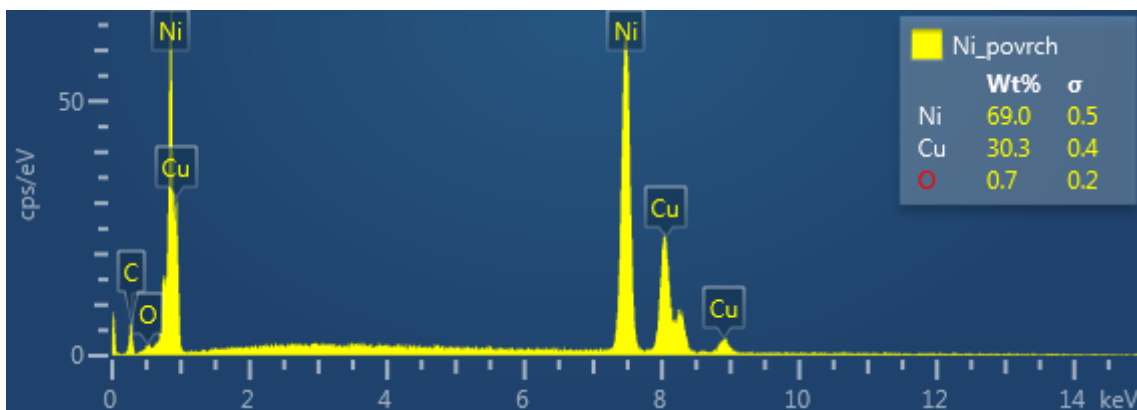
Přesné měření chemického složení by po odbroušení povrchové vrstvy bylo standardně provedeno na stolním jiskrovém optickém emisním spektrometru Q4 Tasman od firmy Bruker. Toto měření ale nebylo možné realizovat, protože vzorek materiálu měl příliš malou tloušťku (0,2 mm).

Kvůli zkresleným výsledkům bylo tedy nutné provést spektrální analýzu chemického složení v laboratorních podmínkách. Byl použit elektronový mikroskop MIRA3 Tescan na Technické fakultě České zemědělské univerzity v Praze. Na měření chemického složení byla použita EDX analýza (Energy Dispersive X-ray Analysis).

Jedná se o metodu, kdy při ozáření materiálu elektrony vzniká též rentgenové záření. To je vyvoláno vzájemným působením elektronů a materiálu. Rentgenové záření dosahuje pro každý prvek jisté specifické energie. Ta je využita pro identifikaci prvků obsažených ve vzorku. Charakteristické rentgenové záření prvků vzniká, když jsou zásahem primárních elektronů vyraženy jednotlivé elektrony vnitřních slupek atomu. Ty jsou nahrazeny elektrony z vyšších energetických hladin a rozdílová energie je ve formě záření. Tato energie je charakteristická pro každý jednotlivý prvek. Energetické spektrum jednotlivých prvků v základním materiálu je pro měď zaznamenané v grafu na obrázku 9.6. Pro niklovou vrstvu povrchové úpravy základního materiálu je zaznamenáno v grafu na obrázku 9.7. [33]



Obrázek 9.6 Měď spektrum



Obrázek 9.7 Nikl spektrum

9.3 Výsledky analýzy základního materiálu

Výsledné hodnoty z analýzy jsou zaznamenány v tabulce 8. Díky naměřeným hodnotám bylo jednodušší predikovat hodnoty na nastavení technologií použitých metod svařování.

Tabulka 8 Výsledné hodnoty z analýzy základních materiálů

Naměřené hodnoty základního materiálu	
Celková tloušťka svařovaného dílu	0,208 mm
Tloušťka povrchové niklové vrstvy	2 x 0,007 mm
Tloušťka ZM (mědi)	0,194 mm
Cu jádro – chemické složení	100 %
Ni povrch – chemické složení	Ni 69 %; Cu 30,3 %; O 0,7 %

10 Konstrukce vzorků, podmínky svarového spoje

Důležitou součástí výzkumu diplomové práce je porovnání vlastností svarového spoje, vytvořeného vybranými metodami svařování. Zkoumaný svarový spoj vychází z propojení vývodů 4 článků (viz obrázek 10.1). Pro účely porovnání vybraných metod byl svařován pouze základní materiál nikoli celý článek, protože by se výzkum několikanásobně prodražil. Na konečné výsledky experimentu to však nebude mít žádný vliv. Základní materiál byl zprostředkován od výrobce článků Melasta ve formě svitku o stejné šířce a tloušťce jako mají reálné vývody z bateriových článků, tedy pásek o šířce 15 mm, tloušťce 0,2 mm a délce cca 2,5 m – viz obrázek 10.3.



Obrázek 10.1 Propojení 4 plechů ultrazvukový svarem

Tvar vzorku byl ovlivněn několika faktory:

1. Elektrická konfigurace zapojení sáčkových článků.
2. Minimální rozměr pro kvalitní otestování všemi zvolenými zkouškami.
3. Samotné nároky pro svařování – závisí na technologii svařování.

Rozměr finálního vzorku vyobrazuje výkres na obrázku 10.2.

Nároky na charakteristiky svarového spoje (výběr svařovacích technologií na základě těchto požadavků):

1. Typ svaru – švový příp. bodový s průvarem (na přeplátovaných dílech).
2. Spojení všech 4 plechů základního materiálu.
3. Životnost – odolnost proti vibracím, minimální pevnost svaru 40 N.
4. Elektrické vlastnosti – spoj by měl vykazovat co možná nejnižší přechodový odpor.

Podmínky pro technologii svařování:

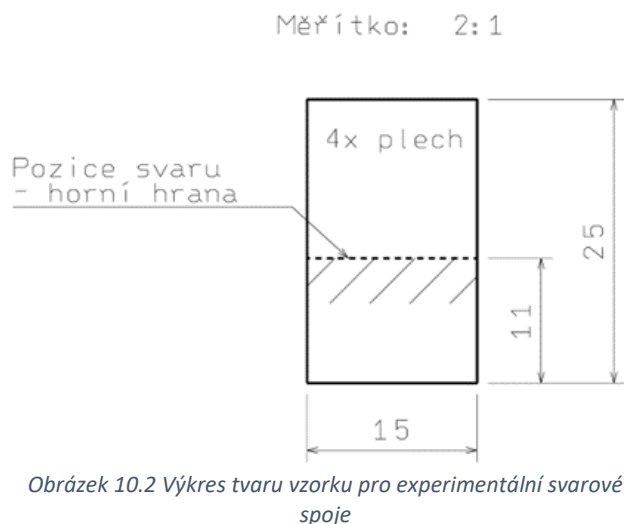
1. Reálná aplikace pro svaření bateriových článků sáčkového typu.
2. Nízké tepelné ovlivnění ZM.
3. Provaření všech vrstev na co nejmenší počet operací (housesek).
4. Bezpečnost při svařování.

V diplomové práci byly nakonec vybrány a následně vyhodnoceny dvě metody svařování. Svařování ultrazvukem ve spolupráci s firmou Dukane IAS, s.r.o. a ruční laserové svařování ve spolupráci s firmou LaserTherm spol. s r.o. Pro výrobu všech vzorků bylo dohromady spotřebováno 1,4 m svitku plechu (pásky). Pro každou z vybraných metod bylo vyrobeno sedm vzorků svarových spojů.

Všechny vzorky byly zkontrolovány nedestruktivně (pomocí VT a PT zkoušky). Pět vzorků bylo následně otestováno na přechodový odpor čtyřsvorkovou metodou ve společnosti Porsche Engineering Services, s.r.o.

Tyto vzorky byly dále otestovány destruktivně pro určení mechanických vlastností spoje – tahovou, resp. střížnou zkouškou (až do rozlomení), čímž byla zjištěna střížná síla spoje. Na závěr byla na jednom vzorku dále realizována

metalografická analýza, která přehledně zobrazila všechny detaily svaru (zkouška makrostruktury). Na vytvořeném metalografickém vzorku poté proběhla dále zkouška mikrotvrdomosti dle Vickerse. Poslední vzorek byl vyroben jako rezervní, kdyby bylo potřeba doplnit další zkoušky.



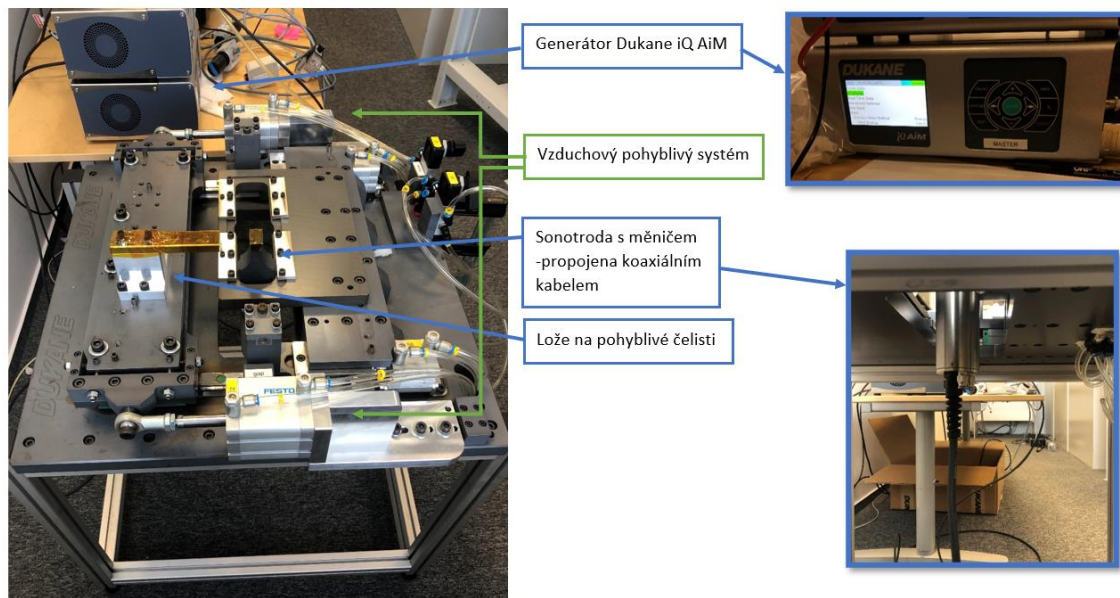
11 Svařování ultrazvukem

První vybranou metodou svařování pro výrobu vzorků je metoda svařování ultrazvukem. Veškeré podmínky pro technologii svařování a svarový spoj bylo možné zrealizovat ve spolupráci s firmou Dukane IAS, s.r.o., se kterou bylo zkonstruováno řešení dle požadavků.

11.1 Popis zařízení pro ultrazvukové svařování

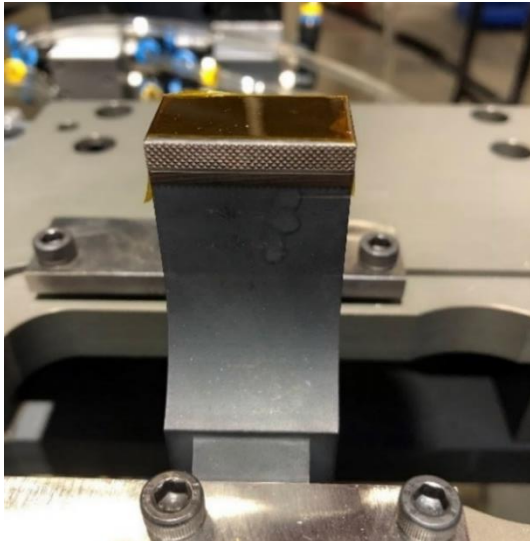
Kompletní svařovací sestava se skládá z několika zařízení. Prvním je generátor Dukane iQ AiM (frekvence 30 kHz, výkon 2400 W), ten je propojen koaxiálním kabelem do piezoelektrického měniče (Transduceru, frekvence 30 kHz, Probe transducer 2400 W). Všechny tyto díly jsou přišroubovány na testovací lavici firmy Dukane, jejíž konstrukce je vyrobena tak, aby kompletní sestava byla co nejtužší (viz obrázek 11.1). K měniči je na přímo přišroubována sonotroda bez zesilovače, ta je upevněna k lavici staticky. Lože je přimontováno na pohyblivé čelisti, kterou pohybují dva vzduchové písky ovládané ventilem, čímž se nastavuje mechanický tlak (1,5 Bar, což odpovídá cca 700 N). Důležité je, aby sonotroda a lože dosedaly přímo na sebe, tzn. byly

navzájem v rovině. Pokud by došlo k sebemenšímu vybočení z roviny, svarový spoj by byl nekvalitní.

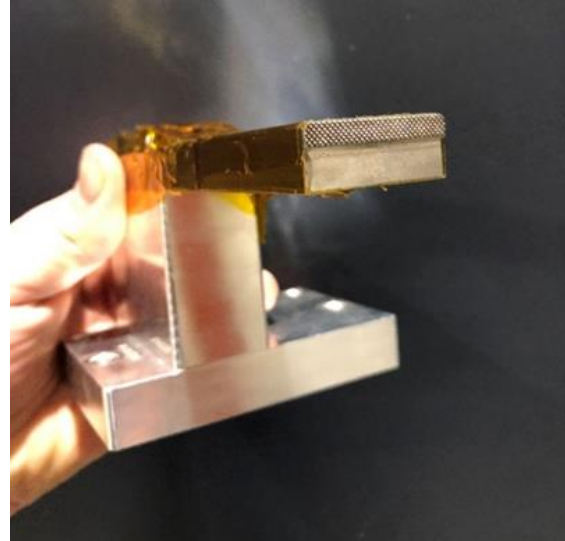


Obrázek 11.1 Kompletní ultrazvuková svařovací sestava s popisem

Pro svařování ultrazvukem vybraného typu spoje bylo nutné vyrobít nástroj včetně příslušenství (sonotrodu a lože) ukázané viz obrázek 11.2 a 11.3. Jsou konstrukčně přizpůsobeny tak, aby bylo možné svařovat články postupně k sobě. Sonotroda byla vyrobena ze slitiny titanu (grade 6 – 5Al2,5Sn) a lože z hliníkové slitiny (EN AW 7075 – AlZn5,5MgCu). Aby byly dodrženy podmínky pro svarový spoj z kapitoly 9, návrh nástrojů se tomu musel přizpůsobit. Dosedací plocha je co možná nejmenší tzv. na limitu dodržení potřebné mechanické tuhosti, rozměr finální tloušťky dosedací plochy je 4 mm. Lože má stejnou dosedací plochu. Jelikož se plechy při prvním svařování měly tendenci od sebe odsunout směrem vzhůru, řešením bylo udělat na sonotrodě a loži odlišný tvar vroubkování v dosedacích plochách namísto přímého. Vroubkování bylo zvrásněno na kosoúhlé, tímto byla zaručena nehybná pozice svařovaných plechů.



