



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

BATERIOVÝ BOX PRO ELEKTROMOBIL

BATTERY BOX FOR AN ELECTRIC CAR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Bc. Jaroslav List

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2020



Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Jaroslav List
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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

Bateriový box pro elektromobil

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Automobilový průmysl řeší, jak zvýšit dojezdové vzdálenosti elektromobilů. Tento již nastartovaný vývoj vyžaduje postupné zodpovězení velkého množství dílčích technologických otázek. Jednou z nich je: "Jak a kam umístit co nejvíce baterií do elektromobilu VUT SUPEREL II – Škoda Superb 2. generace?"

Cíle diplomové práce:

- Analýza prostor elektromobilu vhodných pro umístění baterií.
- Konstrukční 3D návrh boxu na baterie, které bude možné umístit na vozidle s ohledem na úchytné body a vedení vodičů.
- Volba vhodného materiálu a technologie pro výrobu navrženého boxu na baterie.
- Stručné ekonomické zhodnocení navrhovaných variant řešení.

– Vytvoření článku s hlavními body řešení závěrečné práce a publikování v odborném tisku.

Seznam doporučené literatury:

MOURITZ, Adrian P. Introduction to aerospace materials. Oxford u.a: Woodhead Publ. Limited, 2012.

ISBN 978-085-7095-152.

SHEIKH-AHMAD, Jamal Y. Machining of polymer composites. London: Springer, 2009.

ISBN 978038-7355-399.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty



ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem bateriového boxu s lithium-iontovou technologií, pro co největší dojezd elektromobilu VUT SuperEL II. Na základě analýzy prostor elektromobilu a parametrů elektronické soustavy, byla navržena maximální velikost celé sestavy baterií 84s130p. Byly vybrány články 18650 s technologií NMC z důvodu velmi vysoké gravimetrické i volumetrické hustoty, která dosahuje 274 Wh/kg a 564 kWh/ m³. Celková nominální kapacita navržených bateriových boxů v elektromobilu činí 138 kWh. Celková gravimetrická energetická hustota navrženého boxu činí 215,6 Wh/kg. Umožňuje elektromobilu teoretický dojezd při spotřebě 14 kWh/100 km téměř 1000 km. Jednotlivé bateriové moduly bateriového boxu jsou řízeny pro optimální provozní podmínky pomocí BMS.

Celková sestava je rozdělena na pět bateriových boxů. Tyto boxy jsou vyráběny technologií ohýbaných svařovaných plechů ze slitiny hliníku EN AW 1050A a oceli 1.4301. Byly provedeny MKP analýzy pro ověření mechanické únosnosti navržené konstrukce.

Práce se také zabývá návrhem bateriových modulů a jejich zapojením.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektromobil, bateriový box, li-ion, elektromobilita

ABSTRACT

This thesis deals with the design of a battery box with lithium-ion technology, for the largest possible driving range of the BUT SuperEL II electric car. Based on the analysis of the electric vehicle available space and the parameters of the electronic system, the maximum size of the entire set of 84s130p batteries was designed. 18650 cells with NMC technology were selected due to the very high gravimetric and volumetric density, which reaches 274 Wh/kg and 564 kWh/m³. The total nominal capacity of the designed battery boxes in the electric car is 138 kWh. The total gravimetric energy density of the designed box is 215.6 Wh/kg. It allows the electric car to reach the theoretical range with a consumption of 14 kWh/100 km of almost 1000 km. The individual battery modules of the battery box are controlled for optimal operating conditions by means of a BMS.

The whole set is divided into five battery boxes. These boxes are manufactured using the technology of bent welded sheets from aluminum alloy EN AW 1050A and steel 1.4301. FEM analyzes were performed to verify the mechanical strength of the designed structure. The work also deals with the design of battery modules and their connection.

KEYWORDS

electric car, battery pack, li-ion, electromobility



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LIST, Jaroslav. *Bateriový box pro elektromobil*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124365>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.



PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Aleši Polzerovi, Ph. D. za konstruktivní připomínky a vedení práce. Dále Ing. Jaromírovi Marušincovi, Ph. D., MBA za poskytnutí automobilu, zázemí a odborných rad v průběhu práce. A Ing. Václavu Nečasovi z firmy VN machinery s.r.o. za rady a konzultace při návrhu výroby.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Aleše Polzera, Ph.D. a Ing. Jaromíra Marušince, Ph.D. MBA. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

OBSAH

ÚVOD	15
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
1.1 Akumulátory pro trakční aplikace	17
1.1.1 Olověný akumulátor	18
1.1.2 Nikl-kadmiový akumulátor NiCd	19
1.1.3 Lithium-iontový bateriový článek	20
1.1.4 Rozdělení lithium-iontových článků	21
1.2 Spojování bateriových článků	26
1.2.1 Pájení	26
1.2.2 Bodové odporové svařování	28
1.2.3 Ultrazvukové svařování	30
1.2.4 Svařování laserovým paprskem	31
1.2.5 Porovnání technologií spojování článků	32
1.3 Bateriové boxy	33
1.3.1 Bateriový box Škoda SuperEl II	33
1.3.2 Bateriový box Škoda superb iV	37
1.3.3 Bateriový box Tesla Model S 85D	40
1.4 Technický popis automobilu SuperbEL II	47
1.4.1 Karoserie vozidla	47
1.4.2 Hmotnost vozidla	47
1.4.3 Elektrický motor	48
1.4.4 Elektrické schéma zapojení SuperbEL II	50
1.4.5 Popis úprav pro elektrický pohon	50
2 NÁVRH BATERIOVÉHO BOXU	52
2.1 Porovnání a výběr bateriových článků	53
2.2 Analýza prostor automobilu VUT SuperEL II	55
2.3 Návrh elektronických parametrů bateriového boxu	57
2.3.1 Výpočet maximálního počtu baterií pro uložení v boxech	58
2.3.2 Výpočet kapacity bateriového boxu	61
2.4 Návrh modulu bateriového boxu	61
2.4.1 Spojování článků v modulu	63
2.4.2 Pojistka bateriových článků	64
2.4.3 Obal a izolace modulů	65
2.4.4 Battery management systém BMS	66

2.5	Návrh výroby bateriových boxů	66
2.5.1	Výběr materiálu pro boxy	67
2.5.2	Dělení materiálu	68
2.5.3	Ohýbání plechů	70
2.5.4	Svařování boxů	75
2.5.5	Povrchové úpravy	78
2.6	Přehled navržených bateriových boxů	79
2.7	Pevnostní analýza bateriových boxů	84
2.7.1	Bateriový box 2	85
2.7.2	Bateriový box 3	89
2.7.3	Bateriový box 4	93
3	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ NÁVRHU	98
3.1	Cena materiálu pro výrobu boxů	98
3.2	Cena bateriových článků	99
3.3	Cena za práci	99
3.4	Shrnutí ekonomického zhodnocení	100
ZÁVĚR		101
4	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	103
5	SEZNAM PŘÍLOH	107

ÚVOD

Vysokovýkonné, bezpečné a levné bateriové boxy jsou klíčem pro masové rozšíření elektricky poháněných vozidel (BEV) na světě a snížení produkce skleníkových plynů při zachování podmínky používání vhodných zdrojů pro produkci elektřiny.

Elektrický pohon, pokud je dobíjený z obnovitelných zdrojů nebo jaderných elektráren, neprodukuje žádné škodlivé emise. Také generuje nízkou hladinu hluku a v porovnání s automobily se spalovacím motorem několikanásobnou účinnost. Celková sestava baterie a motoru je také mnohem konstrukčně jednodušší a obsahuje méně pohyblivých součástí a není nutné pohonnou jednotku pravidelně servisovat každých několik tisíc najetých kilometrů. Avšak slabým článkem elektromobility jsou baterie. Mezi problémy patří v dnešní době nízká kapacita baterií, a tedy i nízký dojezd BEV (200-480 km), pomalé dobíjení, vysoká hmotnost baterií a vyšší pořizovací cena v porovnání s klasickými vozy se spalovacím motorem (ICE).

Elektromobilita v posledních letech zažívá “boom”. Firmy z automobilového průmyslu se předhánají, kdo přivede na trh více modelů automobilů poháněných elektrickou energií. Zejména v posledních pěti letech se značně vylepšily technologie lithium-iontových baterií, a to umožňuje elektromobilům začít konkurovat konvenčním ICE automobilům.

Avšak převádět technologie z prostředí vývojových laboratoří do sériové výroby není snadné a toto je stále velkou výzvou. Z hlediska vývoje baterií jsme stále na počátku rostoucí křivky, a to dává elektromobilitě velký potenciál do budoucna.

Vůz Super EL II, který vznikl před deseti lety na půdě VUT a kterým se budu ve své práci zabývat patří do kategorie BEV. Jde tedy o automobil s plně elektrickým pohonem, který energii skladuje v bateriích. Cílem práce je zkonstruovat bateriový box, postavený na lithium iontové technologii, který by automobilu umožnil dojezd na jedno nabití až 1000 km. Se zachováním jízdních vlastností vozu, bezpečnosti a pohodlí cestujících.

Návrh bateriového boxu je multioborová disciplína. Je třeba brát v potaz poznatky z termomechaniky, elektroniky, chemie, mechaniky a výrobních technologií. Je třeba zvolit vhodné bateriové technologie, s co největší energetickou hustotou, uspořádat je v automobilu s ohledem na proporce baterie, rozložení hmotnosti ve vozidle, bezpečnost a další okrajové podmínky.

Jako nejvhodnější kandidát se jeví baterie typu li-ion neboli lithium iontová typ 18650. Po zapojení potřebného množství článků do série dodává vhodné vysoké napětí pro napájení motoru. Baterie má vysokou energetickou hustotu až 274 Wh/kg, nemá tzv. paměťový efekt a dokáže pracovat s minimálním snížením kapacity mnoho stovek hlubokých cyklů.

Toto řešení však potřebuje neustálý monitoring a balancování napětí mezi jednotlivými články a bateriovými moduly. Tento systém se nazývá Battery management systém (BMS).

Kritickým parametrem je volba vhodné technologie výroby a materiálů pro výrobu samotného boxu. Bateriový box musí splňovat pevnostní požadavky, mít nízkou hmotnost a dobrou korozivzdornost. Materiál musí umožňovat dobrou svařitelnost a tvářitelnost s ohledem na komplikovaný prostor automobilu [1].