Obrázek 11.2 Titanová sonotroda s viditelnou dosedací plochou



Obrázek 11.3 Hliníkové lože s viditelnou dosedací plochou

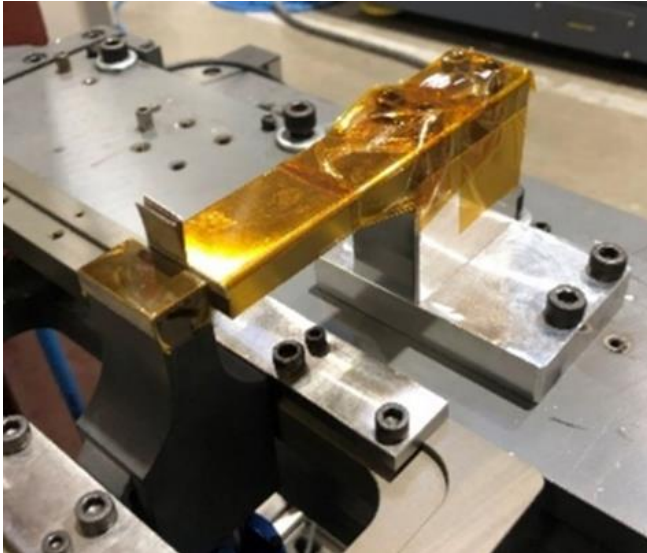
11.2 Postup nastavení zařízení pro ultrazvukové svařování

Jelikož se firma Dukane IAS, s.r.o. specializuje na svařování plastů, se svařováním kovových materiálů neměla mnoho zkušeností. Bylo proto nutné vyzkoušet různé nastavení parametrů. Hlavními parametry pro nastavení byly: energie [J], amplituda [μm] a tlak [MPa].

Prvním krokem optimalizace svařovacích parametrů bylo svaření dvojice plechů. Po několika pokusech a nastavení parametrů se podařilo vyrobit kvalitní svar, otestovaný vizuálně a mechanicky (tahovou zkouškou). Cílem však bylo svařit 4 plechy najednou, to však z důvodu kvality svaru nebylo možné, protože se vnitřní vrstvy plechů vysunovaly, a tím by se mohl reálný bateriový článek poškodit. Řešením bylo svařit dvojici a dvojici plechů k sobě, tento proces je sice zdlouhavější, ale svar byl takto kvalitnější. V tabulce 8 jsou uvedeny svařovací parametry, které byly použity při svařování vzorků v rámci řešení diplomové práce. Na obrázku 11.4 je vidět detail při svaření všech 4 plechů základního materiálu. Aby při svařování byl dodržen tvar podle výkresu, pro soudržnost plechů byl použit 3D tištěný plastový přípravek a před každým svařováním byly plechy odmaštěny a očištěny acetonem (viz obrázek 11.5).

Tabulka 9 Parametry nastavení

Parametry nastavení pro ultrazvukové zařízení			
Díl	Energie [Joule]	Amplituda [μm]	Tlak [Bar]
Dva plechy	100	35	1,5
Finální čtveřice	100	35	1,5



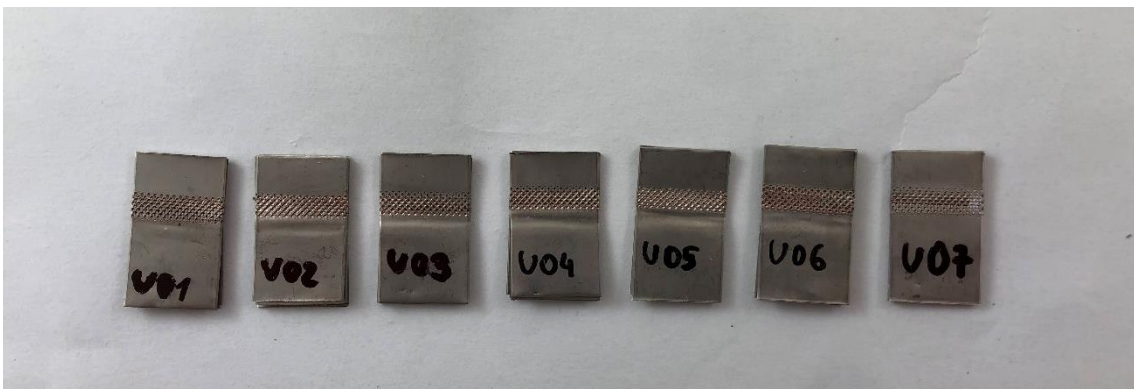
Obrázek 11.4 Svařený vzorek U01



Obrázek 11.5 Příprava před svařováním ultrazvukem

11.3 Výsledné vzorky – svařování ultrazvukem

Vzorky byly vyrobeny dle zadání z kapitoly 10. Po svaření byly označeny U01 až U07 (viz obrázek 11.6).



Obrázek 11.6 Výsledné svařené vzorky ultrazvukem U01 – U07

12 Svařování laserem

Pro požadavky diplomové práce byla vytipována jako nejvhodnější manuální metoda laserového svařování, k čemuž se nejvíce hodila ruční laserová svářečka, k níž byl použit moderní laserový svařovací zdroj (LARISA A1500) od firmy LaserTherm spol. s r.o. (kontinuální vláknové manuální laserové zařízení). Také byl testován laserový svařovací zdroj od firmy LINTECH, spol. s r.o. (pulzní vláknový statický laser), ale bohužel ve firmě nedisponovali dostatečně silným zdrojem pro svaření všech 4 plechů základního materiálu. Navíc pokud by se zmíněný laserový zdroj používal pro reálnou výrobu akumulátorové baterie (svaření článků do jednotlivých modulů), přizpůsobení by bylo komplikované a nákladné, jelikož při svařování laserem je nutné mít všechny vrstvy plechů přitisknuté termálně na sobě (bez mezery). I z tohoto důvodu bylo výhodnější ruční laserové svařování (pomocí zdroje LARISA A1500), protože bylo možné pomocí špičky na pistolí tlačit proti svařovanému materiálu, čímž byl zaručen dostatečný styk, a tedy i použitelnost při reálné výrobě baterie.

12.1 Popis zařízení pro laserové ruční svařování

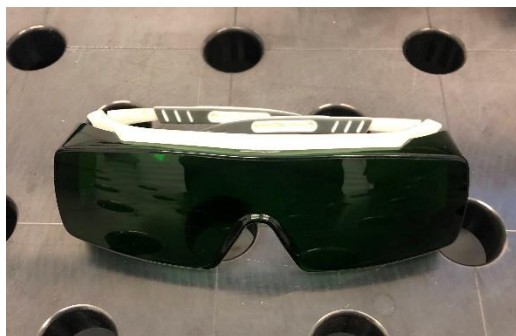
LARISA (Laserová Ruční Inteligentní Svářečka) A1500, byla perfektním kandidátem pro svaření vzorků a jejich následné zkoušení (viz obrázek 12.1). LARISA je výkonné vzduchem chlazené laserové zařízení, které využívá tavnou metodu s vysokou koncentrací energie. V běžném provozu se tato technologie používá jako efektivnější svařovací metoda a často nahrazuje metodu TIG. Největší rozdíl je v rychlosti svařování materiálů o malé tloušťce do 2 mm. Laser je až 10x rychlejší. Dalšími výhodami jsou svařitelné materiály od 0,2 mm, snadné bodování materiálů, minimální vnesené teplo, nastavitelná šířka svaru, výměnné trysky pro různé typy svarů, čištění laserem. Konkrétní technická charakteristika svařovacího zdroje je vyobrazena v tabulce 9. Pro svařování vzorků na zařízení nebylo potřeba vyrábět další přípravky nebo upravovat příslušenství zařízení. [43]

Tabulka 10 Technické charakteristiky laserového zdroje LARISA A1500 [43]

LARISA A1500	
Výkon	60–1500 W
Vlnová délka	1070 nm
Wobble – šířka svaru	0,1–5 mm
Trysky	Výměnné
Chlazení	Vzduchem
Pointer	Červený
Podavač drátu	Ano
Délka optického svazku	10 m
Prům. příkon	3,4 kW



Obrázek 12.1 LARISA A1500– laserová ruční inteligentní svářečka [43]



Obrázek 12.2 Bezpečnostní ochranné brýle proti laserovému záření



Obrázek 12.3 Bezpečnostní pojistka ve dveřích

Během svařování se musí dbát na bezpečnost práce, povinností je dodržování základních podmínek. Nejdůležitější při svařování laserem jsou speciální brýle, které jsou certifikované na záření dané vlnové délky a výkon laserového zdroje viz obrázek 12.2 (různé vlnové délky – různé brýle). Taktéž kvůli bezpečnosti je ke svařovacímu zdroji přidávána svorka pro spojení obvodu. Poslední bezpečnostní opatření je čidlo umístěné ve dveřích. Pokud nejsou zavřeny, svařovací zdroj je zablokován a není schopen svařovat (viz obrázek 12.3). Pro svařování je potřeba mít svařovací zdroj připojen na argon 5.0 (ochranná atmosféra pro lepší kvalitu svarů).

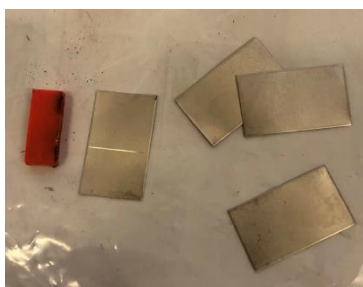
12.2 Postup nastavení laserového zařízení

Pro prvotní nastavení laseru bylo nutné rozhodnout, jak velký bude potřeba svarový spoj. Jednou z podmínek je mít co nejmenší svar. Rozhodnutí bylo tedy udělat dva bodové svary o co největší šířce. V tabulce 10 jsou zmíněny všechny důležité parametry pro nastavení svařovacího zdroje. Těmito parametry bylo možné vytvořit opakovatelné svary. Při svařování vzorků byl použit 3D tištěný přípravek pro ustavení svařovacích plechů a dodržení hlavních rozměrů svarů, dle výkresu na obrázku 10.2. Vrchní plech měl na sobě značku s přesným umístěním svaru. Zajímavým jevem bylo to, že odmaštěný vrchní plech měl horší vlastnosti na propal laserového paprsku než plech, který byl neodmaštěný. Tím, že svařovacím materiálem je poniklovaná měď, která má velice vysokou světelnou odrazivost, neočištěný plech se pro svařování jevil

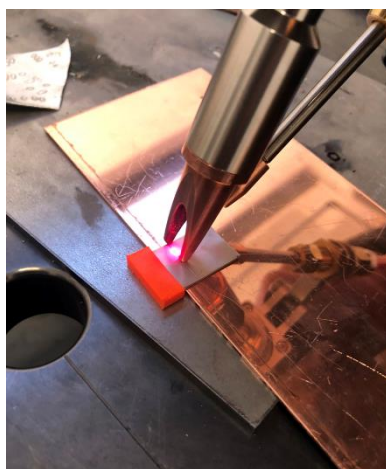
jako lepší. Při svařování byla použita podložka z měděného plechu pro lepší odvod tepla.

Tabulka 11 Parametry laserového svařování

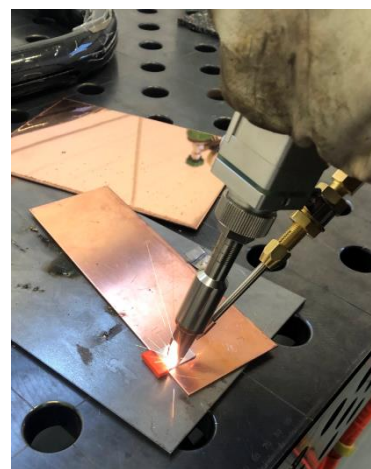
Parametry nastavení – 4 plechy dohromady	
Výkon [%]	91
Frekvence [Hz]	30
Wobble – tloušťka x šířka svaru [mm]	2x2,5
Čas náběhu [s]	300
Doba trvání [s]	400



Obrázek 12.4 Přípravené plechy pro svařování s 3D přípravkem



Obrázek 12.5 Zaměření pointeru, před svařováním vzorku L01



Obrázek 12.6 Při svařování vzorku L01

12.3 Výsledné vzorky

Vzorky byly vyrobeny dle zadání z kapitoly 10. Po svaření byly označeny L01 až L07 (viz obrázek 12.7).



Obrázek 12.7 Výsledné svařené vzorky ručním laserovým svařováním L01 – L07

13 Nedestruktivní kontrola vytvořených vzorků

NDT metody kontroly jsou nutné minimum, kterým bylo ověřeno, jestli jsou vytvořené svary vyhovující. Vzorky proto byly zkontrolovány vizuální a kapilární zkouškou (bližší popis zkoušek – viz kapitoly 13.1 a 13.2). Realizace těchto zkoušek proběhla v laboratoři Ústavu strojírenské technologie v pražských Dejvicích. Při těchto experimentech byla změřena svítivost v místnosti pomocí Luxmetru Light meter LX 113S, kdy dosahovala hodnoty 580 Luxů (viz obrázek 13.1). V případě, že vzorky vyhověly VT a PT, bylo možné provést měření elektrického přechodového odporu, které bylo provedeno v laboratoři ve společnosti Porsche Engineering Services, s.r.o.



Obrázek 13.1 Měření intenzity osvětlení pomocí Luxmetru Light meter LX-113S

13.1 Vizuální kontrola

Na všech vzorcích byla provedena vizuální kontrola. Při kontrole byly zkoumány svarové spoje vzorků, jestli nevykazují viditelné povrchové vady a zda jsou vyrobeny dle výkresové dokumentace. Na první pohled nebyla nikde zjištěna prasklina, trhlinka nebo jiná vada svaru a ani jiné odlišení od výkresové dokumentace.

Vzorky svařené ultrazvukem (viz obrázek 11.6) nevykazují žádné viditelné vady. Snad jen potencionální odlomení základního materiálu v blízkosti svaru, při opakovaném ohýbání.

Vzorky svařené laserem (viz obrázek 12.8) vykazují v oblasti svaru mírné opálení. Svarový spoj se zdá propadlý a roztavený materiál vytekl do okolí svaru. Zadní strana vzorků je však neporušená, jen je vidět mírný zlatavý bod tzn. důkaz, že jsou všechny vrstvy dostatečně svařené. Pro další hodnocení vzorků jsou tyto nedostatky zanedbatelné.

13.2 Kapilární zkouška

Kapilární zkouška byla provedena u všech svařených vzorků. Jednalo se o metodu barevné indikace povrchových vad.

13.2.1 Zkušební zařízení pro PT zkoušku

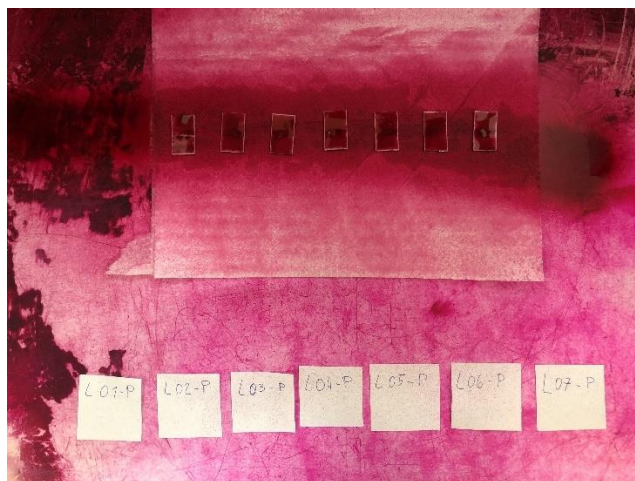
Pro provedení zkoušky byly používány spreje s penetrantem a vývojkou od firmy Sopras welding products. Na čištění svaru byl použit čistič od firmy DIFFU-THERM.



Obrázek 13.2 Pomůcky potřebné pro realizaci kapilární zkoušky metodou barevné indikace

13.2.2 Popis zkoušky PT

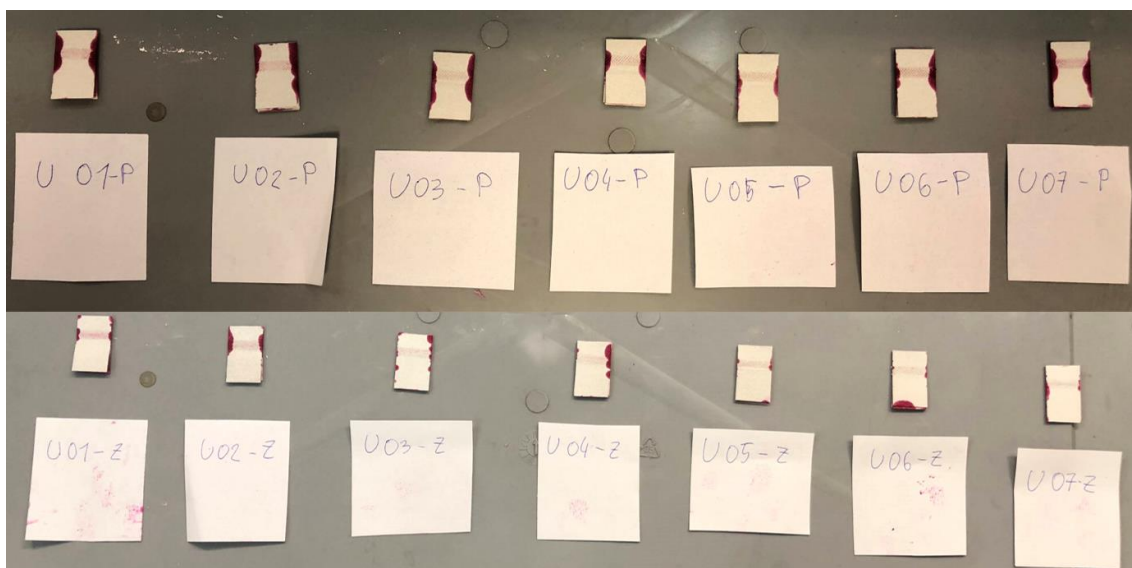
Prvním krokem byly vzorky očištěny od nečistot a mastnoty. Dále byly vzorky označeny papírovým popiskem. Poté byl penetrant nanášen rovnoměrně sprejem ze vzdálenosti 20 cm (viz obrázek 13.3). Penetrant zasychal zhruba 20 minut a dále byl přebytečný penetrant z povrchu vzorků opatrně odstraněn pomocí papírových ubrousků. Po očištění penetrantu byla nanesena bílá vývojka, která v kombinaci s penetrantem barevně zvýrazní indikace vad. Každý vzorek byl testován na přední a zadní části (tzn. 100 % svarového spoje).



Obrázek 13.3 Vzorky svařené laserem, po nanesení penetrantu

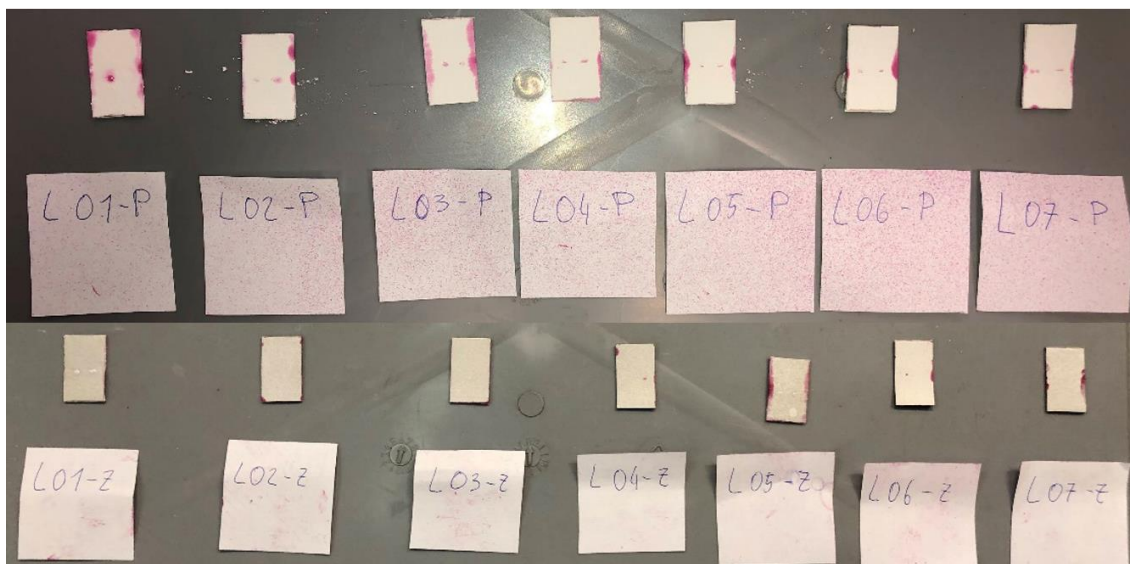
13.2.3 Výsledek zkoušky PT

Vzorky svařené ultrazvukem: na obrázku 13.4 je patrné, že na bocích nebyl penetrant dostatečně očištěn. Na svarové ploše na přední i zadní části svaru nebyly detekovány indikace vad, proto vzorky vyrobené ultrazvukem lze považovat za kvalitní.



Obrázek 13.4 Vzorky svařené ultrazvukem. Horní řada – přední strana vzorků. Spodní řada – zadní strana

Vzorky svařené laserem: na obrázku 13.5 (horní řada) jsou vidět indikace vad v oblasti svarů. Toto lze vysvětlit dvěma důvody. Prvním je, že nadbytečný penetrant nebyl dostatečně očištěn. Druhým důvodem je, že na vzorcích svařených laserem vznikly hluboké otisky. Neúplné vyplnění svaru na povrchu na první pohled neovlivňuje pevnost svarového spoje, proto jsou vzorky použitelné na další testování. Popisovaný jev je patrný z obrázku makrostruktury v kapitole 14.1.



Obrázek 13.5 Vzorky svařené laserem. Horní řada – přední strana vzorků. Spodní řada – zadní strana

13.3 Přejchodový elektrický odpor

Jelikož cílem práce je porovnat metody svařování vývodů z bateriových článků, nepostradatelnou zkouškou vytvořených svarů je změření elektrického přechodového odporu. Tento odpor by měl mít co nejnižší hodnotu.

13.3.1 Zkušební zařízení pro měření přechodového elektrického odporu

Kompletní měření proběhlo v laboratoři společnosti Porsche Engineering Services, s.r.o., kde byla instalována potřebná zařízení k měření el. přechodového odporu. Jednalo se o zařízení:

- zdroj Elektro Automatick PSI9080-170 (max proud 170 A) – viz obrázek 13.6,
- multimetr Fluke 8845 A (rozlišení 6-1/2 digit) – viz obrázek 13.8,
- proudová sonda Teledyne 500 A (max měřitelný proud 500 A) – viz obrázek 13.7,
- digitální osciloskop Rohde&Schwarz RTH1004 – viz obrázek 13.9.



Obrázek 13.6 Zdroj Elektro Automatik PSI9080-170



Obrázek 13.7 Proudová sonda Teledyne 500 A



Obrázek 13.8 Multimetr Fluke 8845 A



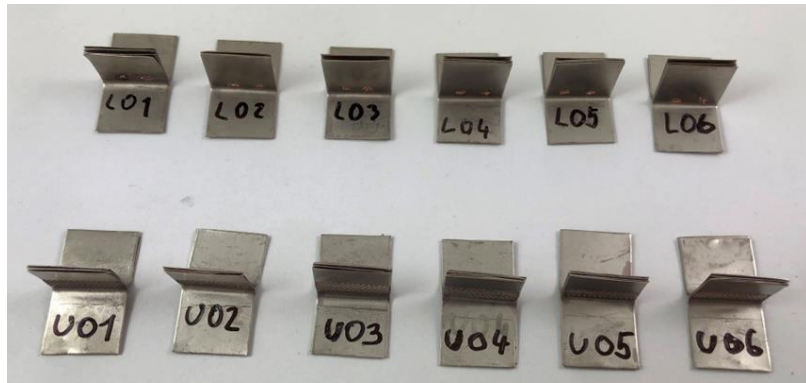
Obrázek 13.9 Digitální osciloskop Rohde&Schwarz RTH1004

13.3.2 Popis měření přechodového elektrického odporu

Celý experiment byl proveden podle metody čtyřsvorkového měření malých odporů, která je detailně popsána na obrázku 13.12. Prvním měřením byl změřen odpor pouze na základním materiálu (viz obrázek 13.10) ve stejné délce, jako byly měřeny samotné svařené vzorky. Na každém vzorku proběhla tři měření. Před samotným experimentem bylo nutné vzorky připravit tím, že se ohnuly plechy kvůli ploše na měření (viz obrázek 13.11).



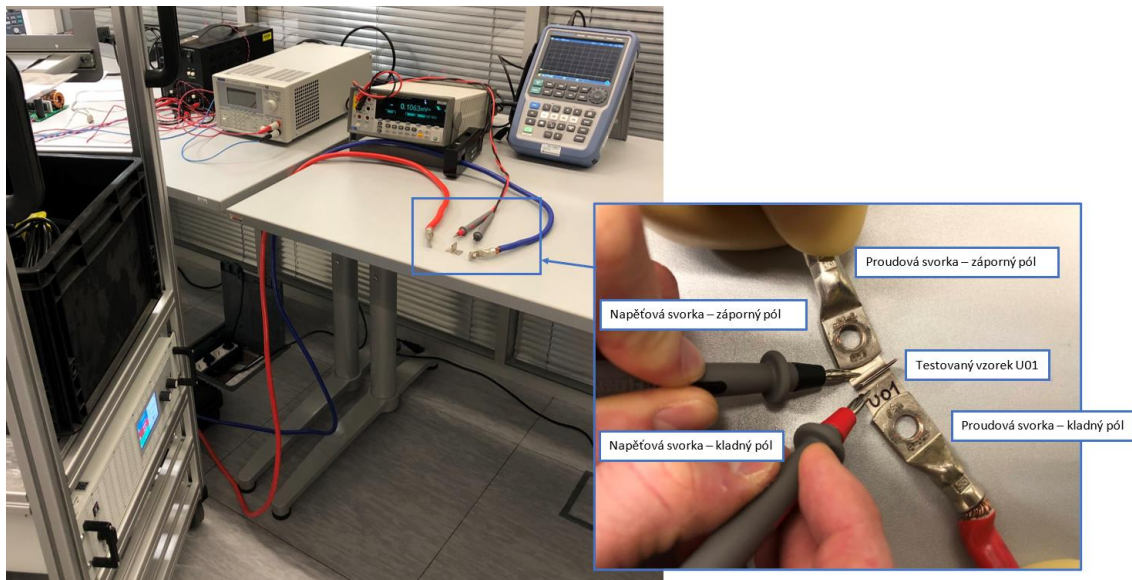
Obrázek 13.10 Základní materiál s vyznačenými vzdálenostmi pro měření



Obrázek 13.11 Připravené vzorky s ohnutými plechy

Postup měření, který byl použit pro všechny vzorky:

1. Na naměřený svařený vzorek byly připojeny proudové svorky a zapnutím zdroje se spustil testovací proud 100 A (proud byl nezávisle ověřen proudovou sondou a osciloskopem).
2. Přiložení napěťových svorek milivoltmetru na předem vyznačenou pozici (pokaždé stejná vzdálenost) – odečtení změřeného úbytku napětí na testovaném vzorku.
3. Zopakování prvního a druhého kroku pro opačnou polaritu testovacího proudu (stejný vzorek měřen na opačných koncích).