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Tato kapitola shrnuje vhodné a dostupné technologické řešení akumulátorů pro pohon automobilů s elektrickým pohonem. V druhé části kapitoly jsou podrobně popsány parametry a technologie vybraných bateriových boxů, které se dnes vyrábí pro potřeby automobilového průmyslu. Konkrétně je zde popsán bateriového boxu nového hybridního automobilu Škoda Superb iV, Tesla model S a starého bateriového boxu elektromobilu VUT Superb EL II, který je předmětem této práce.

1.1 Akumulátory pro trakční aplikace

Akumulátory pro trakční aplikace se od běžně používaných akumulátorů liší svou konstrukcí, použitými technologiemi a parametry. Tyto odpovídají zvýšeným požadavkům na provoz těchto akumulátorů. Pokud si porovnáme baterie určené pro EV a klasické baterie pro běžné a industriální použití, dojdeme k závěru, že na baterie pro EV jsou kladeny mnohem vyšší nároky. Tyto baterie musí splňovat celou řadu požadavků, jako velmi vysoká kapacita a hustota energie na kilogram, vysoká odolnost proti cyklování, bezpečnost, možnost velmi rychlého dobíjení, vysoká životnost (>8 let) a také zachování kapacity ve velkém rozsahu teplot (-20 až 45 °C). U industriálních baterií určených pro ukládání elektrické energie nás zajímá pouze jejich odolnost proti cyklování, ve výjimečných případech výše energetické hustoty. Hlavním požadavkem je jejich škálovatelnost a vyměnitelnost, což je kontrastem k EV bateriím, kde jsou články uzavřené v modulech, celá baterie je navrhnutá s ohledem na složitý tvar automobilu a primární cíl designu je ve snížení váhy a zabíraného prostoru bateriemi [1].

Požadavky na trakční akumulátory si můžeme obecně shrnout do několika bodů:

- Vysoká kapacita
- Vysoká gravimetrická hustota energie v bateriových člancích
- Nízká hmotnost
- Odolnost proti vysoko cyklickému hlubokému vybíjení
- Bezúdržbový provoz
- Schopnost dodávat vysoký výkon po dlouhou dobu
- Vysoká životnost – vysoký počet pracovních cyklů
- Bezpečnost
- Absence paměťového efektu

Akumulátorů existuje na trhu celá řada. Od nejstarších, ale také nejrozšířenějších a nejpoužívanějších olověných, až po nejnovější experimentální články na bázi lithia a síry. V této kapitole budou představeny nejrozšířenější typy a budou popsány výhody a nevýhody jednotlivých typů technologií vzhledem k našemu použití v elektromobilu Superb EL II.

1.1.1 Olověný akumulátor

Olověný akumulátor je galvanický článek s elektrodami na bázi olova. Kladnou elektrodu tvoří oxid olova a zápornou olovo. Tyto elektrody jsou ponořené do kapalného elektrolytu, který umožňuje vznik elektro – chemické reakce. Chemický proces, který vzniká při nabíjení a vybití je vratný. Napětí jednoho článku je 2 V. Aby trakční akumulátory vydržely hluboké a časté vybití, obsahují mohutnější elektrody než klasické startovací akumulátory, které známe z automobilů. Elektrolytem je u tohoto typu akumulátoru použit koncentrovaný tekutý roztok kyseliny sírové. Koncentrace kyseliny sírové variuje na stavu nabití akumulátoru (u plně nabitého akumulátoru jde o hodnotu přibližně 35 %). Tento akumulátor má v současné době majoritní podíl na trhu jako startovací akumulátor u automobilů, to především díky nízké ceně a výborné schopnosti dodávat několika násobně vyšší proudy než nominální po krátkou dobu.

Olověné akumulátory jsou jedny z nejvíce toxických akumulátorů právě díky obsahu kyseliny sírové. Od objevu olověného akumulátoru uběhlo již bezmála 150 let, díky tomu se vlastnosti, ale i rozměry a hmotnost tohoto akumulátoru značně vylepšily. Dnešní olověné akumulátory, díky moderní technologii, obsahují například speciální mřížky, které jsou z elektrochemických slitin olova a do těchto mřížek jsou zalisovány aktivní hmoty. U těchto akumulátorů je značnou nevýhodou sulfatace (úbytek kapacity na akumulátoru). Sulfatace vzniká, pokud je akumulátor delší dobu nepoužíván a je uskladněn ve vybitém stavu. Při tomto procesu dochází ke vzniku krystalického síranu olovnatého, který vznikl při vybití na elektrodách. Proto je třeba akumulátor udržovat hlavně při delším nepoužívání v nabitém stavu. Poté netrpí stárnutím. Kapacitu takto zasaženého akumulátoru je možno částečně obnovit procesem zvaným de-sulfatace. Tento proces spočívá nabíjením akumulátoru speciální nabíječkou, která nabíjí pomocí krátkých pulsů při větším proudu a tím odstraňuje krystaly síranu olovnatého.

V dnešní době některé moderní olověné akumulátory obsahují speciální anti-sulfatační úpravu, ta výrazně snižuje riziko sulfatace. Olověné akumulátory můžeme dělit na údržbové, bezúdržbové, a navíc podle technologie výroby [2, 3].

Tab. 1 Výhody a nevýhody olověných akumulátorů.

Výhody	Nevýhody
Nízká cena	Vysoká hmotnost
Masově rozšířená technologie	Nízká hustota energie (40 Wh/kg)
Nízký vnitřní odpor	Nízká účinnost nabíjení (70 %)
Vysoký proud (krátkodobě)	Toxické olovo
	Nízká životnost

1.1.2 Nikl-kadmiový akumulátor NiCd

Jednou z hlavních předností tohoto typu akumulátoru je možnost skladování ve zcela vybitém stavu, z toho plyne i odolnost vůči úplnému vybití. Další výhodou těchto akumulátorů je jejich vysoká proudová zatížitelnost a schopnost funkce i v extrémních klimatických podmínkách (téměř až do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Naopak jednou z velkých nevýhod je, že NiCd akumulátor trpí paměťovým efektem. Tento efekt vzniká při opakovaném vybíjení na malou stejnou hloubku vybití (50 až 100x).

Vysvětlením je změna krystalové struktury na záporné elektrodě (usazují se kovové krystalky). Nutno podotknout, že tento jev je reverzibilní a odstraníme ho plným vybitím akumulátoru. U akumulátorů, kde kadmium není aktivní složkou záporné elektrody, se s paměťovým efektem téměř nesetkáváme. Velkým problematickým rysem tohoto akumulátoru je především velká jedovatost kadmia (toxický těžký kov), nesmí být tedy použity tam, kde by únik kadmia způsobil katastrofální následky. Díky tomu je tento typ akumulátoru postupně nahrazován typy akumulátorů, které nejsou tak nebezpečné pro životní prostředí. Díky spolehlivosti ovšem mají stále své uplatnění například ve vojenské a kosmické technologii. Akumulátor typu NiCd se dále používá například v akumulátorových vrtačkách, jelikož typickým rysem a výhodou je relativně malá změna napětí v průběhu vybíjení, což znamená, že napětí je téměř po celou dobu vybíjení konstantní, a to téměř až do plného vyčerpání kapacity.

Pro trakční a staniční účely jsou akumulátory vyráběny se zaplavenými elektrodami a kapalným elektrolytem. Tento typ akumulátoru řadíme mezi tzv. galvanické články. Napětí jednoho článku je 1,2 V. Akumulátor NiCd obsahuje kladnou elektrodu, ta je tvořena z hydroxidu niklu, dále pak zápornou elektrodu, která je tvořena naopak z kovového kadmia (Cd). Mezi elektrodami je vložen separátor, obsahující elektrolyt (hydroxid draselný rozpuštěný ve vodě), který odděluje kladnou a zápornou elektrodu. Příklad tohoto typu článku můžeme vidět na obrázku 1 [4].

Tab. 2 Výhody a nevýhody Nikl-kadmiových akumulátorů.

Výhody	Nevýhody
Vysoká životnost a spolehlivost	Samovybíjení
Vysoký počet dobíjecích cyklů	Nízká hustota energie (40–60 Wh/kg)
Odolnost vůči mrazu	Nízká účinnost nabíjení (60–90 %)
Mechanická odolnost	Nízké napětí článku
Možnost skladovat ve vybitém stavu	Paměťový efekt
Vysoké odběrové proudy	Toxické kadmium
Nízké napětí článku (1,2 V)	Nízká životnost

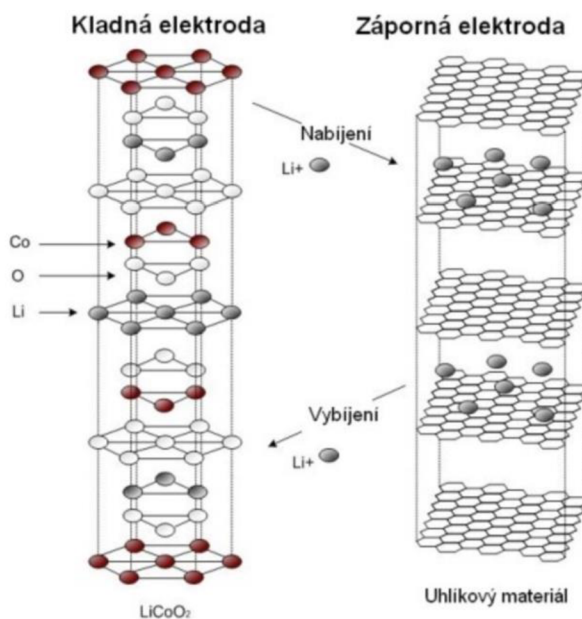


Obr. 1 NiCd akumulátor [29].

1.1.3 Lithium-iontový bateriový článek

Standardní lithium-iontový článek se skládá ze záporné anody, která je vyrobena z uhlíkového materiálu a kladné katody, na jejíž výrobu se používá různá směs lithiových oxidů. Například lithium-kobalt oxid (LiCoO_2), lithium-mangan oxid ($\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$), lithium-nikl dioxid (LiNiO_2) nebo lithium-vanad oxid (LiV_2O_5). Dále článek obsahuje separátor, který odděluje katodu a anodu, elektrolyt, který umožňuje pohyb iontů. Nejčastěji se používá roztok lithium hexafluorofosfátu (LiPF_6) v organickém rozpouštědle. Poslední část článku je mechanická a patří sem vývody pro konektivitu a opláštění [11].