Obrázek 13.12 Měřící pracoviště v laboratoři Porsche Engineering + detail měření čtyřsvorkovou metodou

13.3.3 Výsledek měření přechodového elektrického odporu

Změřené hodnoty byly: úbytek napětí – obě polarity (aritmetický průměr) a proud. Výpočet se řídil podle Ohmova zákona o el. odporu. Níže bude proveden výpočet pro vzorek U01 – první měření:

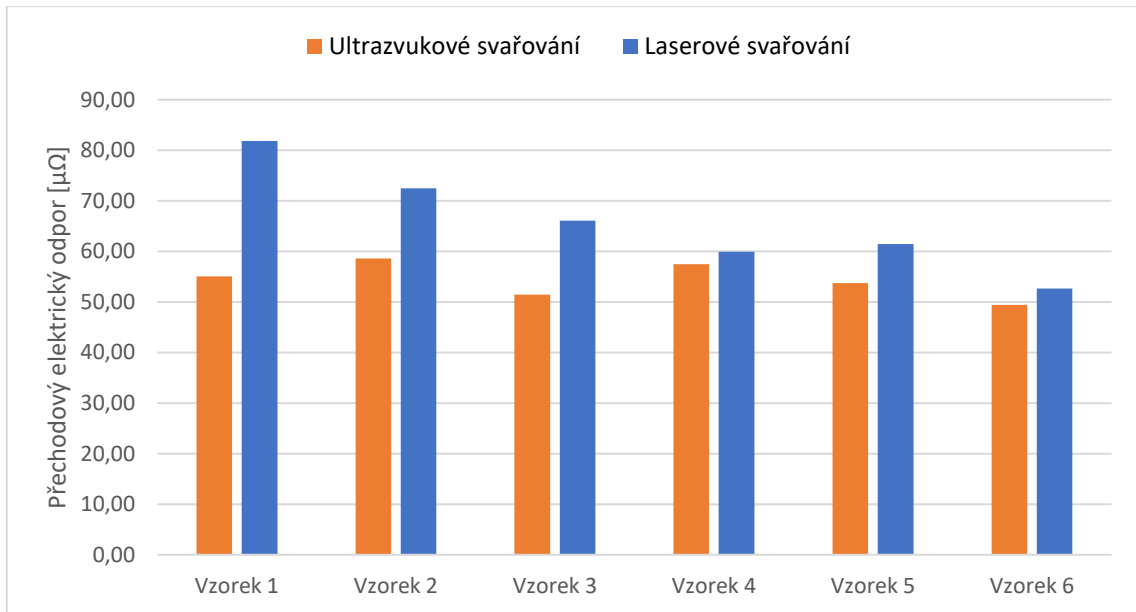
$$R = \frac{U}{I} \rightarrow R_{U01} = \frac{\frac{U1 + U2}{2}}{I} = \frac{5,56 + 5,25}{100} = 54,05 \mu\Omega \quad (13.1)$$

Všechny výsledky z měření jsou zaznamenány v tabulce 15 (viz příloha 1). Z jednotlivých výsledků byl spočítán aritmetický průměr. Po změření přechodového odporu na základním materiálu byl tento odpor odečten od měřeného odporu na vzorcích. Výsledné hodnoty viz tabulka 12 a graf viz obrázek 13.13.

Vzorky svařené ultrazvukem vykazují lepší hodnoty než vzorky svařené laserem. V průměru všech měření je u ultrazvuku hodnota 54,29 $\mu\Omega$ a u laseru 65,75 $\mu\Omega$. Naměřené hodnoty jsou tak nízké, že pro výrobu akumulátorové baterie do Formula Student monopostu je možné použít obě technologie svařování.

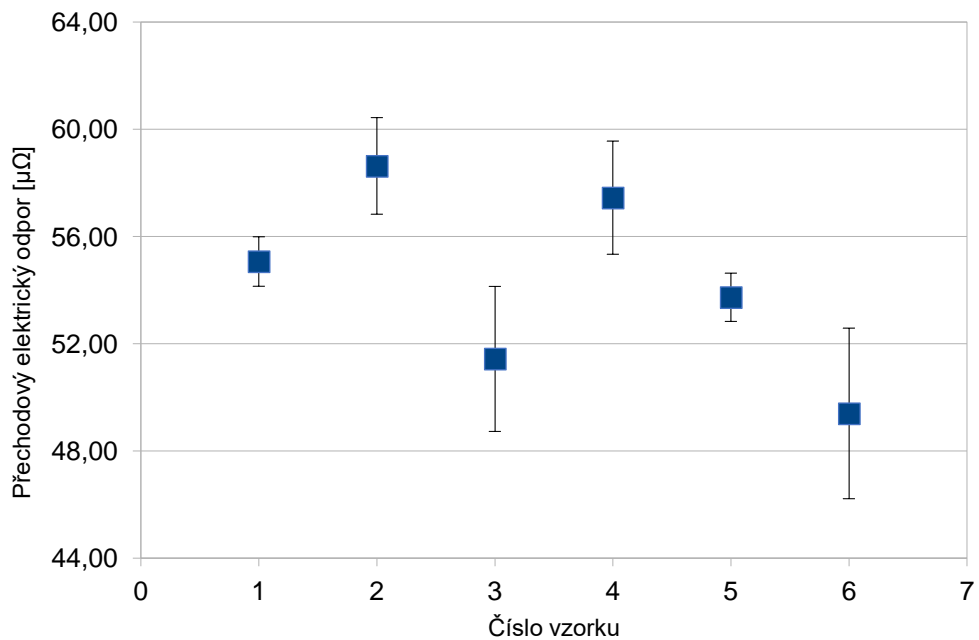
Tabulka 12 Spočítané výsledné hodnoty

Měřený vzorek	Výsledná hodnota přechodového el. odporu [$\mu\Omega$]	Výběrová směrodatná odchylka [$\mu\Omega$]	Výsledný přechodový el. odpor po odečtu hodnoty základního materiálu [$\mu\Omega$]
Základní materiál	46,98	3,01	46,98
Vzorek U01	55,07	0,92	8,08
Vzorek U02	58,63	1,80	11,65
Vzorek U03	51,43	2,70	4,45
Vzorek U04	57,45	2,11	10,47
Vzorek U05	53,73	0,90	6,75
Vzorek U06	49,40	3,18	2,42
Vzorek L01	81,83	6,56	34,85
Vzorek L02	72,47	2,33	25,48
Vzorek L03	66,08	1,93	19,10
Vzorek L04	59,93	2,04	12,95
Vzorek L05	61,48	5,91	14,50
Vzorek L06	52,68	1,23	5,70

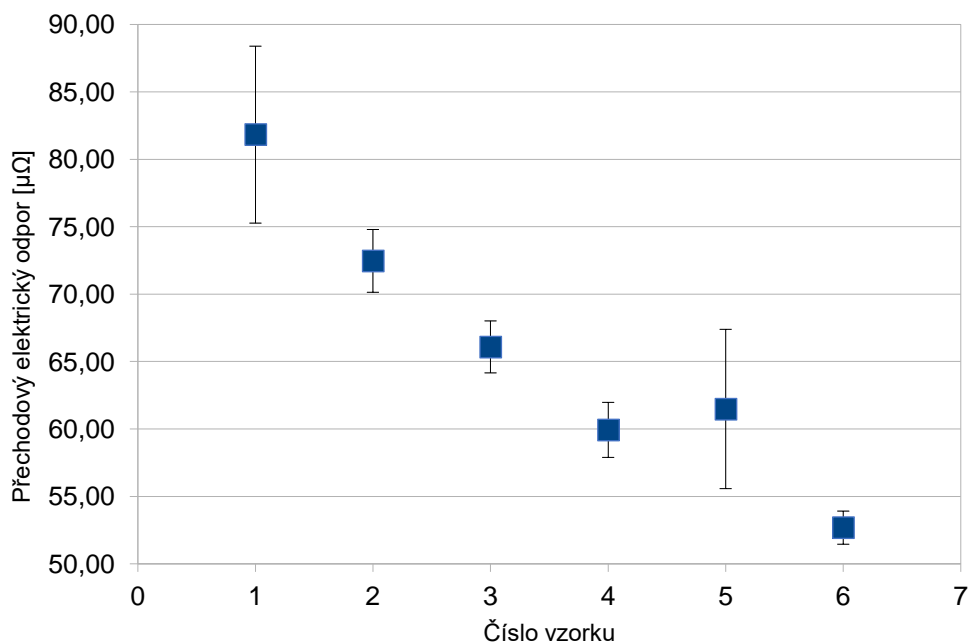


Obrázek 13.13 Porovnání výsledných hodnot přechodového elektrického odporu

V obrázku 13.14 pro ultrazvukové svařování a v obrázku 13.15 pro laserové svařování jsou zobrazeny hodnoty aritmetického průměru elektrického přechodového odporu ze tří měření spolu s výběrovou směrodatnou odchylkou.



Obrázek 13.14 Graf se směrodatnými odchylkami měření přechodových el. odporů vzorků U01-U06



Obrázek 13.15 Graf se směrodatnými odchylkami měření přechodových el. odporů vzorků L01-L06

Z tabulky 12 a obrázcích 13.14 a 13.15 je patrné, že v případě ultrazvukového svařování, je rozptyl hodnot pro jednotlivé vzorky srovnatelný s vypočítaným statistickým rozptylem daným technickými omezeními při měření. Nejčastější hodnota tohoto rozptylu je přibližně $2 \mu\Omega$, a to i v případě laserového svařování. Na rozdíl od ultrazvukového svaru, vidíme v případě laserového svařování výrazný rozptyl hodnot průměru pro jednotlivé vzorky. Z toho lze usuzovat, že laserové svařování může vést k větším rozdílům při sériovém použití mezi jednotlivými svary.

14 Destruktivní kontrola

Pro zjištění mechanických vlastností, struktury a tvrdosti svarů vzorků bylo nutné provést destruktivní zkoušky. Konkrétně se jednalo o metalografické zkoušení, zkoušení mikrotvrdosti svaru a poslední zkouškou bylo mechanické měření pevnosti svarů. Metalografická zkouška a test mikrotvrdosti byly provedeny v metalografické laboratoři Ústavu strojírenské technologie.

14.1 Metalografická zkouška svarových spojů

- analýza makrostruktury

Pro metalografickou zkoušku byly zvoleny vzorky U07 a L07. V Prvním kroku byly vzorky rozříznuty příčným řezem přes vybrané oblasti svarového spoje. Celkem byly vyhodnocovány 4 vzorky makrostruktury - 2 snímky ultrazvukových svarů, 2 laserové svary. Předpoklad zkoušky je objevit potencionální vnitřní vady svarových spojů a zmapovat podobu svarového spoje.

14.1.1 Zkušební zařízení pro metalografickou zkoušku

Pro zkoušku byla využívána tato zařízení:

- Rozbrušovací pila Struers Labotom-3,
- Metalografický lis Struers CitoPress-1 (viz obrázek 14.1),
- Bruska/leštička Buehler Beta s automatickou hlavou Vector (viz obrázek 14.2),
- Optický metalografický mikroskop Carl Zeiss Axio observe d1m (viz obrázek 14.5).



Obrázek 14.1 Metalografický lis Struers CitoPress-1



Obrázek 14.2 Leštička Buehler Beta s hlavou Vector

14.1.2 Příprava metalografických vzorků

Na svařených vzorcích U07 a L07 byl pilou proveden příčný řez v místě svaru, zhruba uprostřed vzorku. Obě části řezů pak byly zafixovány do přípravku a vloženy do lisu spolu s fenolitickou pryskyřicí. Lisováno bylo 4,5 min, při 180 °C a 250 bar. Po této operaci vznikl vzorek ve tvaru válce o průměru 40 mm (viz obrázek 14.3 a 14.4)

Dále byl vzorek broušen a leštěn na automatické leštičce pomocí brusných papírů a emulze za mokra. Proces je detailně popsán v kapitole 7.2. Po dokonalém vybroušení a vyleštění vzorků následuje leptání. Použité leptadlo byl roztok složený z: 5 g chloridu železitého, 10 ml kyseliny chlorovodíkové, 50 ml glycerinu a 30 ml vody. Po leptání se vzorek osuší teplým vzduchem. Takto připravený výbrus je připravený na pozorování optickým mikroskopem.



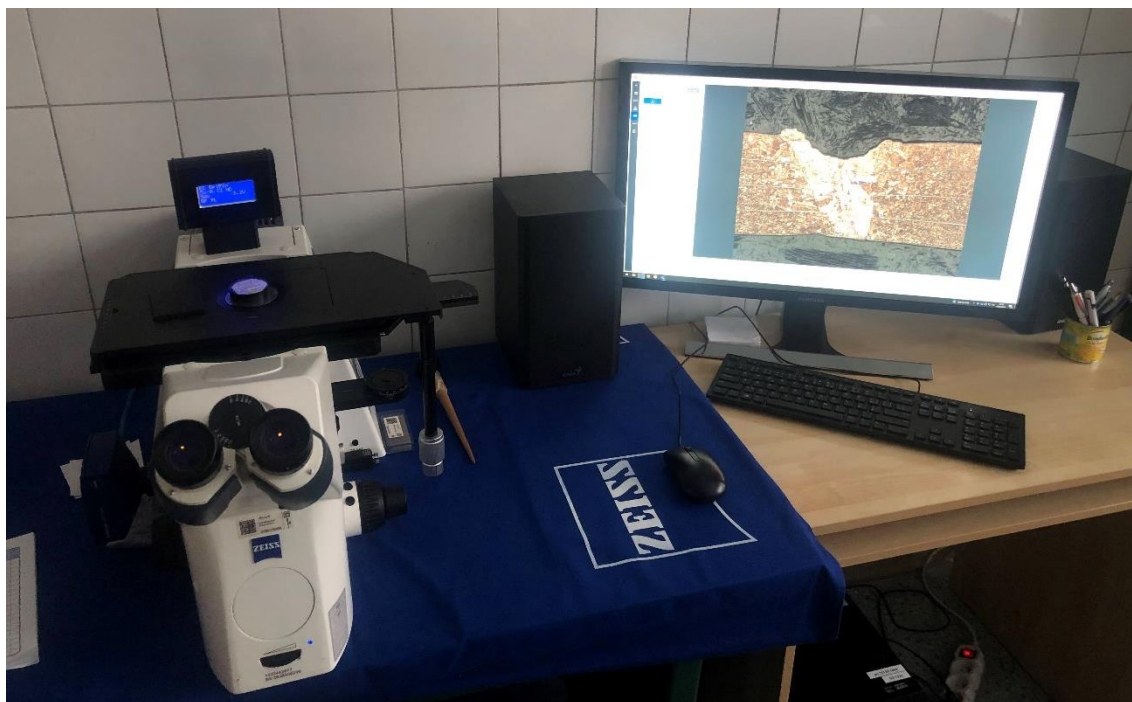
Obrázek 14.3 Metalografický vzorek zadní strana s pojmenovanými částmi



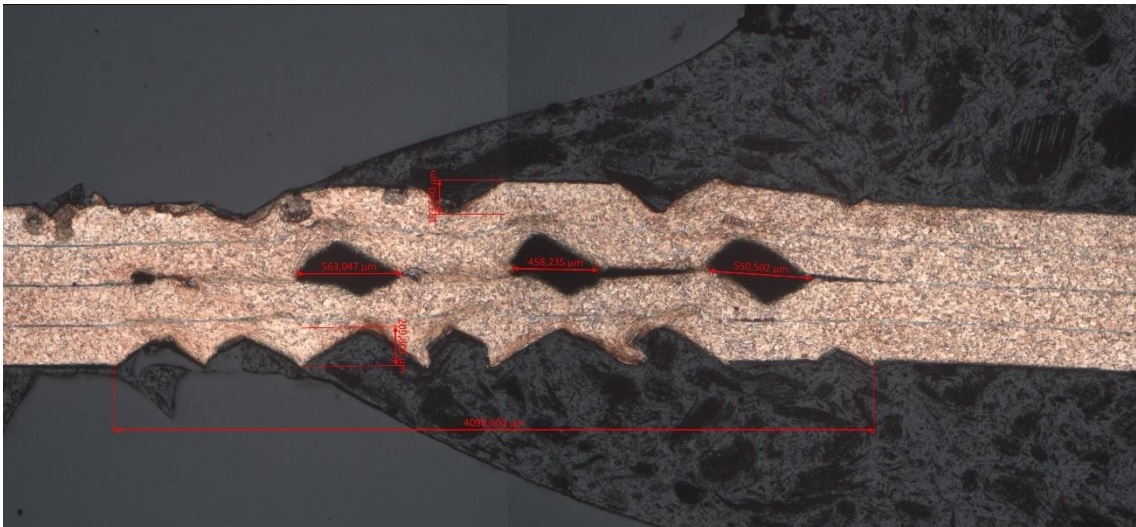
Obrázek 14.4 Metalografický vzorek přední (zkoumaná) strana

14.1.1 Vyhodnocení makrostruktury pomocí optického mikroskopu

Připravený výbrus byl zkoumán optickým mikroskopem a zpracováván pomocí programu ZEN (viz obrázek 14.1). Každý snímek má své pojmenování, podle toho, jaký je to typ svaru. Značení ultrazvukových snímků je U07-1 (viz obrázek 14.6), U07-2 (viz obrázek 14.7) a laserových snímků je L07-1, L07-2 (viz obrázek 14.8 a 14.9).

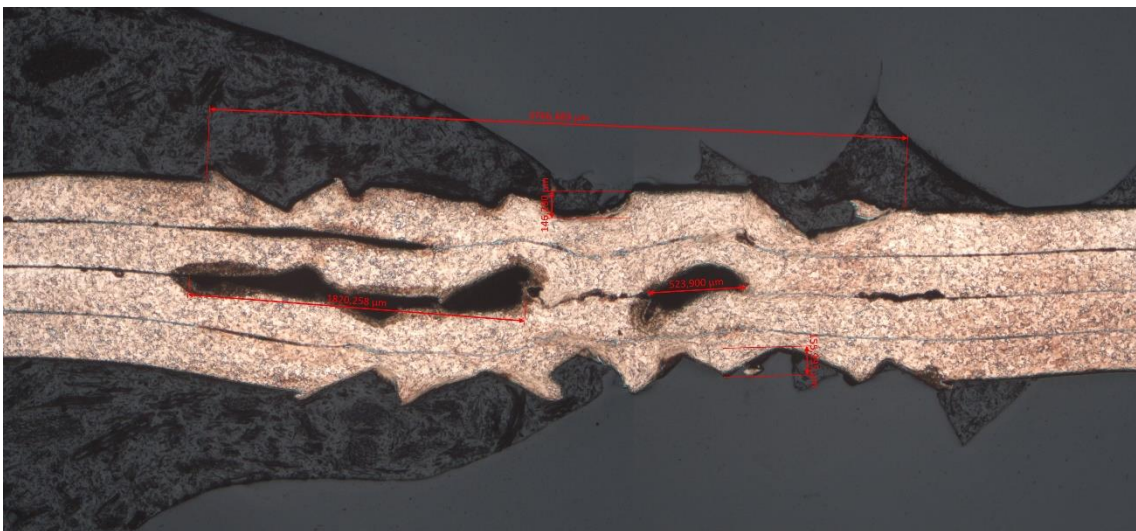


Obrázek 14.5 Laboratorní pracoviště, kde byla vyhodnocena makrostruktura svarů,
- mikroskop Carl Zeiss Axio Observe d1m (na levé straně obrázku)
- PC se SW ZEN pro hodnocení výstupu z mikroskopu



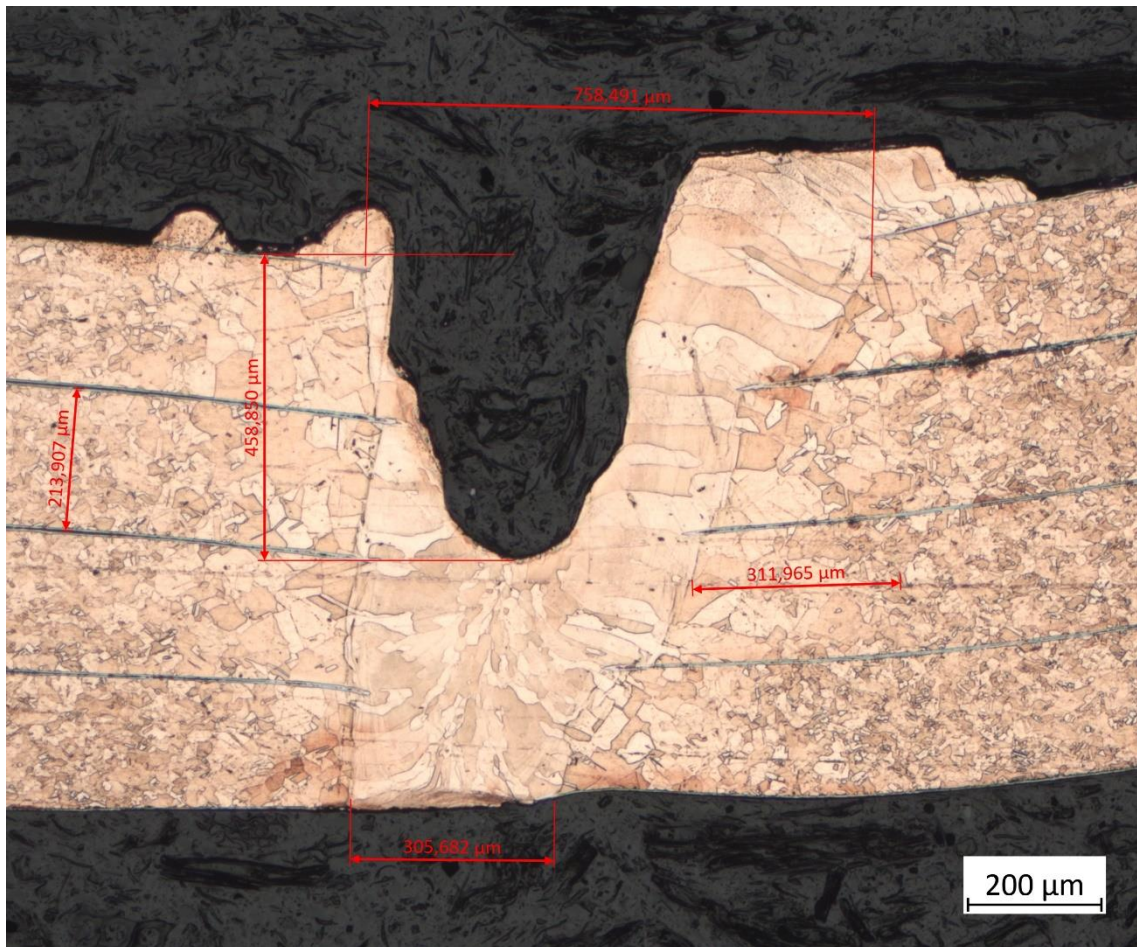
Obrázek 14.6 Makrostruktura ultrazvukového spoje U07-1

Stejně jako na obrázku 14.7, tak i na obrázku 14.6 je výbrus svarového spoje po ultrazvukovém svařování. Na snímku jsou opět viditelné dutiny mezi dvojicemi plechů. Průměrná velikost dutin je 523 μm .



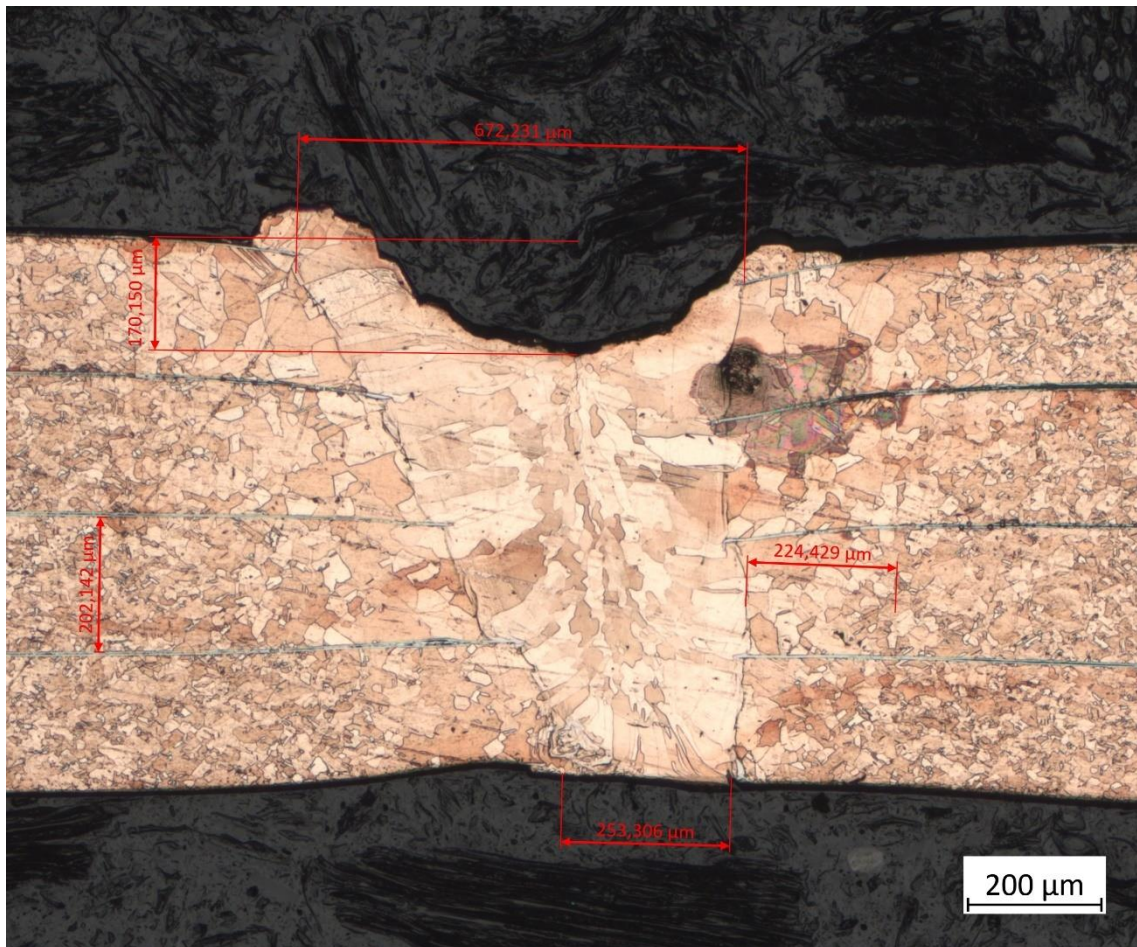
Obrázek 14.7 Makrostruktura ultrazvukového spoje U07-2

Na obrázku 14.7 je snímek makrostruktury ultrazvukového svarového spoje. Celkový tvar svaru je značně zdeformovaný od působení tlakem sonotrody a lože. Na první pohled jsou zde vidět velké dutiny, délka té největší je 1,82 mm, která je lokalizovaná mezi první a druhou dvojicí plechů. Spodní dvojice plechů se zdá být spojena kvalitně, naopak horní dvojice má viditelné studené spoje.



Obrázek 14.8 Makrostruktura laserového svarového spoje L07-1

Na obrázku 14.8 je snímek výbrusu laserového svarového spoje. Svarový spoj zde nemá dostatečné převýšení, je zde jasně patrné nedostatečné vyplnění svaru, hloubka prohloubení v krycí vrstvě je 458 μm . Také jsou viditelné rozdíly ve tvaru zrn mezi tepelně ovlivněnou oblastí, svarovým kovem a základním materiálem. TOO má šířku 312 μm .



Obrázek 14.9 Makrostruktura laserového svarového spoje L07-2

Na obrázku 14.9 je snímek makrostruktury druhého laserového svarového spoje L07-2. Na první pohled tento svar vypadá nejkvalitněji, není zde tak výrazné nevyplnění svaru. Stejně jako v předchozím případě jsou dobře viditelné jednotlivé oblasti svarového spoje a bylo tedy možné změřit jejich velikosti.

14.2 Statická zkouška stříhem

Cílem zkoušky je otestovat a porovnat střižnou sílu svařených vzorků. Statická zkouška stříhem se provádí dle normy ČSN EN ISO 14273. Ale mechanická zkouška v diplomové práci se touto normou pouze inspiruje. Hlavním důvodem byl nedostatek základního materiálu pro dodržení předepsaných velikostí zkušebních vzorků. Celý test byl realizován v laboratoři ve firmě Dukane IAS, s.r.o. na jejich testovacím zařízení. Zkoušeny byly vzorky 01-05 (obou sérií – tedy U i L). Výstupní informací je maximální střižná síla potřebná pro porušení svaru.

Požadovanou minimální střižnou sílu svarů bateriových vývodů doposud žádné pravidlo, předpis či norma neudává. Jako teoretickou hodnotu můžeme uvést minimální sílu 40 N, tuto hodnotu žádají zákazníci u výrobce akumulátorových baterií ve společnosti Omnitron s.r.o.

14.2.1 Zkušební zařízení pro zkoušku stříhem

Pro zkoušku byl použit zkušební stroj SHIMADZU Testing Machine EZTest EZ-L Series. Průběh statické zkoušky stříhu byl natáčen u dvou vzorků z každé sady a je možné ho vidět v elektronické podobě (viz obrázek 14.10).



Obrázek 14.10 Laboratorní pracoviště ve firmě Dukane, kde proběhla mechanická zkouška stříhem

14.2.2 Popis zkoušky stříhem

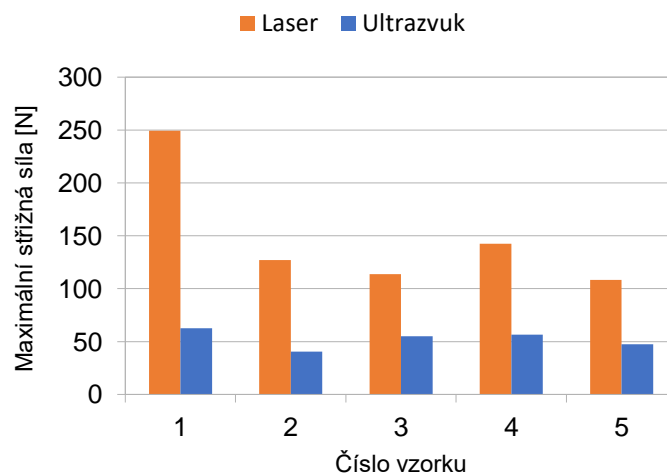
Prvním krokem bylo správné upnutí vzorků mezi čelisti. Dále byla nastavena rychlost posuvu trhacích čelistí na 10 mm/min. Poté byla zahájena zkouška a spuštěna kamera.