Dohromady jde o komplexní elektro-chemický systém a přesné složení jednotlivých komponent bývá tajemstvím a každá firma si chemický recept na svou baterii sřeží a snaží se ho neustále vylepšovat pro co nejvyšší možnosti uložení a efektivní využití energie.



Obr. 2 Princip funkce lithium-iontové technologie [12].

Tato technologie akumulátorů se vyznačuje tím, že ionty lithia při nabíjení a vybíjení pouze interkalují do struktury atomové mřížky uhlíkové záporné elektrody bez přítomnosti chemické reakce. Díky tomu je dosaženo velké životnosti akumulátoru bez výrazné změny ve výkonu akumulátoru. Princip funkce vidíme na obrázku 2.

Akumulátory mají jmenovité napětí 3,6 až 3,7 V a nabíjecí napětí 4,2 V. Díky vysokému nominálnímu napětí mají články vyšší energetickou kapacitu než jiné typy akumulátorů.

Vybíjecí napěťová křivka je velmi plochá až do dosáhnutí vybití baterie, kdy napětí rychle klesá. U různých výrobců se hodnota liší, ale jako bezpečnou můžeme považovat hodnotu 2,8 V. Lithium-iontový akumulátor se nesmí pod tuto hranici podbít. Jinak se zničí a dále už nejde znovu nabít. V praxi toto řeší chytrá elektronika (BMS), která napětí baterie řídí ve zvoleném bezpečném provozním rozpětí. Ideální rozpětí nabití článků pro nejvyšší životnost je 40 až 80 % kapacity baterií. Baterie není dobré nechat úplně vybit, ani je nabíjet do plna. Toto by se mělo v případě elektromobilů dělat pouze pokud potřebujeme nouzově dojet daleko nebo není po cestě nabíječka.

Mezi hlavní výrobce těchto článků patří Panasonic, Sony, Samsung, LG a Tesla.

1.1.4 Rozdělení lithium-iontových článků

Lithium-iontové články se dělí podle tvaru a podle technologie na několik hlavních typů.

Cylindrické

Cylindrické baterie se vyznačující svým válečkovým tvarem připomínajícím tužkové baterie, jak vidíme na obrázku 3. Jejich největší výhodou je největší gravimetrická a volumetrická hustota energie na trhu baterií. V případě gravimetrické hustoty jde o hodnotu až 300 Wh/kg a u volumetrické jde až o 800 Wh/dm³. Tyto články se skládají z náplně, což je svitek metalických fólií (v zahraniční literatuře označován jako *jellyroll*) a separátoru, dále mají vývody pro konektory na mechanické uchycení k elektronicky vodivému ochrannému obalu. Viz obrázek 3. V principu je celá válečkovitá část obalu záporná elektroda a kladná elektroda je pouze víčko, které je elektronicky odizolované pomocí gumového kroužku od zbytku ochranného obalu.

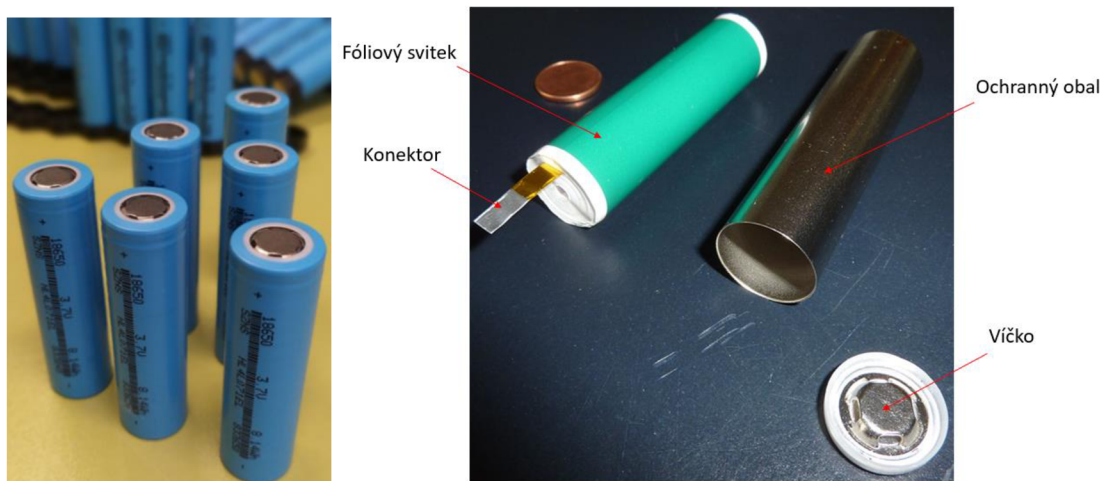
Kvůli svému kruhovému průřezu vzniká při uspořádání článků „mrtvý prostor“. Jde o nevyužitý prostor, který není možné zaplnit bateriemi. Tento problém u ostatních typů lithium-iontových baterií nevzniká. Nejlépe jsou na tom lithium-polymerové články, které lze dokonce bez rizika lehce deformovat do požadovaného tvaru.

Tento typ není v komerčních řešeních bateriového boxu příliš využíván především kvůli nízké bezpečnosti a relativně složitému návrhu bateriového boxu oproti například prizmatickým článkům. Avšak nese s sebou spoustu zásadních přínosů. Společnost Tesla Motors inc. je jedinou firmou, která tyto články používá v sériové

výrobě ve svých automobilech. Tyto automobily jsou známy svými parametry výkonu a dojezdů, které překonávají konkurenci ve všech ohledech. Ostatní společnosti zabývající se výrobou elektromobilů, si vzaly poučení z mnoha havárií elektromobilů Tesla a používají spíše konzervativní řešení v podobě NiCd nebo modernějších prizmatických lithium-iontových články. Tyto zmíněné ovšem nemohou nikdy dosáhnout takových výkonových parametrů.

Články na přebíání, deformaci nebo protržení ochranného obalu reagují prudkou exotermickou reakcí. Tento jev je veřejnosti znám z mnoha videí z celého světa a je to jeden z argumentů proč nezavádět tento typ pohonu do masové produkce. Navzdory tomu, že benzín a lithium-iontové baterie mají velice podobnou teplotu hoření [16].

Články s touto technologií poskytují největší energetickou hustotu na hmotnost a objem a výkon, ale jejich používání může být nebezpečné v případě nehody nebo neodborné manipulace a provozu.



Obr. 3 Cylindrický bateriový článek. Pohled vně i dovnitř [15].

Prizmatické

Prizmatické články se od cylindrických liší především svým tvarem. Pracují na stejném principu jako články cylindrické. Oproti svým válečkovým substitutům mají nižší energetické kapacity, ale jsou bezpečnější a snazší pro použití. Další výhodou je díky jejich obdélníkovému tvaru možnost je jednoduše uspořádat do modulů bez vzniku mrtvého prostoru jako u cylindrických baterií. Díky těsnému spojení je také možné lépe odvádět teplo z článků a efektivněji je chladit. Příklad prizmatického článku vidíme na obrázku 4.

Právě tento typ článků najdeme nejčastěji v bateriových boxech komerčních automobilů. Nejznámějším automobilem s tímto typem baterií je průkopník v koncernu VW BMW i3. Díky jejich vysoké gravimetrické energetické hustotě, která dosahuje hodnoty až 200 Wh/kg (ŠKODA auto používá ve svých nejnovějších bateriových boxech tyto články o gravimetrické energetické hustotě 160 Wh/kg. Tuto technologii přebrala právě z poznatků z vývoje automobilů značky BMW) a díky jejich bezpečnosti při používání. Jde o bezpečnější variantu k cylindrickým bateriím. Ovšem tyto baterie nikdy nemohou z důvodu

své konstrukce dosahovat takových parametrů jako cylindrický typ.

Problém, se kterým se automobilové společnosti musí potýkat je škálování bateriové kapacity. Jelikož používají jednotlivé články o vysoké kapacitě zapojené do série, není možné flexibilně navýšit kapacitu. Kapacita se dá zdvojnásobit anebo použít články o vyšší kapacitě, kde je ale nutnost přepracovat celý konstrukční návrh. Tyto články se vyrábí pouze v určité řadě kapacit např. 40 Ah, 60, Ah, 85 Ah atd. Každý článek z této řady má však zcela jiné rozměry.



Obr. 4 Prismatický lithium-iontový článek [14].

Lithium-polymerové

Lithium-polymerová baterie (v anglické literatuře označována jako „Pouch cell“) pracuje na stejném principu interkalace iontů lithia do atomové mřížky jako ostatní lithium-iontové baterie. Používají stejné katodové i anodové materiály. Rozdíl je v typu elektrolytu v bateriích. Jak název napovídá lithium-polymerové baterie používají elektrolyt v polymerní úpravě. V počátcích byl používán pevný elektrolyt, ale tyto baterie pro správné fungování musely být předehřívány na teploty kolem 60 °C. Později se vyvinul gelový elektrolyt, který výrazně zvýšil konduktivitu baterií a umožnil jejich rozšíření a použití v mnoha aplikacích.

Nejčastěji tyto baterie nalezneme v aplikacích, kde je třeba šetřit místem a váhou. Hlavní výhodou tohoto typu je, že lze vyrobit v prakticky jakékoliv velikosti a kapacitě. Mohou být vyrobeny o tloušťce kreditní karty. Díky tomu, že nemusí mít ochranný obal jsou také velmi lehké. Dají se také bez problému lehce deformovat. Používají se převážně v modelářství nebo v chytré přenosné elektronice, kde je hlavním požadavkem možnost rozmanitých tvarů a velikostí. Většinou se vyrábějí v menších kapacitách. Oproti cylindrickým bateriím mají o něco menší energetickou hustotu a jsou také dražší z důvodu náročnější výroby. Z důvodu absence ochranného obalu jsou také nejméně bezpečné pro větší aplikace. Při odebrání proudu z baterie na bázi lithia se také vytváří plyny, které baterii nafukují a tento typ bez mechanické skořápky může měnit výrazně tvar a velikost. Toto je třeba při konstrukčním návrhu kompenzovat a bateriový box poté celkově dosahuje nízké volumetrické hustoty energie [20].

Tento typ bateriových článků nalezneme u výrobců automobilů jako je americký Chevrolet, japonský Nissan nebo francouzský Renault. Příklad vidíme na obrázku 5.

Tab. 3 Výhody a nevýhody lithium-iontových baterií [15].

Výhody	Nevýhody
Vysoká energetická hustota	Stárnutí baterie
Vysoké nominální napětí až 3,7 V	Nebezpečí hoření a výbuchu
Možnost výroby v různých tvarech	Podnabití zničí baterii
Žádné samovybíjení	Nákladná recyklace
Odolnost vůči mrazu	Změna velikosti při vybíjení a nabíjení
Nemá paměťový efekt	
Vysoké odběrové proudy	



Obr. 5 Lithium-polymerová baterie [17].

Lithium-železo fosfátové Li-Fe-PO₄

Energetická hustota těchto bateriových článků s lithium-železo fosfátovou katodou se pohybuje mezi 90 až 140 Wh/kg. Články mají obvykle jmenovité napětí 3,2 až 3,3 V, což je v porovnání s klasickými lithium-iontovými bateriemi méně o 0,4 až 0,5 V. Provozní využitelné napětí se pohybuje mezi 2,5 a až 3,75 V. Nevýhodou těchto baterií, která vyplývá z jejich napětí je nutnost použití většího množství článků v sérii pro získání dostatečného napětí. Tím pádem se snižuje volumetrická i gravimetrická kapacita celého systému.

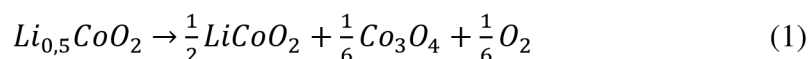
Naopak výhodou této technologie je velice plochá vybíjecí křivka. Při vybíjení baterií se napětí drží při kapacitě 70 až 20 % pohybuje na úrovni 3,3 V. Při provozu těchto baterií tedy nezaznamenáváme zásadní snížení výkonu při snížené kapacitě. Další z výhod této technologie je, že lithium-železo fosfát je výrazně stabilnější materiál pro katodu než jiné materiály. Tyto články nabízí největší bezpečí při používání a také největší životnost z hlediska počtu cyklů z celé kategorie lithium iontových baterií. Výhoda stability je ale zaplácena nutností obsahu velkých množství aditiv a dalších materiálů pro navýšení konduktivity, kapacity, bezpečnosti a výkonu baterie. Baterie na bázi této technologie

v kategorii lithium-iontových nedosahuje takových výkonnostních a kapacitních parametrů jako například lithium iontové cylindrické baterie, které naopak mají gravimetrickou i volumetrickou energetickou hustotu nejvyšší z celé této větve [9].

Elektroda je povlakována dalšími materiály, které zvyšují bezpečí při používání a zamezují parazitním reakcím v baterii. Tyto povlaky dále zamezují riziku požáru při přebití, nárazu nebo protrhnutí ochranného obalu. Toho dosahují snížením vlivu nekontrolované tepelné pozitivní zpětné vazby.

Tento jev nastává, když neošetřená katoda při zvýšení teploty zvyšuje výkonnostní parametry baterie a vzniká více tepla a vzniká destruktivní cyklus. Tento jev se týká všech článků s lithium-iontovou technologií [10]. Dle Wang a Suna, kteří studovali tento jev, nastává k tomuto jevu u lithium-iontových baterií při teplotě kolem 75 stupňů celsia. Při dosažení teploty kolem 170 stupňů celsia se začíná z katody uvolňovat kyslík a dále popisují „dominový efekt“, který nevratně zničí baterii zvyšující se teplotou a tlakem. Zvyšující se tlak způsobený generovanými plyny roztrhne ochranný obal a po kontaktu oxidů lithia se vzdušným kyslíkem vzniká těžce uhasitelný požár [18].

Vznik kyslíku na katodě v bateriovém článku popisují rovnice (1) a (2)



Baterie této technologie tedy poskytují nižší napětí a energetickou kapacitu v porovnání se všemi dostupnými lithiovými technologiemi, avšak jsou velmi bezpečné a vydrží dlouhou dobu pracovat s nezměněnou kapacitou.

U tohoto typu článku nastává stejný problém se škálováním energetické kapacity bateriového boxu jako u prizmatických článků. Typický příklad tohoto typu článku vidíme na obrázku 6.



Obr. 6 Článek LiFePO₄ 3,2 V 160 Ah [8].

Tab. 4 Výhody a nevýhody LiFePO₄ baterií.

Výhody	Nevýhody
Vysoká energetická hustota	Stárnutí baterie
Absence samovybíjení	Podnabití zničí baterii
Odolnost vůči mrazu	Nákladná recyklace
Nemá paměťový efekt	
Vysoké odběrové proudy	

1.2 Spojování bateriových článků

Spojování bateriových článků je klíčovým faktorem pro správnou funkci bateriového boxu. Ve velkých úložištích energie s technologií lithium-iontových článků se nachází tisíce spojů baterií. Kvalitní spojení baterií musí zajišťovat nízký odpor v kontaktu a dostatečnou adhezni sílu pro konektory nebo spojovací drátky. Požadavky na materiály se výrazně liší dle použité technologie. Každá z těchto technologií má vlastní charakteristiky v závislosti na použitém materiálu a kontaktní geometrii. Konektory můžeme spojovat pomocí pájení, bodového svařování, ultrazvukového nebo svařování pomocí laserového paprsku. V sériové výrobě se nejčastěji používá bodové, ultrazvukové nebo laserové svařování. Hlavně díky snadné možnosti automatizace robotickým ramenem nebo jednoúčelovým strojem.

Každý typ článku má jiné rozhraní pro spojování. Lithium-polymerové baterie mají například vyvedeny plíškové konektory. Cylindrické lithium-iontové baterie mají pro účel spojení nahoře a dole vyhrazenou plošku na ochranném obalu [21].

1.2.1 Pájení

Pájení je základní používanou metodou pro spojování elektronických součástek i bateriových článků. Při použití této metody se články sestaví do příslušné sestavy. Na jednotlivé články je poté připájen drát z vodivého materiálu (nejčastěji měděný). Druhý konec drátu je připájen na přípojnicu a svod elektrického proudu nejčastěji v podobě měděného profilu v hranolovém provedení. Z tohoto profilu je elektrický proud veden páteřní silovou kabeláží jedním směrem dále k nabíječce a druhým k motoru.

Rozlišujeme dva druhy pájení měkké a tvrdé. V elektrotechnice se téměř vždy používá měkké pájení. Měkké pájky mají teplotu tání do 500 °C. Tvrdé pájení využívá pájky s teplotou tání od 450 °C a výše. Pracovní teplota pájky je vždy nižší než teplota tání základního materiálu nebo materiálů, které chceme spojit. Metodou pájení vzniká spoj, který má jiné chemické složení než základní materiál.

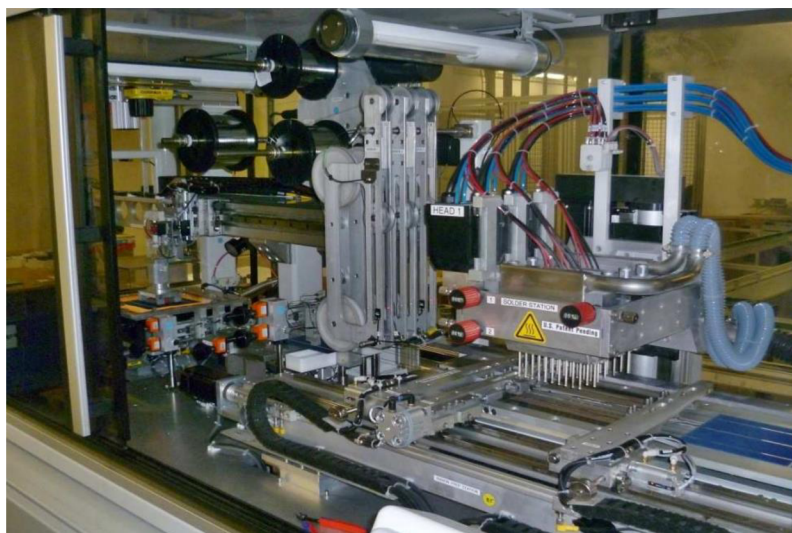
Při pájení dodržujeme následující postup. Základní materiál se nahřeje na potřebnou teplotu, přidáme pájku a ta difuzí zateče do pájeného spoje. Pájený spoj je třeba, aby byl očištěn od všech nečistot a oxidů a byl odmaštěný pro maximální přilnavost pájky k základnímu materiálu. Pouze správnou přípravou povrchů dosáhneme kvalitního

a spolehlivého spoje. Pro kvalitní spoj se u spojování elektronických součástek používá kalafuna. Kalafuna je pryskyřice z borovice a tato má vlastnost při teplotě kolem 200 °C rozrušit tenké vrstvy oxidů na pájeném povrchu a zlepšuje přilnavost pájky. Kalafunu není po pájení nutné z technického hlediska odstraňovat.

Měkké pájky jsou tvořeny slitinou kovů. Slitin se používá, jelikož ve slitině mají některé kovy zcela odlišné vlastnosti než v čistém stavu. Tyto můžeme vyčíst z fázového diagramu kovů. Dříve na trhu dominovala pájka z cínu a olova SnPb v poměru 60:40 případně Sn₆₃Pb₃₇ s minimálním obsahem dalších mikro legujících přísad. Tyto pájky měly velmi dobré vlastnosti, ať už jde o nízkou teplotu tání (183 °C) nebo i pevnost spoje. Avšak olovo je toxický prvek, který se kumuluje v organismu. Proto se v nynější době používají tzv. bezolovnaté pájky. Tyto jsou většinou na bázi cínu a stříbra. Jako příklad můžeme uvést jednu z dnes nejběžnějších pájek Sn_{96,5}Ag₃Cu_{0,5}, která je slitinou tří kovů – cínu, stříbra a mědi v poměru daném koeficienty. Tato má teplotu tání 217 °C [22, 23].

Problémem u spojování baterií pomocí pájení je velké množství tepla vnesené do bateriového článku. To může způsobit jeho degradaci a snížení životnosti baterie. Proto se často používají jiné metody pro spojování do větších výkonových sestav.

Pomocí technologie pájení jsme schopni získat spoje s vysokou pevností a také nízkým přechodovým elektrickým odporem. Obrázek 7 obsahuje příklad moderní pájecí stanice.