14.2.3 Výsledky zkoušky stříhem

Výsledné hodnoty testu jsou uvedeny v tabulce 13 a znázorněny v obrázku 14.11. Laserové spoje měli v průměru o 80 N větší sílu na stříh než spoje ultrazvukové. Pokud bychom hodnotili svary dle F_{\min} (40 N), všechny svary by však byly použitelné.

Tabulka 13 Výsledné hodnoty zkoušky stříhem

Vzorek	Maximální střížná síla svarů F_{\max} [N]
U01	62,60
U02	40,50
U03	55,10
U04	56,50
U05	47,60
L01	249,40
L02	127,00
L03	113,60
L04	142,40
L05	108,30



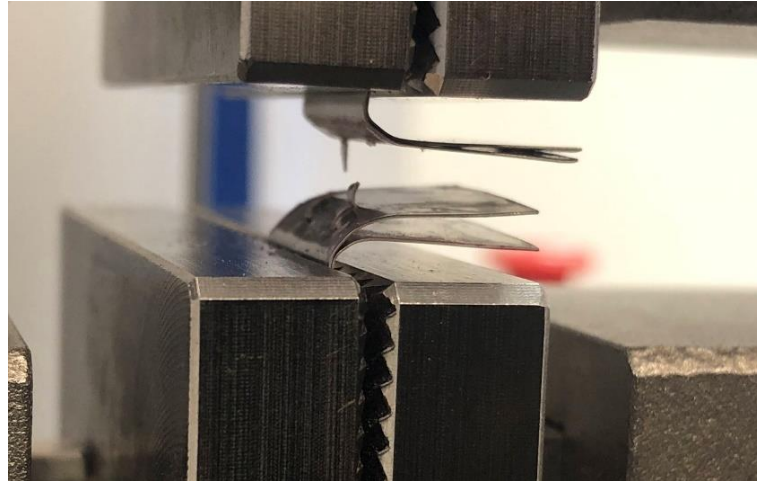
Obrázek 14.11 Graf naměřených hodnot maximální střížné síly

Zkouška u ultrazvukových svarů měla vždy stejný průběh, lom byl křehký. Svarový spoj byl v celé své ploše odloupen v nejkritičtějších místě mezi dvojicemi plechů (viz obrázek 14.12).



Obrázek 14.12 Střih ultrazvukového svaru

U laserových svarů se lom choval odlišně než u ultrazvukových svarů. Hlavním důvodem je odlišnost metod typů vzniku svarů (ultrazvuk – tlaková, laser – tavná). Při stříhové zkoušce laserového svaru se spoj postupně odtrhoval v okolí svaru (viz obrázek 14.13). Po odstřížení materiálu došlo k houževnatému lomu ve svaru. Toto chování dokazuje, že materiál byl svařen kvalitně a neúplné vyplnění materiálu ve svaru nemá na pevnostní vlastnosti zásadní vliv.



Obrázek 14.13 Střih laserového svaru

14.3 Zkouška mikrotvrdomosti

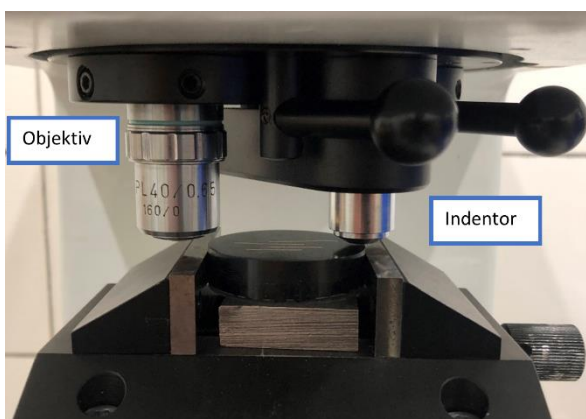
Poslední mechanickou zkouškou je měření mikrotvrdomosti ve svarovém spoji. Tato zkouška by měla prokázat vliv svařovací metody na vlastnosti základního materiálu. Podle výsledků by mělo být možné odhadnout budoucí chování svarového spoje, nebo odůvodnit vlastnosti stávajících svarů.

14.3.1 Zkušební zařízení zkoušky mikrotvrdomosti

Mikrotvrdomost byla měřena tvrdoměrem Buehler – IndentaMet 1100 Series Vickers (viz obrázek 14.14). Pro výzkum byl využíván objektiv PL40/0,65 160/0 (viz obrázek 14.15).



Obrázek 14.14 Tvrdoměr Buehler – IndentaMet 1100 Series Vickers



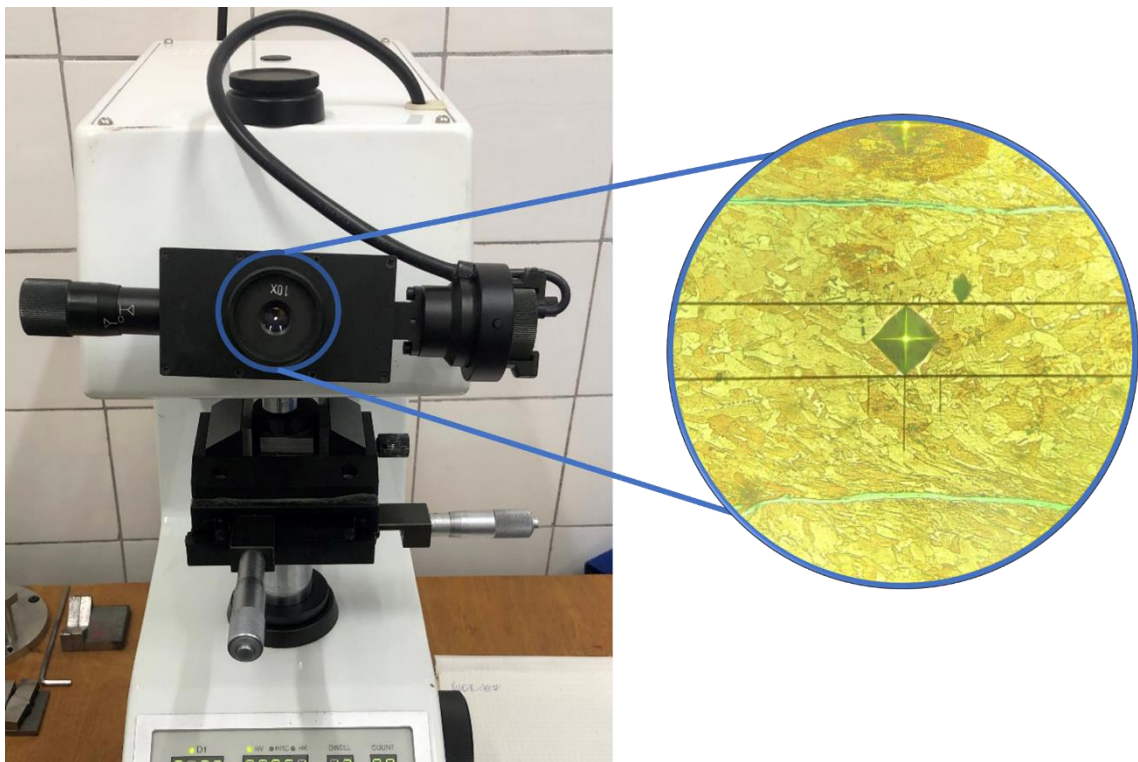
Obrázek 14.15 Použitý objektiv při měření mikrotvrdomosti

14.3.2 Popis zkoušky mikrotvrdomosti

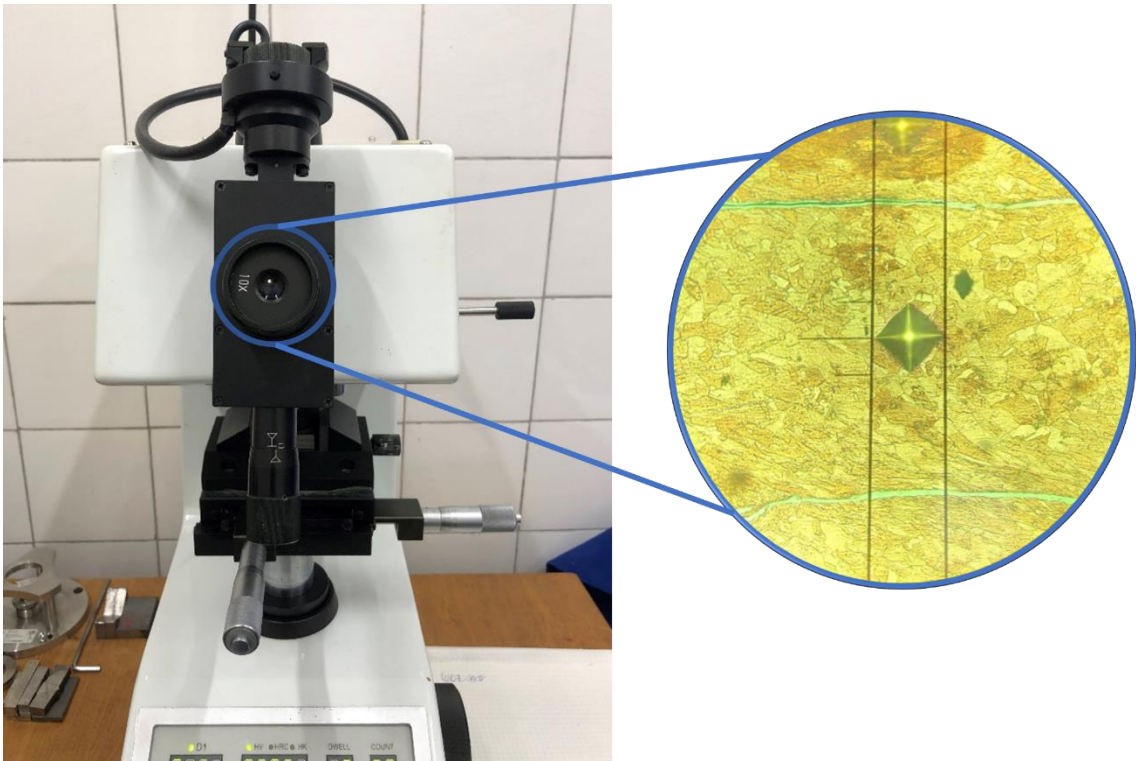
Zkouška tvrdosti navazuje na makroskopickou analýzu. Výbrus, poté co byl otestován pomocí optického mikroskopu, byl použit na měření mikrotvrdomosti. Prvním krokem bylo zvolení zkušebního zatížení, které nám říká, jak velkou silou se vtláčuje diamantový jehlan do testovaného vzorku. Síla byla nastavena na hodnotu 0,98 N a doba zatížení byla 12 s.

Dále bylo rozvrženo, kde přesně na svarovém spoji budou vpichy umístěny a jaký bude jejich počet (plán měření viz obrázek 14.19 – 14.22). Postup měření vypadal následovně:

1. Namíření do přesné polohy a aktivace vpichu,
2. Horizontální zaměření rohů vpichu a potvrzení polohy (viz obrázek 14.16),
3. Vertikální zaměření rohů vpichu a potvrzení polohy (viz obrázek 14.17),
4. Tvrdoměr automaticky dle naměřených úhlopříček vpichů dopočítá finální tvrdost v HV (viz obrázek 14.18).



Obrázek 14.16 Horizontální zaměření vpichu



Obrázek 14.17 Vertikální zaměření vpichu



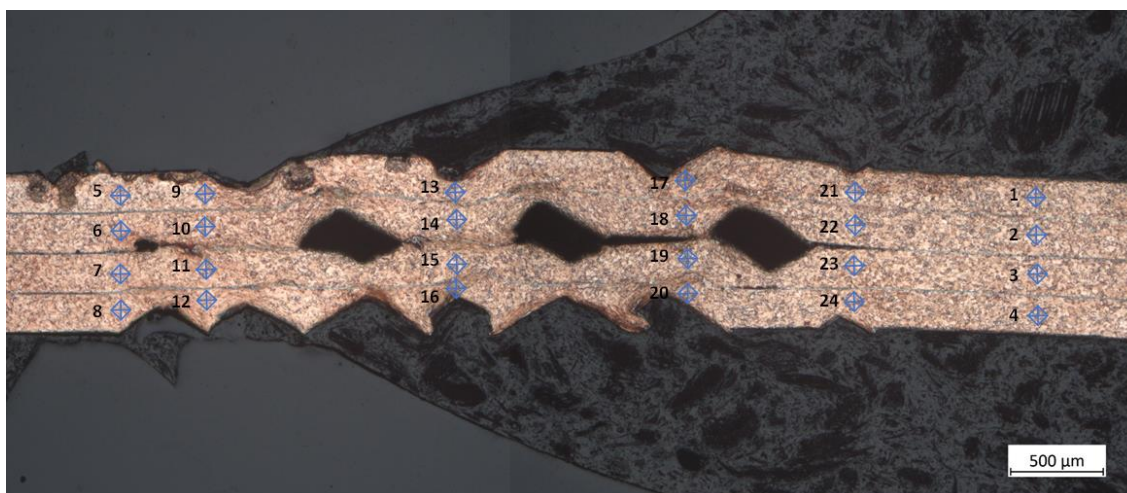
Obrázek 14.18 Tvrdoměr – ovládací deska, základní nastavení a číselné hodnoty výsledků

14.3.3 Výsledky zkoušky mikrotvrdosti

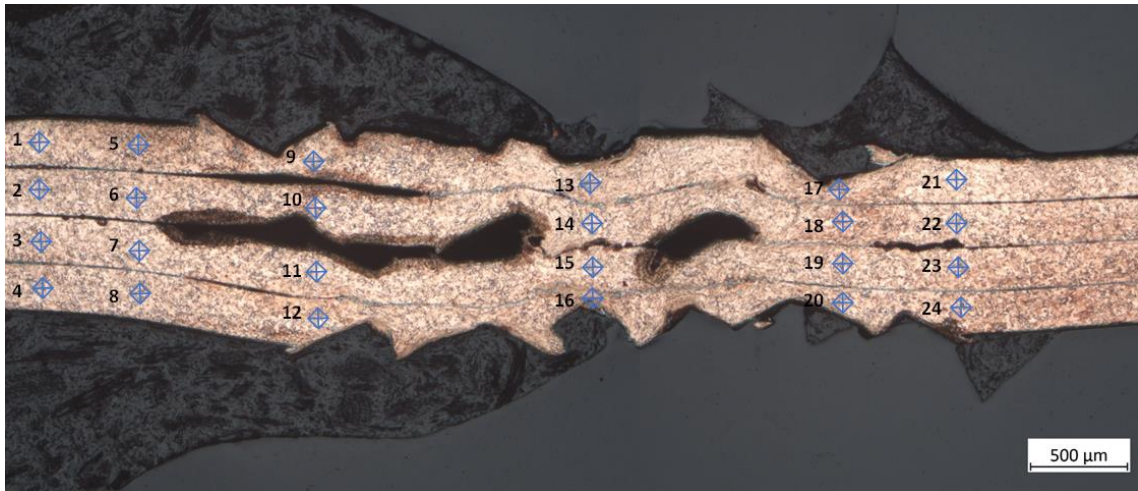
Veškeré naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulky 14 (dle očíslovaných vpichů podle plánu měření). Také jsou zde barvami vyznačeny ovlivněné oblasti svaru, podle legendy. Základní materiál má v průměru mikrotvrdost 74 HV0,1.

Tabulka 14 Hodnoty naměřených mikrotvrdostí dle plánu měření (obrázek 14.19 – 14.22)

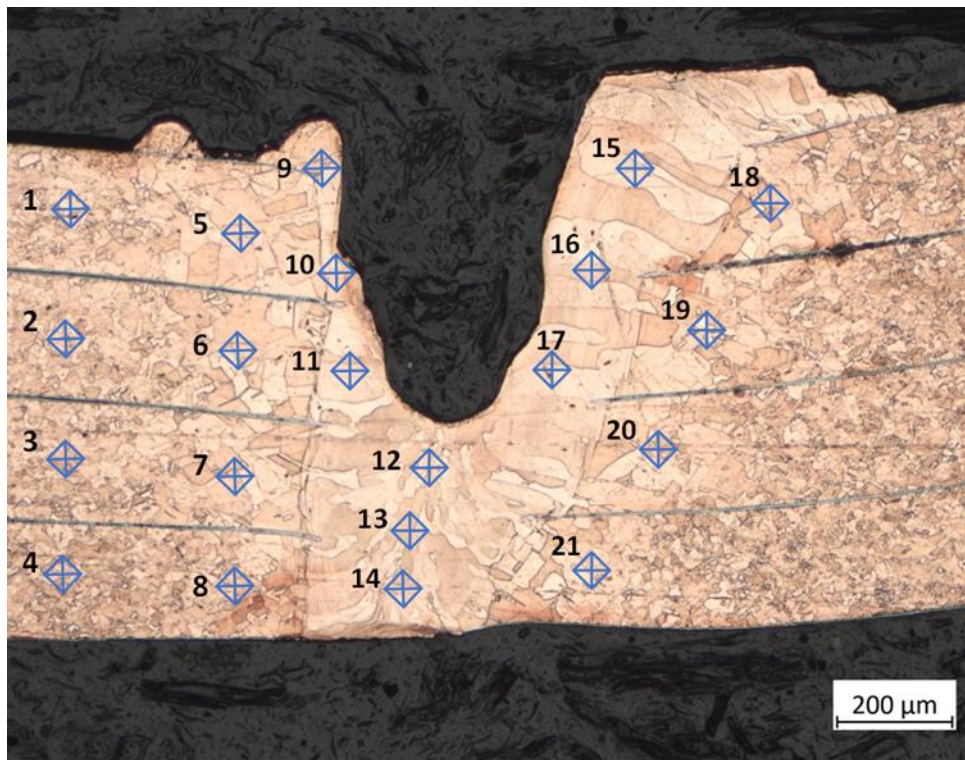
Poloha vpichu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U07 - 1	78,3	71,4	72,6	73,1	84,8	81,0	74,3	84,3	94,1	82,5	84,7	96,0
U07 - 2	76,0	76,0	80,2	80,8	89,0	90,0	91,2	92,4	94,5	92,0	96,2	84,8
L07 - 1	79,0	74,2	73,0	77,4	85,6	77,2	78,2	80,5	80,8	97,1	91,6	84,7
L07 - 2	67,8	67,8	71,4	72,3	74,3	71,3	67,9	71,2	68,2	71,0	72,9	67,9
Poloha vpichu	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
U07 - 1	87,6	94,5	85,9	97,8	91,8	104,4	95,6	83,1	76,5	71,4	73,3	74,2
U07 - 2	102,9	108,7	97,8	94,1	102,2	93,4	84,7	97,3	91,6	83,9	86,3	83,9
L07 - 1	84,1	83,8	87,4	85,8	96,9	85,9	86,7	79,3	80,7			
L07 - 2	71,7	58,0	67,8	74,9	81,5	68,3	73,0	78,2	74,0	74,5	72,4	
Legenda	Základní materiál											
	Svarový kov											
	Tepelně ovlivněná oblast											



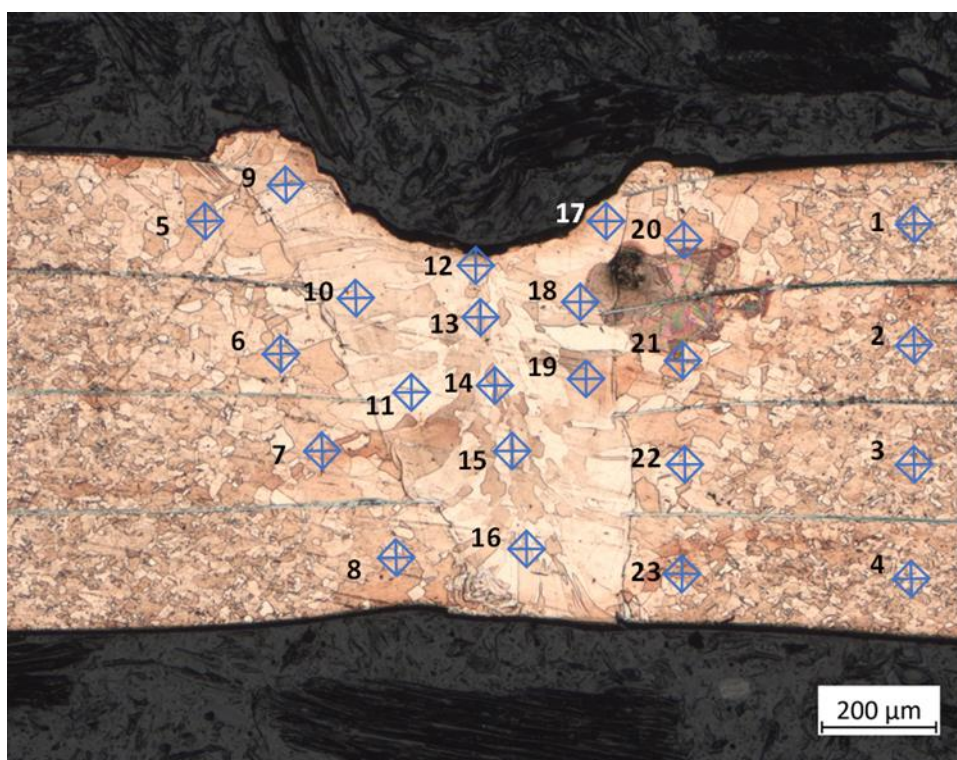
Obrázek 14.19 Plán měření mikrotvrdosti vzorku U07-1



Obrázek 14.20 Plán měření mikrotvrdosti vzorku U07-2



Obrázek 14.21 Plán měření mikrotvrdosti vzorku L07-1



Obrázek 14.22 Plán měření mikrotvrdosti vzorku L07-2

U ultrazvukových svarů je tvrdost v místech větších deformací menší než tvrdost základního materiálu. Například u vzorku U07-1 v poloze vpichu 18, v místě dotyku plechů dosahovala tvrdost hodnoty 108,4 HV01, což značí měkkost materiálu. I z tohoto důvodu mohlo dojít ke křehkému lomu při statické stříhové zkoušce (viz obrázek 14.19 a 14.20).

U laserových vzorků je patrné, že v materiálu došlo k tepelnému ovlivnění, protože tvrdost ve svaru byla nepatrně větší než u základního materiálu. Tepelně ovlivněná oblast svaru vykazuje obdobné hodnoty jako základní materiál, i přestože velikost zrna je znatelně větší. U vzorku L07-2 v poloze 15, tedy ve svarovém kovu, dosahovala tvrdost maximální hodnoty 58 HV0,1.

15 Závěr

V rámci diplomové práce byly svařeny vzorky z materiálu používaného jako vývody bateriových článků (čistá měď s niklovou povrchovou vrstvou o tloušťkách: měď 0,194 mm, nikl 2 x 0,007 mm). Tyto vzorky byly svařeny dvěma vybranými speciálními metodami svařování, a to ultrazvukovým a laserovým svařováním, do podoby přeplátovaných spojů.

Vytvořené série vzorků svarových spojů byly komplexně testovány. Provedeny byly nedestruktivní zkoušky (vizuální, kapilární a měření přechodového elektrického odporu) a destruktivní zkoušky (metalografická zkouška makrostruktury, zkouška mikrotvrdomosti a statická zkouška stříhem). Následně byly vyhodnoceny výsledky uvedených zkoušek a porovnány obě zkušební metody svařování.

Pro vzorky svařené ultrazvukem lze konstatovat:

- Proces svařování vzorků byl časově náročnější, pro lepší výsledky bylo nutné svařit vzorky ve třech operacích.
- Nižší nároky na bezpečnost svářeče v průběhu svařování.
- Vizuelní kontrola svarů se jevila bez vad, což kapilární zkouška potvrdila.
- Přechodový elektrický odpor dosahoval z důvodu větší plochy svaru nižší hodnoty než u vzorků svařených laserem.
- Metalografická zkouška ukázala nemalé dutiny svaru a studené spoje.
- Zkouška stříhem prokázala u ultrazvukového svaru nižší pevnost než u laserového.
- Lom po stříhové zkoušce byl křehký.
- Mikrotvrdomost v místě deformovaných plechů vykazovala nižší hodnoty tvrdosti, i toto může být jedna z indikací poklesu pevnostních charakteristik.

Pro vzorky svařené laserem lze konstatovat:

- Proces svařování vzorků byl jednodušší, jelikož bylo možné svařit všechny 4 plechy najednou. Proces svařování proběhl ve dvou operacích (2 bodové svary).

- Vyšší nároky na bezpečnost obsluhy při svařování (díky působení neionizujícího záření).
- Při vizuální kontrole je patrné neúplné vyplnění svarů, to také indikovala kapilární zkouška.
- Přechodový elektrický odpor vykazoval nepatrně vyšší hodnoty, což je způsobeno menší plochou svarového spoje.
- Metalografická zkouška potvrdila neúplné vyplnění svaru, nicméně to nemělo zásadní vliv na pevnost svaru (v porovnání s ultrazvukovými svary).
- Zkouška stříhem prokázala vyšší maximální střížnou sílu do přetržení, lom byl houževnatý.
- Mikrotvrdość byla v oblasti svaru vyšší, než dosahoval základní materiál, ale v tepelně ovlivněné oblasti má obdobné hodnoty jako základní materiál.

Při porovnání všech vlastností, které byly zjištěny při experimentech, se jeví jako lepší technologie pro svaření bateriových článků ruční laserové svařování. Nicméně budoucí stavba akumulátorové baterie už bude na další generaci studentů a autor DP pevně věří, že výsledky obsažené v této diplomové práci jim usnadní výběr technologie.

V rámci dalšího experimentu by mohla být více rozpracována analýza tepelného ovlivnění bateriových článků během svařování a u laserových vzorků by bylo vhodné změřit přechodový elektrický odpor se třemi svary.

16 Seznam použité literatury

- [1] FSE.X - garáž. In: *EForce FEE Prague Formula* [online]. c2017-2021 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/fse-x-new/>
- [2] Formula Student Germany - about. In: *FORMULA STUDENT GERMANY* [online]. [cit. 2022-11-31]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/about/concept/>
- [3] *EFORCE FEE PRAGUE FORMULA* [online]. Praha: eForce FEE Prague Formula, 2017 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/formula-student/>
- [4] FS-Rules 2023 v1.1.pdf. In: *FORMULA STUDENT GERMANY* [online]. Německo: FSG, 2005 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.1.pdf
- [5] Výzva: hospodárná a procesně bezpečná výroba vysoce výkonných lithium-iontových baterií pro elektromobilitu: Různé typy článků, stejné aplikace. In: *Trumpf* [online]. Praha: TRUMPF Praha, spol. s r.o., 2022 [cit. 2022-11-06]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/odvetvi/automobilove-odvetvi/e-mobility/bateriove-clanky-a-moduly/
- [6] MELANÇON, Stéphane. PRISMATIC CELLS VS. CYLINDRICAL CELLS: WHAT IS THE DIFFERENCE?. In: *Laserax* [online]. Kanada, 2022 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: https://www.laserax.com/blog/prismatic-vs-cylindrical-cells?fbclid=IwAR0kUwhjP1LpN_bqFq3ufMvnhF4JgLmw8tMwhwHROmOOhUlxd2J3ymloB0
- [7] BANKOLE, Oluwatosin, Chunxia GONG a Lixu LEI. Battery Recycling Technologies: Recycling Waste Lithium Ion Batteries with the Impact on the Environment In-View. *Journal of Environment and Ecology* [online]. 2013, 4(1), 14-28 [cit. 2022-12-03]. ISSN 2157-6092. Dostupné z: doi:10.5296/jee.v4i1.3257
- [8] BU-301a: Types of Battery Cells. In: *BATTERY UNIVERSITY* [online]. [cit. 2022-10-30].

- Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells>
- [9] PRISMATIC & POUCH BATTERY PACKS. In: *Epec: Engineered technologies* [online]. New Bedford: epec, 2016 [cit. 2022-11-06]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/batteries/prismatic-pouch-packs.html>
- [10] MUSTAFA LATIF ANSARI, Zeeshan. *Design and Control of Compact legged-wheeled robot "SPICAR"*. [online]. 113 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.10585.01123
- [11] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vydání. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [12] DAS, Abhishek, Dezhi LI, David WILLIAMS a David GREENWOOD. Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing. *World Electric Vehicle Journal* [online]. 2018, 9(2), 13 [cit. 2022-12-09]. ISSN 2032-6653. Dostupné z: doi:10.3390/wevj9020022
- [13] KOPEC, Bernard, Josef NEUGEBAUER a Pavel MAZAL. *Výrobní technologie a typické vady výrobků: (Basic) : studijní příručka*. 1. vydání. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s Českou společností pro NDT, 2020. ISBN 978-80-214-5878-9.
- [14] KOLEKTIV. *Technologie svařování a zařízení: Učební texty*. Draft 3. Brno: ANB Česká svařečská společnost, VUT v Brně, 2016.
- [15] NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC. *Základy strojírenské technologie I*. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06056-8.
- [16] ZHANG, Hongyan a Jacek SENKARA. *RESISTANCE WELDING*. 1st edition. London: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. ISBN 0-203-61639-1.
- [17] DAS, Abhishek, Dezhi LI, David WILLIAMS a David GREENWOOD. Weldability and shear strength feasibility study for automotive electric vehicle battery tab interconnects. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 2019, 41(1), 14 [cit. 2022-12-09]. ISSN 1678-5878. Dostupné z: doi:10.1007/s40430-018-1542-5

- [18] High Precision Manual DC Output Spot Welding Machine/Welder. In: *Xiamen Lith Machine Limited* [online]. Čína: Lith Corporation, 1998 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: https://www.lithmachine.com/high-precision-manual-dc-output-spot-welding-machine-welder_p836.html
- [19] TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvárania*. 1. vydání. Bratislava: Alfa, 1989. ISBN 80-05-00097-9.
- [20] AL-SARRAF, Ziad Shakeeb. *A study of ultrasonic metal welding*. United Kingdom, 2013. PhD thesis. University of Glasgow, College of Science and Engineering.
- [21] KOPÁČ, Dalibor. *Monitorizace svařovacích parametrů při ultrazvukovém svařování polyamidu*. Liberec, 2012. Disertační práce. TU v Liberci, Katedra strojírenské technologie.
- [22] *Dependence of weld amplitude on weld strength at ultrasonic welding of plastics: V CD s recenzovanými příspěvky z Mezinárodní Baťovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky ..* 1. vydání. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2011. ISBN 978-80-7454-013-4.
- [23] ONDERKA, Martin. *Procesní implementace ultrazvukového svařování*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, katedra technologií a měření.
- [24] How does your Ultrasonic Probe/Stack work?. In: *Dukane* [online]. USA [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.dukane.com/blog/2010/03/11/how-does-your-ultrasonic-probestack-work/>
- [25] DUŠEK, Jiří. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. In: *MEGABLOG* [online]. [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
- [26] LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ. In: *LaserTherm* [online]. c2019-2022 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu>
- [27] SPOJOVÁNÍ BATERIOVÝCH ČLÁNKŮ ZA POMOCI LASERU. In: *LINTECH* [online]. [cit.

- 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/novinky/spojovani-bateriovych-clanku-za-pomoci-laseru/>
- [28] PARK, Mingon a Yoshinori HIRATA. Research on generation of micro-plasma arc and its power intensity. *Welding International* [online]. 2016, **31**(4), 284-290 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0950-7116. Dostupné z: doi:10.1080/09507116.2016.1223214
- [29] Micro Arc Welding Torch. In: *AMADA WELD TECH* [online]. [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.amadaweldtech.eu/products/micro-tig-welding/micro-arc-welding-torch-macgregor>
- [30] MUSIL, Miloslav a Jaromír MORAVEC. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: výukové materiály pro kurzy Mezinárodní svářečský inženýr IWE, Mezinárodní svářečský technolog IWT*. Česká Třebová: DOM - ZO 13, 2017. ISBN 978-80-906720-0-0.
- [31] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [32] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: přístroje a metody*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1717-6.
- [33] KOLAŘÍKOVÁ, Marie. *Svařování vysokopevných manganborových ocelí elektrickým odporem a vliv povrchových úprav na jejich svařitelnost*. Praha, 2019. Habilitační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [34] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [35] *Materiály a jejich chování při svařování*. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, 2016. ISBN 115406.
- [36] ČSN EN ISO 6507-1 (420374). *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Aktuální vydání. 2018.
- [37] ČSN EN ISO 9015-2. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení*

- tvrdosti - Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů*. 2018.
- [38] HAINC, Petr. *Návrh elektroniky pro akumulátorovou baterii elektromobilu*. Praha, 2021. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Vít Záhlava, CSc.
- [39] MED, Josef. *Návrh materiálů pro akumulátorový box - Formula Student*. Praha, 2020. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.
- [40] Products: EpoFix Kit. In: *Struers* [online]. United States: Struers LLC [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: [https://e-shop.struers.com/DK/EN/products/Mounting/Cold_mounting_resin/EpoFix_Kit_1_I_resin_130_ml_hardener_and_required_consumables\(40200029\).aspx](https://e-shop.struers.com/DK/EN/products/Mounting/Cold_mounting_resin/EpoFix_Kit_1_I_resin_130_ml_hardener_and_required_consumables(40200029).aspx)
- [41] Vybavení: Laboratoř metalografie, Laboratoř světelné mikroskopie. In: *Fakulta strojní ČVUT v Praze* [online]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ustavy/sekce-ustav-materialoveho-inzenyrstvi/sekce-ustav-materialoveho-inzenyrstvi-12132/odborna-cinnost-12132/vybaveni-12132/>
- [42] RUČNÍ SPEKTROMETR A RUČNÍ ANALYZÁTOR KOVŮ DELTA PROFESSIONAL. In: *BAS Radlice* [online]. Radlice [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: https://www.bas.cz/innov-x-systems/rucni_analyzator_kovu_delta_professional.php
- [43] RUČNÍ LASEROVÁ SVAŘEČKA. In: *LaserTherm* [online]. c2019-2022 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/produkty/rucni-laserova-svarecka>

Seznam Obrázků

Obrázek 2.1 Elektrický pilotovaný FSE.X a autonomní monopost DV.01 [zdroj: archiv eForce]	14
Obrázek 2.2 Model kolové zástavby s popisky [zdroj: archiv eForce]	15
Obrázek 4.1 Průřez cylindrickým Lithium-iontovým článkem [7].....	20
Obrázek 4.2 Populární Lithium-iontový cylindrický článek 18650 [8]	20
Obrázek 4.3 Průřez prizmatickým článkem [8]	21
Obrázek 4.4 Prizmatický článek [5].....	21
Obrázek 4.5 Průřez sáčkového článku [10].....	22
Obrázek 4.6 Sáčkový článek [5]	22
Obrázek 5.1 Schéma odporového bodového svařování [13] a) schéma uspořádání: 1 – svařované materiály, 2 – elektrody, 3 – primární a 4 – sekundární vinutí b) průběh teplot: α – po uplynutí 0,02 s, β – po uplynutí 0,1 s 25	
Obrázek 5.2 Ilustrace odporového bodového svařování, a) schéma svařovacího systému b) svařování baterií [16]	26
Obrázek 5.3 Příklad bodové svářečky – LITH-HDP-3000 [17]	26
Obrázek 5.4 Přehled materiálů pro ultrazvukové kovové svařování [19]	27
Obrázek 5.5 Schéma ultrazvukového svařování [16].....	30
Obrázek 5.6 Sestava ultrazvukového nástroje [23]	31
Obrázek 5.7 Optický rezonátor [13].....	32
Obrázek 5.8 Výměny energie probíhající v atomech a molekulách [13]	33
Obrázek 5.9 Princip laseru [13].....	34
Obrázek 5.10 Schématické zobrazení vláknového laseru [25]	35
Obrázek 5.11 „Hluboké“ svařování laserem [26]	36
Obrázek 5.12 Svařování niklových pásků k bateriovým cylindrickým článkům [27]	37
Obrázek 5.13 AMADA Micro Arc Welding Torch – ruční svařovací zařízení, hořák na použití svařování bateriových článků [29]	38
Obrázek 5.14 Aplikace svařování metodou mikro TIG	38
Obrázek 6.1 Čtyřsvorkové zapojení pro měření malých odporů [32]	41
Obrázek 6.2 Měření odporu vodičů [32]	41
Obrázek 7.1 Typy porušení vzorků při stříhové zkoušce [33]	43

Obrázek 7.2 Svar a tepelně ovlivněné oblasti [14]	44
Obrázek 7.3 Princip zkoušky, geometrie vnikacího tělesa a vpichu podle Vickerse	46
Obrázek 7.4 Příklad ukazující oblasti vpichů, čísla v kroužcích se odvolávají na umístění vpichů [37]	47
Obrázek 8.1 Fotografie akumulátorové baterie monopostu FSE.X	49
Obrázek 8.2 Model jednotlivého stacku s BMS deskami	49
Obrázek 9.1 Bateriový článek Melasta SLPBA9421	50
Obrázek 9.2 Připravený výbrus na měření mikroskopem	51
Obrázek 9.3 Hodnoty naměřené pomocí mikroskopu	51
Obrázek 9.4 Pracoviště pro měření mikroskopem na UMI	51
Obrázek 9.5 Ruční RTG spektrometr [42]	52
Obrázek 9.6 Měď spektrum	53
Obrázek 9.7 Nikl spektrum	53
Obrázek 10.1 Propojení 4 plechů ultrazvukový svarem	54
Obrázek 10.2 Výkres tvaru vzorku pro experimentální svarové spoje	56
Obrázek 10.3 Základní materiál	56
Obrázek 11.1 Kompletní ultrazvuková svařovací sestava s popisem	57
Obrázek 11.2 Titanová sonotroda s viditelnou dosedací plochou	58
Obrázek 11.3 Hliníkové lože s viditelnou dosedací plochou	58
Obrázek 11.4 Svařený vzorek U01	59
Obrázek 11.5 Příprava před svařováním ultrazvukem	59
Obrázek 11.6 Výsledné svařené vzorky ultrazvukem U01 – U07	59
Obrázek 12.1 LARISA A1500– laserová ruční inteligentní svářečka [43]	61
Obrázek 12.2 Bezpečnostní ochranné brýle proti laserovému záření	62
Obrázek 12.3 Bezpečnostní pojistka ve dveřích	62
Obrázek 12.4 Připravené plechy pro svařování s 3D přípravkem	63
Obrázek 12.5 Zaměření pointeru, před svařováním vzorku L01	63
Obrázek 12.6 Při svařování vzorku L01	63
Obrázek 12.7 Výsledné svařené vzorky ručním laserovým svařováním L01 – L07	63
Obrázek 13.1 Měření intenzity osvětlení pomocí Luxmetru Light meter LX-113S	64
Obrázek 13.2 Pomůcky potřebné pro realizaci kapilární zkoušky metodou barevné indikace	65

Obrázek 13.3 Vzorky svažené laserem, po nanesení penetrantu.....	66
Obrázek 13.4 Vzorky svažené ultrazvukem. Horní řada – přední strana vzorků. Spodní řada – zadní strana.....	66
Obrázek 13.5 Vzorky svažené laserem. Horní řada – přední strana vzorků. Spodní řada – zadní strana.....	67
Obrázek 13.6 Zdroj Elektro Automatick PSI9080-170	68
Obrázek 13.7 Proudová sonda Teledyne 500 A.....	68
Obrázek 13.8 Multimetr Fluke 8845 A.....	68
Obrázek 13.9 Digitální osciloskop Rohde&Schwarz RTH1004.....	68
Obrázek 13.10 Základní materiál s vyznačenými vzdálenostmi pro měření	69
Obrázek 13.11 Připravené vzorky s ohnutými plechy	69
Obrázek 13.12 Měřicí pracoviště v laboratoři Porsche Engineering + detail měření čtyřsvorkovou metodou.....	69
Obrázek 13.13 Porovnání výsledných hodnot přechodového elektrického odporu.....	71
Obrázek 13.14 Graf se směrodatnými odchylkami měření přechodových el. odporů vzorků U01-U06	71
Obrázek 13.15 Graf se směrodatnými odchylkami měření přechodových el. odporů vzorků L01-L06	72
Obrázek 14.1 Metalografický lis Struers CitoPress-1.....	74
Obrázek 14.2 Leštička Buehler Beta s hlavou Vector	74
Obrázek 14.3 Metalografický vzorek zadní strana s pojmenovanými částmi	75
Obrázek 14.4 Metalografický vzorek přední (zkoumaná) strana	75
Obrázek 14.5 Laboratorní pracoviště, kde byla vyhodnocena makrostruktura svarů, - mikroskop Carl Zeiss Axio Observe d1m (na levé straně obrázku) - PC se SW ZEN pro hodnocení výstupu z mikroskopu	75
Obrázek 14.6 Makrostruktura ultrazvukového spoje U07-1	76
Obrázek 14.7 Makrostruktura ultrazvukového spoje U07-2	76
Obrázek 14.8 Makrostruktura laserového svarového spoje L07-1	77
Obrázek 14.9 Makrostruktura laserového svarového spoje L07-2.....	78
Obrázek 14.10 Laboratorní pracoviště ve firmě Dukane, kde proběhla mechanická zkouška stříhem	79
Obrázek 14.11 Graf naměřených hodnot maximální střižné síly	80

Obrázek 14.12 Střih ultrazvukového svaru	81
Obrázek 14.13 Střih laserového svaru	81
Obrázek 14.14 Tvrdoměr Buehler – IndentaMet 1100 Series Vickers	82
Obrázek 14.15 Použitý objektiv při měření mikrotvrdosti	82
Obrázek 14.16 Horizontální zaměření vpichu	83
Obrázek 14.17 Vertikální zaměření vpichu	84
Obrázek 14.18 Tvrdoměr – ovládací deska, základní nastavení a číselné hodnoty výsledků	84
Obrázek 14.19 Plán měření mikrotvrdosti vzorku U07-1	85
Obrázek 14.20 Plán měření mikrotvrdosti vzorku U07-2	86
Obrázek 14.21 Plán měření mikrotvrdosti vzorku L07-1	86
Obrázek 14.22 Plán měření mikrotvrdosti vzorku L07-2	87

Seznam Tabulek

Tabulka 1 Specifikace FSE.X [1]	15
Tabulka 2 Bodové hodnocení všech disciplín [4]	18
Tabulka 3 Výhody a nevýhody spojovacích metod bateriových článků [12].....	23
Tabulka 4 Parametry odporového bodového svařování	26
Tabulka 5 Rozsahy zkušebního zatížení [36].....	46
Tabulka 6 Specifikace článku a akumulátoru monopostu FSE.X [3; 38]	48
Tabulka 7 Zkreslené hodnoty z měření ručního spektrometru	52
Tabulka 8 Výsledné hodnoty z analýzy základních materiálů.....	54
Tabulka 9 Parametry nastavení	59
Tabulka 10 Technické charakteristiky laserového zdroje LARISA A1500 [43]	61
Tabulka 11 Parametry laserového svařování.....	63
Tabulka 12 Spočítané výsledné hodnoty	70
Tabulka 13 Výsledné hodnoty zkoušky stříhem	80
Tabulka 14 Hodnoty naměřených mikrotvrdotí dle plánu měření (obrázek 14.19 – 14.22)	85

Seznam příloh

Příloha 1: Tabulka 15 Naměřené hodnoty přechodového elektrického odporu

Příloha 2: Video průběhu statické zkoušky stříhem, přiložené na CD