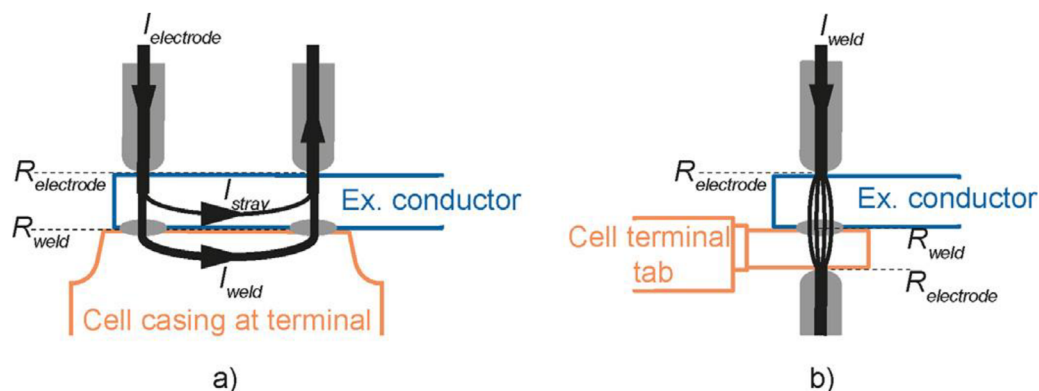
Obr. 7 Automatická pájecí stanice [28].

1.2.2 Bodové odporové svařování

Díky snadné obsluze této technologie jde o jednu z nejrozšířenějších technologií především u prototypové výroby, ale zastává velký podíl i u sériové výroby. Hlavní charakteristikou bodového svařování je, že se v krátkém okamžiku spojí velmi malý objem materiálu. Děje se tak pomocí dvou elektrod. Jedna se dotýká základního materiálu bateriového článku a druhá spojovaného materiálu (plíšek nebo drátek). Zdroj proudu v několika krátkých pulzech dodá vysoký proud I_{weld} v řádu stovek ampér a tím se materiály nataví a svaří. První puls naruší vrstvy oxidu a kontaminace na povrchu svařovaných materiálů a přehřeje materiál, čímž zvýší tepelně ovlivněnou oblast a velikost výsledného svaru. Dalšími pulzy dosáhnou materiály teploty tání a tím se svaří k sobě.

Při tomto typu svařování je důležitý poměr mezi odpory – v obrázku označené R_{weld} a $R_{electrode}$. Odpor R_{weld} by měl být dostatečně velký pro zformování kvalitního svaru, zatímco $R_{electrode}$ musí být co nejnižší, aby se zabránilo přivařování elektrody ke svařovaným materiálům.

Teplo ze svařovacího procesu je koncentrováno po velmi krátkou dobu pouze na svařované oblasti, a proto je teplo vnesené do bateriového článku velmi malé a neovlivňuje životnost a stav baterie [21].



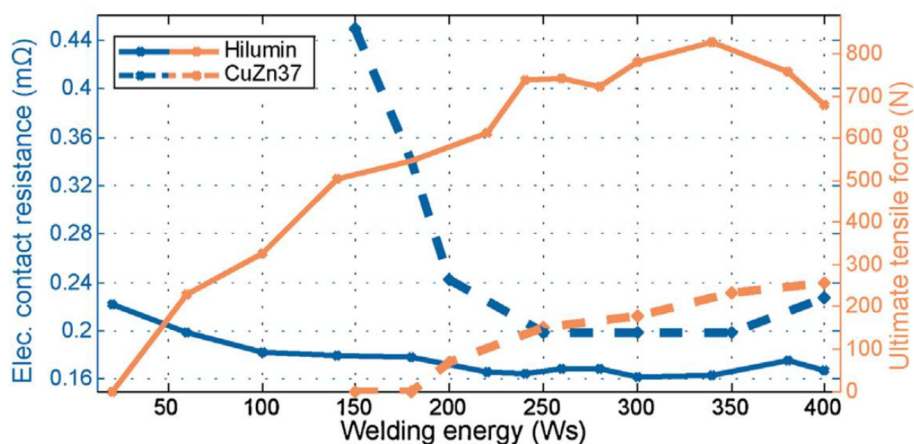
Obr. 8 Princip bodového odporového svařování za a) s paralelními elektrodami pro svařování cylindrických baterií a za b) pro svařování dvou plíšků pomocí elektrod oproti (například u Li-pol baterie) [21].

Vliv svařovací energie na kvalitu svaru a velikost odporu v kontaktu

Výsledný elektrický odpor kontaktu a sílu svaru lze vyjádřit jako funkci svařovací energie. Závislost je vyobrazena v grafu v obrázku 10. Dle [21] se nejčastěji používané materiály ve formě plátků jako měď nebo poniklovaná ocel nedají svařit s energií menší než 200 Ws. Se vzrůstající energií se kvalita, pevnost a velikost svaru a také elektrický odpor zlepšuje. Nejlepších výsledků se dosáhlo se svařovací energií mezi 340 až 350 Ws. Při dalším zvyšování svařovací energie se kvalita svaru začne zhoršovat z důvodu vzniku bublin a dutin ve svařovaném materiálu. Tak hrozí riziko proražení základního materiálu baterie a zničení bateriového článku. Viz obrázek 9. Také se začnou přivařovat elektrody ke svařovanému materiálu, což je vysoce nežádoucí jev především při automatizaci [21].



Obr. 9 Průřez bateriového článku při příliš vysoké svařovací energii.



Obr. 10 Vliv svařovací energie na kvalitu výsledného svaru u 2 různých materiálů [21].

Materiály vhodné pro bodové odporové svařování

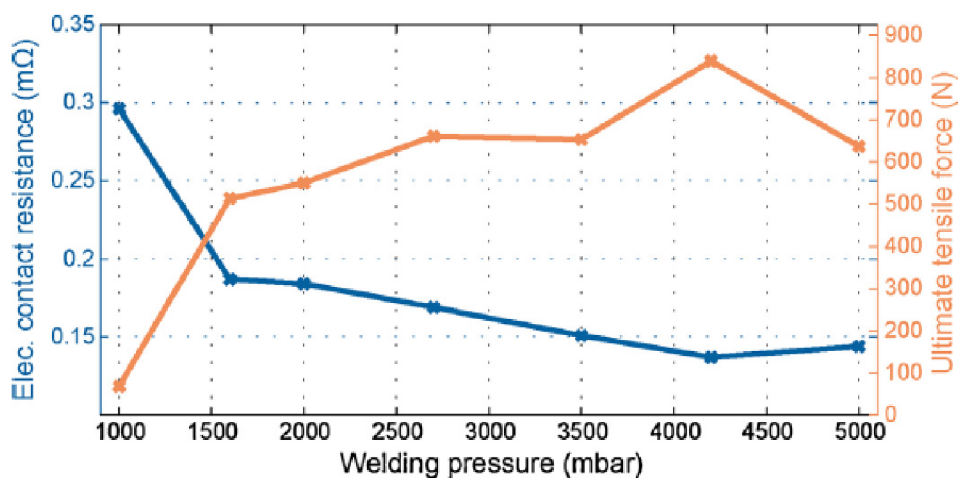
Jestli je materiál vhodný nebo ne záleží na jeho tepelné vodivosti a teplotě tání. Čím nižší tepelná vodivost a nižší bod tání – tím nižší svařovací energie je potřeba pro dosáhnutí svaru. [24] Jelikož tepelná a elektrická vodivost spolu koreluje u většiny kovových materiálů, je mnohem snazší bodově svařit ocel než například měď. Také je možné použít bodové svařování pouze pro určité nižší tloušťky materiálů a materiály s co nejnižší vodivostí. Pro použití, kde potřebujeme získat z baterií velké proudy potřebujeme materiály s co nejvyšší vodivostí s vhodně dimenzovaným průřezem. Tyto jsou pomocí této technologie těžko svařitelné. Zejména při svařování s paralelními elektrodami je těžké dosáhnout kvalitních svarů, pokud od sestavy vyžadujeme vysokých odběrových proudů (20 A/čl.) [21].

1.2.3 Ultrazvukové svařování

Ultrazvukové svařování je metoda svařování bez přímého tavení materiálů. Materiály jsou přitlačeny k sobě a poté vysokou frekvencí kmitají vůči sobě. Materiály se očistí o oxidy a jsou vůči sobě přitlačeny čisté kovy. Dále teplo vzniklé třením nataví materiály do plastického stavu v bodě kontaktu a tyto spojí. Na obr. 10 vidíme princip ultrazvukového svařování bateriových článků. Sonotroda je tlačena tlakem p proti spojovanému materiálu a ten tlačí na kontakt na bateriovém plášti. Poté jsou spuštěny ultrazvukové vibrace v rozsahu 15 až 45 kHz [25]. Díky geometrii sonotrody jsou vibrace přenášeny do bodu kontaktu. Baterie musí být zafixována, aby nepřenášela vibrace mimo oblast kontaktu.

V článku [21] použili metodu Branson L20. Tato pracuje s kmitočtem 20 kHz a umožňuje nastavení amplitudy 0.5 až 49 μm . Relativní pohyb spojovaného materiálu a konektoru baterie vůči sobě způsobuje svar. Do dnes není přesně známo, jaký mechanismus způsobuje svaření těchto materiálů. Dva hlavní mechanismy, které svar způsobí jsou difuze mezi hranicemi zrn a mechanické spojení v důsledku výstupků na povrchu. Nejde tedy v principu o svar natavením materiálů. Touto metodou vnášíme do bateriového článků nejméně tepla. Avšak vibracemi můžeme poškodit vnitřní část bateriového článku. Obzvláště pokud byla svařována též pomocí ultrazvukového svařování [26].

Pomocí ultrazvuku můžeme dosahovat velice kvalitních svarů bez tepelného ovlivnění baterie. Pomocí této metody můžeme svařovat prakticky jakékoliv i různé kovové materiály. Svařování nezávisí na jejich vodivostních vlastnostech jako u bodového svařování. Pouze na tvrdosti a struktuře povrchu. Tvrdší materiály jako ocel se svařují hůře. Avšak měď nebo hliník jdou touto metodou spojovat velmi dobře. Můžeme také svařovat materiály o větším průřezu než u předchozích metod. Parametry spoje jako je síla svaru a elektrický odpor kontaktu přímo závisí na aplikovaném tlaku na sonotrodě. Na obrázku níže vidíme závislost výsledné kvality svaru na použitém tlaku. Nejlepší výsledků dosáhneme při použití tlaku 4200 až 4500 mbar. Při vyšších tlacích oslabíme materiál jeho roztažením a svar není kvalitní [21].



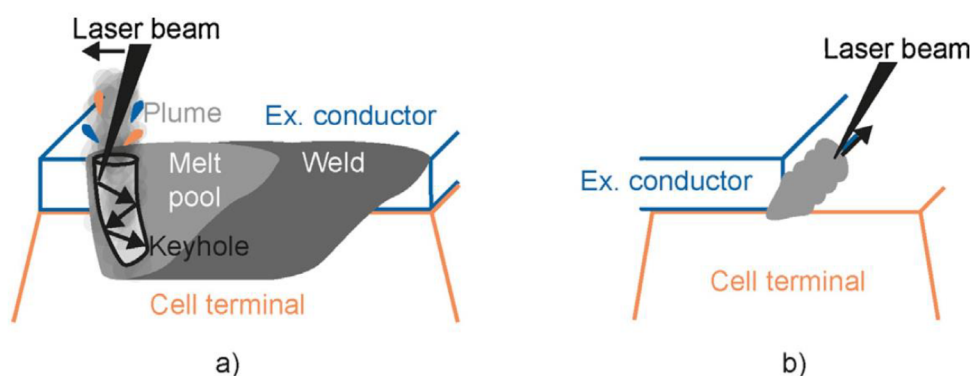
Obr. 11 Závislost kvality svaru na tlaku na sonotrodě [21].

1.2.4 Svařování laserovým paprskem

Tato metoda dociluje svaru pomocí absorpce elektromagnetických vln generovaných laserem do rozhraní spojovaných materiálů, které se tímto nataví a spojí. Laserový paprsek dokáže dodávat obrovskou energetickou hustotu $I < 10^{12} \text{ W/m}^2$. Touto energií se spojované materiály taví a až odpařují. Díky vysoké energii laseru lze touto metodou svařovat velmi vysokými rychlostmi [21]. Pro zvětšení plochy svaru se používá oscilace laserového paprsku například při kmitočtu 200 Hz a amplitudě 0.25 mm. Tímto získáme přibližně dvakrát větší plochu svaru, a tak i lepší kontakt a nízký odpor v kontaktu [27].

Díky vysoké energii a rychlosti svařování se do bateriového článku vnese malé množství tepla a tepelně se ovlivní pouze zamýšlená oblast. Laserový paprsek je poměrně univerzální a lze s ním svařovat různé materiály a geometrie. Problémy mohou nastat, pokud se paprsek odrazí od lesklého kovového povrchu a může poškodit součástky v blízkosti svaru. Dalším nechtěným vedlejším efektem může být rozstřík materiálu při svařování. Při spojování dvou různých kovů, což bývá při spojování baterií časté, vzniká natavením a mícháním dvou materiálů nový materiál s jinými metalurgickými vlastnostmi.

Mezi dvě nejpoužívanější metody svařování laserovým paprskem jsou „keyhole“ metoda a svařování koutovým svarem. Keyhole metoda znamená provaření se skrz svařovaný materiál, až k terminálu baterie. Laserový paprsek pokračuje v kruhu o vhodném průměru. Pro lepší představu se můžeme podívat na obrázek 12 a 13.



Obr. 12 Princip svařování laserovým paprskem. a) keyhole metoda, b) koutový svar [21].

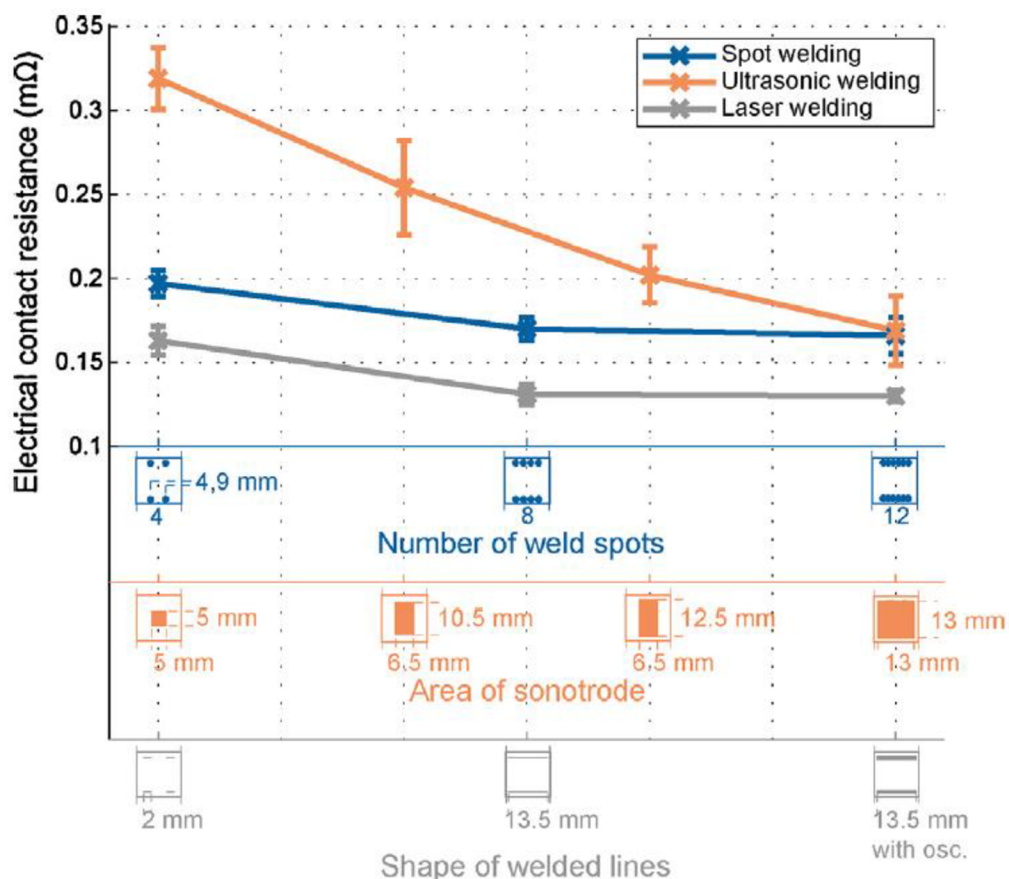


Obr. 13 Výsledek laserového svařování keyhole metodou [21].

1.2.5 Porovnání technologií spojování článků

Každá technologie pro spojování článků přináší různé výhody i nevýhody. V obrázku 14 vidíme závislosti jednotlivých technologií vložených do grafu. Na ose y je kontaktní odpor, což je parametr, který nás u bateriového boxu bude zajímat nejvíce. Na ose x jsou vyneseny různé konfigurace a nastavení pro dané technologie.

Pro technologie laserového a ultrazvukového svařování jsou zapotřebí specializované a drahé přístroje. Výhodou odporového bodového svařování je rychlost s jako se dají články spojit, nízké náklady na práci a nízká hodnota kontaktního odporu.



Obr. 14 Porovnání různých technologií spojování článků [21].

1.3 Bateriové boxy

Bateriové boxy pro BEV se skládají v první řadě z bateriových článků spojených v různých konfiguracích do modulů s vhodným napětím, kapacitou a velikostí. Články jsou v modulu pospojované různými způsoby a každý modul obsahuje termočlánky pro kontrolu teploty jednotlivých článků. Tyto články jsou elektronicky spojeny a řízeny pomocí battery management systému (BMS). Bateriový box dále obsahuje dle nutnosti chladič. V létě a při rychlém nabíjení a vybíjení je třeba články chladit a v zimě při velmi nízkých teplotách baterie temperovat na teplotu alespoň kolem 0 °C, kdy si moderní články zachovávají téměř stoprocentní kapacitu. Tento systém se označuje jako battery thermal management (BTM). Vše je uzavřeno v boxu, kde vše sedí bezpečně na svém místě a který musí baterii chránit před nečistotami, vlhkostí, otřesy a nárazy.

Na rozdíl od článků a modulů je bateriový box chytré zařízení, které je řízeno pomocí BMS k získání maximálního výkonu a nastavení optimálních pracovních podmínek pro bezpečnost a dlouhou životnost bateriových článků a celého systému.

1.3.1 Bateriový box Škoda SuperEl II

Přestavbu prováděla česká firma EVC group, která se specializuje na elektromobilitu a bateriové úložiště ve spolupráci s asociací elektromobilového průmyslu (ASEP). Bateriový box v upraveném Superbu je v netradičním provedení v porovnání s bateriovými boxy komerčních společností, jelikož jde o prototyp. Ať už jde o zapojení, typy článků nebo i umístění ve vozidle. O tom napovídá i typ zapojení článků. Celá bateriová sestava má parametry 96S1P. Tento box se neskládá z bateriových modulů, ale z jednotlivých článků o relativně vysoké kapacitě 160 Ah. Řešení je to netradiční, ale v praxi bylo několika letým provozem ověřeno jako funkční.

Článek

Článek použitý pro potřeby elektromobilu byl vybrán s ohledem na dimenzování poměru hmotnosti a výkonu bateriového boxu. Byl vybrán článek s technologií LiFePo₄ o kapacitě 160 Ah, který poskytuje dobrý poměr hmotnost/kapacita. Je nutno zmínit, že v době, kdy byl tento elektromobil stavěn ještě nebyla technologie cylindrických lithium-iontových baterií rozšířena a pospána jako dnes. Také byla brána v potaz únosnost automobilu. Při použití článků s kapacitou 200 Ah, by hmotnost bateriového boxu přesáhla povolený limit výrobcem. Tento problém s dimenzováním kapacity článků o vyšší kapacitě je známý

a popsáný. Automobilové společnosti používající články LiFePo₄ nebo li-ion prizmatické články o vyšší kapacitě nemohou snadno dimenzovat velikosti bateriových boxů. Jsou omezeni na násobky jednotlivých kapacit nebo na výrobcem dané možnosti.

Tab. 5 Výběr článku pro bateriový box.

Parametry	Článek 1	Článek 2	Článek 3
Kapacita článku [Ah]	100	160	200
Hmotnost článku [kg]	3,2	5,6	7,3
Kapacita článku [Wh/kg]	30	49	61
Grav. energetická hustota [Wh/kg]	100	91	88
Hmotnost boxu [kg]	366	594	756
Hmotnost vozidla [kg]	1466	1694	1856
Spotřeba elektromobilu [Wh/km]	12	16	18
Teoretický dojezd vozidla [km]	253	304	338

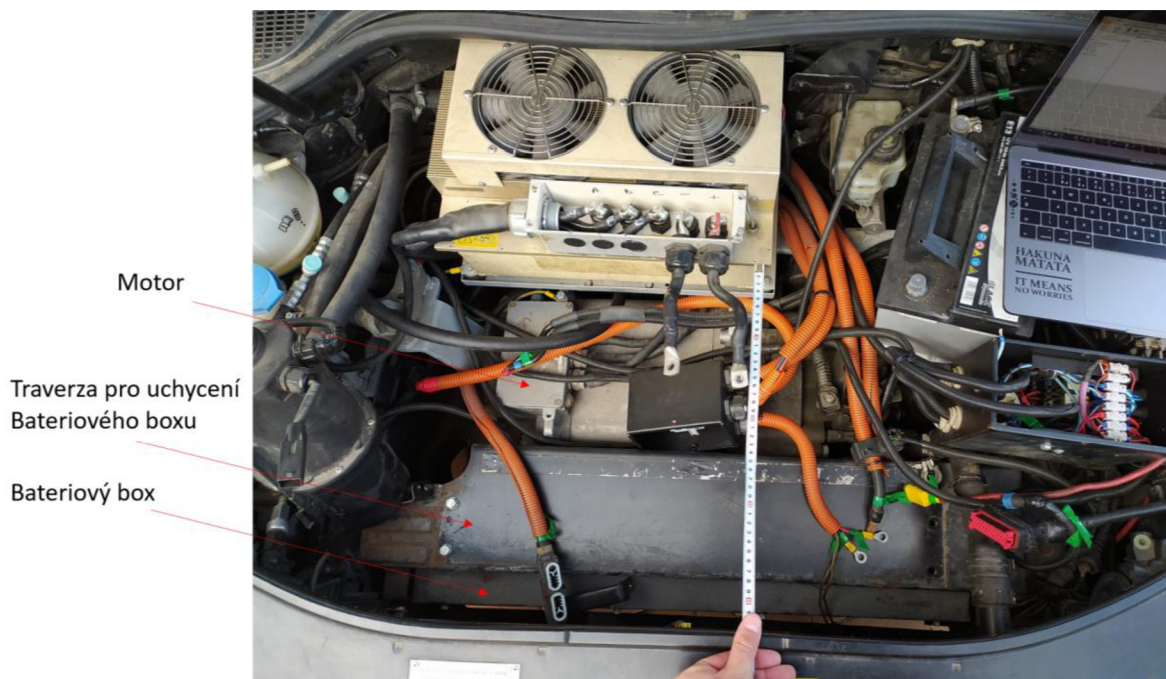
Bateriový box

Celý bateriový box sestává z šesti samostatných částí. V sestavě jsou čtyři samostatné bateriové boxy, nabíječka a oddělená řídicí jednotka BMS. Na obrázku 7 můžeme vidět, jak jsou bateriové boxy ve vozidle umístěny. Dva jsou v motorovém prostoru, jeden je před zadní nápravou v místě palivové nádrže a poslední za zadní nápravou v místě pro rezervní pneumatiku. Boxy jsou na automobilu rozmístěny, aby měly co nejlepší rozložení váhy, které simuluje automobil se spalovacím motorem.

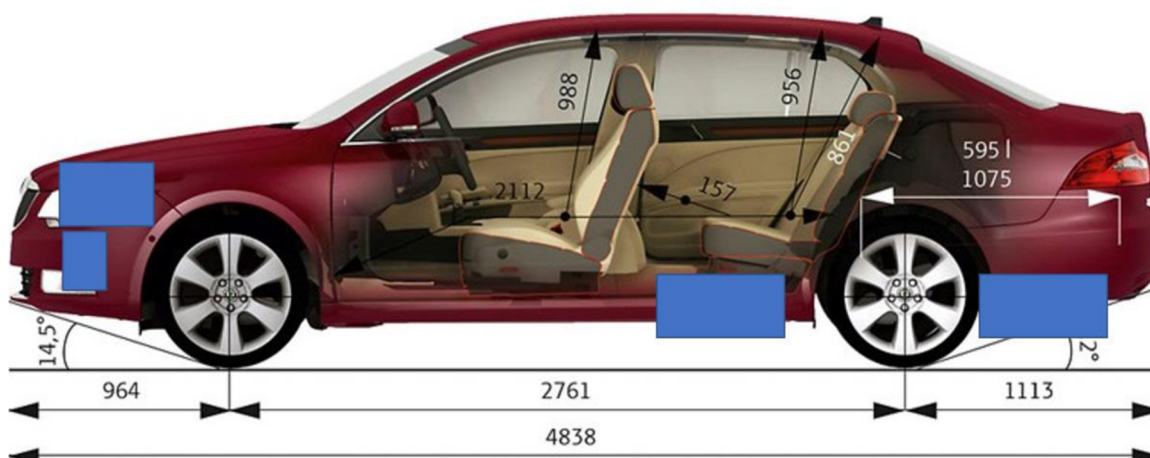
V přední části automobilu, kde se normálně nachází těžký spalovací motor jsou umístěny dva boxy. V zadní části automobilu, kde standardně najdeme nádrž na palivo a rezervní pneumatika se nacházejí další dva boxy. Díky tomuto rozložení má automobil velmi podobné jízdní vlastnosti, jako obdobný automobil se spalovacím motorem.



Obr. 15 Pohled do motorového prostoru elektromobilu SuperbEL II.



Obr. 16 Pohled do motorového prostoru s odmontovaným horním bateriovým boxem.



Obr. 17 Přibližné umístění bateriových boxů na vozidle SuperEl II.

Dva bateriové boxy v motorovém prostoru jsou umístěny nad sebou mezi chladičem a motorem. V motorovém prostoru se dále nachází frekvenční měnič, centrální jednotka BMS Master RT-BMS CU, 12 V olověná baterie, elektrické jističe a pojistky, klimatizační jednotka a elektrické topení.

Bateriové boxy jsou spojeny do série pomocí silových kabelů (na obrázku 16 s oranžovou bužírkou). Každý bateriový box má vlastní proudovou pojistku na vstupu a výstupu, která při problémech bateriový box odpojí.



Obr. 18 Detail uchycení boxu a kabeláže za zadní nápravou.

Box je pomocí šroubů přišroubovaný skrze nosné prvky karoserie v kufru, které byly konzultovány s konstruktéry ŠKODA Auto. Kabely jsou vedeny vnějším prostorem a na místě jsou přidržovány profily z ohnutého ocelového plechu.

Uchycení bateriového boxu
za zadní nápravou



Obr. 19 Uchycení zadního bateriového boxu v kufrovém prostoru.

Samotné boxy jsou vyrobeny z ohýbaných svařovaných plechů z uhlíkové oceli o tloušťce 1,5 mm, na které je nanesena vrstva protikorozního laku zevně i zevnitř. Pro zvýšení pevnosti jsou spodní a boční plechy větších boxů prolisovány. Tímto se zabrání průhybu plechu při zatížení bateriemi. Řešení je to z konstrukčního hlediska primitivní, ale v praxi bylo ověřeno jako funkční. Vnitřní část boxu je vystlána nehořlavou plstí, který zamezuje vibracím a zvyšuje izolační vlastnosti boxu.

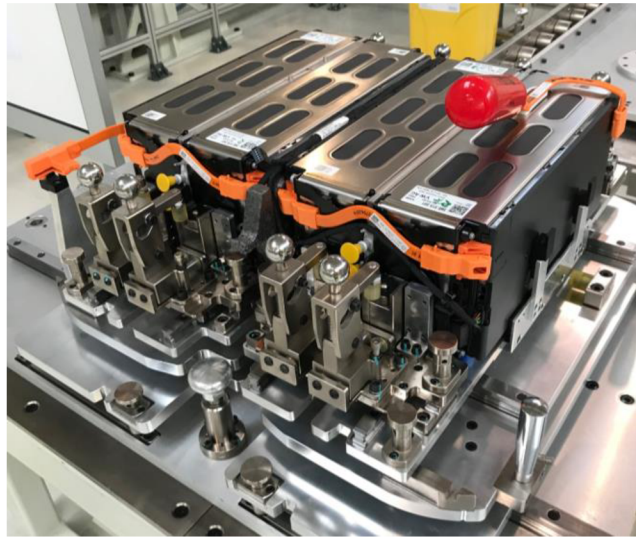
Tab. 6 Přehled parametrů bateriového boxu VUT SuperbEL II.

Parametry	Článek	Bateriový box
Technologie článků	LiFePo4	LiFePo4
Nominální napětí [V]	3,2	310
Maximální napětí [V]	3,6	352,4
Kapacita 25 °C [Ah]	160	160
Hustota energie [Wh/kg]	133,3	100
Energie [kWh]	0,512	48
Maximální dojezd [km]	-	200
Hmotnost [kg]	5,6	594
Typ zapojení	-	1p 96s
Maximální výkon [kW]	0,512	148,8

1.3.2 Bateriový box Škoda superb iV

Pro porovnání byl vybrán bateriový box z nejnovějšího elektrického modelu ŠKODA AUTO Suberb iV. Jde o Plug-in hybrid. Tedy o automobil s kombinovaným pohonem obsahující spalovací a elektrický pohon. Automobil je schopný čistě elektrické jízdy až do rychlosti 80 km/h s udávaným dojezdem 62 km.

Z elektrotechnického hlediska se bateriový box skládá z osmi bateriových modulů obsahujících 12 sériově zapojených prizmatických li-ion článků s technologií NMC (bližší popis v kap 1.4.3). Tyto byly zvoleny pro svůj kvádrový tvar, který se dá snadno skládat do modulů a efektivně chladit. Modul má napěťový rozsah 30-50,4 V v závislosti na aktuální hladině nabití. Kapacita článků byla zvolena 37 Ah. Jeden modul obsahuje tedy maximálně 1,64 kWh elektrické energie. Modul dále obsahuje mechanické vyztužení, chladicí systém, BMS, senzory a izolace. Celková gravimetrická energetická kapacita dosahuje hodnoty 96 Wh na kilogram váhy.



Obr. 20 Bateriové moduly ŠKODA Superb iV na výrobní lince.

Nyní si rozebereme bateriový box, který vidíme na obrázku z mechanického hlediska. Základem celého bateriového boxu je odlitek z hliníkové slitiny. Jedná se o masivní hliníkový odlitek s tloušťkou stěny od 10 do 25 mm. Dosedací plochy jsou z důvodu těsnosti mezi odlitkem a podvozkem frézované do roviny. Díky mohutnosti celého dílu je také využit jako mechanický díl podvozku pro zvýšení tuhosti a pevnosti konstrukce. Dále si můžeme povšimnout nalisovaných dutých kolíků na obvodové hraně odlitku. Tyto slouží k přesnému umístění na podvozku vozidla při sériové výrobě na lince. Kolíky se nasadí do příslušných děr a poté se celý díl přišroubuje na jednocelovém stroji. Z hlediska bezpečnosti

Jednotlivé moduly složené ze sériově spojených článků jsou vloženy v párech po dvou do odlitku na příslušná místa a zajištěné zesponu pomocí šroubů. Moduly jsou spojeny spolu po dvou a mezi nimi je vložený hliníkový chladič, který má zajistit optimální provozní teplotu baterií. Moduly a chladič jsou shora zajištěny pomocí ocelového plechu přimontovaného k odlitku. Chladič je v tomto případě potřeba protože bateriový box má poměrně nízkou kapacitu (13 kWh) a motor vysoký špičkový odběr (103 kW). Baterie se při špičkovém odběru mohou vybijet až proudy kolem 8 C. Intenzitu vybíjení baterie můžeme spočítat podělením maximálního odběru ku celkové kapacitě bateriového boxu [13].

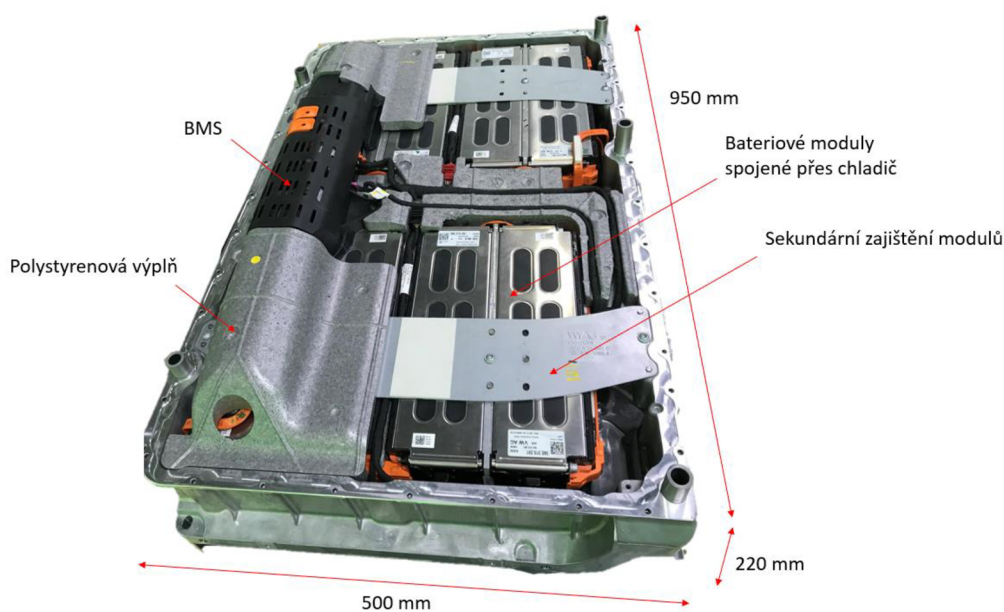
$$\frac{103}{13} = 7,92 \quad (3)$$

Toto je pro bateriové články obrovský nápor a velmi rychle se při takovém použití přehřívají. Bez chlazení mohou dosahovat teplot až 200 °C. U větších bateriových boxů tento problém není tak výrazný vzhledem k většímu poměru kapacity celého bateriového boxu a odběru motoru a můžeme tento jev zanedbat. Tím pádem se celá sestava výrazně zjednoduší o chladič systém.

Vývoj a konstrukce bateriového boxu jsou maximálně přizpůsobeny pro sériovou výrobu. Vše jde jednoduše složit v několika krocích. Dbá se maximálně na bezpečnost. Z toho plyne i volba prizmatických článků, které nedosahují takových výkonnostních parametrů, ale jsou mnohem bezpečnější v případě nehody. Celý bateriový box je také podstoupen mnoha mechanickým bezpečnostním testům. Prvním testem je kontrolovaný pád automobilu ze tří metrů, kdy se bateriový box nesmí výrazně deformovat, ani se nic uvolnit. Dalším z testů je ponoření bateriového boxu do roztoku slané vody po zvolenou dobu.

Tab. 7 Přehled parametrů bateriového boxu ŠKODA Superb iV.

Parametry	Článek	Modul	Bateriový box
Technologie článků	li-ion	li-ion	li-ion
Maximální napětí [V]	4,2	50,4	403,2
Nominální napětí [V]	3,6	43,2	345,6
Kapacita 25 °C [Ah]	37	37	37
Hustota energie [Wh/kg]	160	142	96
Energie [kWh]	0,137	1,64	13
Maximální dojezd [km]	-	-	62
Hmotnost [kg]	0,6	11,55	135
Typ zapojení	-	1p12s	1p 96s
Výkon 1C [kW]	0,155	1,865	39



Obr. 21 Bateriový box hybridního automobilu ŠKODA Superb iV.

1.3.3 Bateriový box Tesla Model S 85D

Tesla je v dnešní době nejpokrokovější a nejdůležitější společností na výrobu elektromobilů na globálním trhu. O tom svědčí i jejich provedení bateriového boxu. Jejich hlavním cílem je dosahovat co největšího výkonu a dojezdu. Proto battery pack vypadá odlišně vzhledem k tomu, co vyrábí koncern VW, který se soustředí spíše na bezpečnost než na výkonové parametry. Základem jsou moduly složené ze 444 článků Panasonic 18650–3400. Tyto moduly jsou v zapojení 6S74P. Tímto jeden modul získává nominální napětí 21,6 V a kapacitu 251,6 Ah. Celková nominální energie uložená v jednom modulu dosahuje 5,43 kWh.

Model S 85D jsem vybral z toho důvodu, že k němu mám fyzický přístup a možnost ho studovat. Není to nejnovější model, ale je vhodný k popisu technologií používaných společností Tesla Motors inc., protože je již velmi dobře popsán ve zdrojích a hodně rozšířený.

Článek

Jak již bylo napsáno v úvodu kapitoly, Tesla používá ve svých automobilech cylindrické lithium-iontové články typu 18650 od výrobce Panasonic. Jejich nominální napětí je 3,66 V a kapacita 3,4 Ah. Jak Elon Musk rád dává na oddiv na sociálních sítích, jde o články s největší energetickou hustotou v komerčně vyráběných automobilech. Avšak pro elektromobil není nejdůležitějším parametrem energetická hustota článku, ale celého bateriového boxu. Článek má hmotnost 49 g, což je standardní – spíše vyšší hodnota u tohoto typu článku.

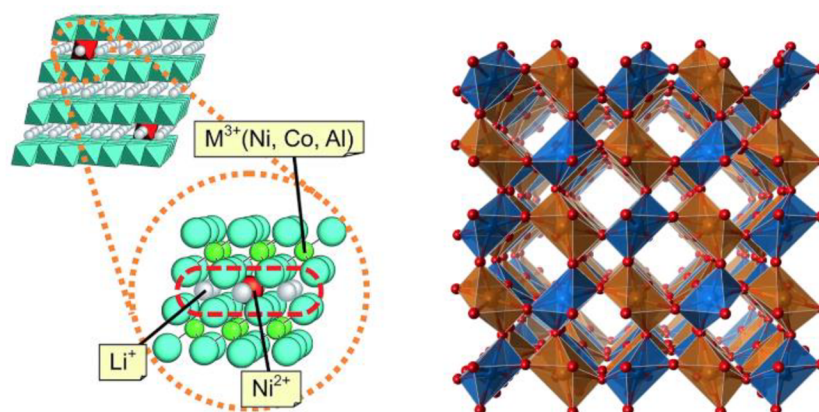
Tyto články používají z důvodu snadné výroby a z toho vyplývající nízké ceny za článek a kvůli velké energetické hustotě, díky čemuž dosahují Tesly takových výkonů a hodnoty dojezdu.



Obr. 22 Bateriový článek Panasonic 18650 od Tesla motors inc.

Z hlediska chemického složení Tesla používá baterie s tzv. NCA katodou a grafitovo-křemíkovou kompozitní anodou. Typ NCA ukrývá chemické složení $\text{LiNi}_x\text{Co}_x\text{Al}_x\text{O}_2$. Většina ostatních výrobců používá NMC složení tedy $\text{LiNi}_x\text{Mn}_x\text{Co}_x\text{O}_2$ a grafitovou anodu. Rozdíl mezi těmito technologiemi je v rozdílu stabilizace krystalové struktury lithiovaníkového oxidu. U technologie NCA se používá hliník a kobalt u MCA mangan a kobalt. NCA je díky tomuto složení levnější, jelikož používá levnější hliník. Články s NCA technologií dosahují mnohem vyšší energetické kapacity, ale je možné ji použít pouze pro články s nízkou celkovou kapacitou (maximálně 6 Ah). Je to z důvodu vyšší náchylnosti pro nekontrolovatelnou pozitivní zpětnou vazbu, která se u těchto článků začne projevovat již při nižších teplotách (viz kap. 1.1.4). Toto kapacitní omezení je ale pro cylindrické články dostatečná rezerva i do budoucna. Dále lze články s NCA technologií s dodrženu podmínkou dostatečného chlazení více zatěžovat. To znamená nabíjení a vybíjení při vyšších proudech. U modelu S se běžně pohybuje odběr kolem 4 až 5 C z důvodu vysokého výkonu motoru.

Z důvodu kapacitního omezení používají ostatní společnosti zabývající se výrobou elektromobilů, které většinou používají články prizmatické nebo Li-pol o vyšší kapacitě než 6 Ah technologii MCA. I z tohoto důvodu je řešení Tesly a použití velkého množství cylindrických článků o nízké kapacitě, které je sice konstrukčně náročnější a nese s sebou různé problémy jako nízká efektivita chlazení, výkonově o krok dále než konzervativní přístup konkurence.



Obr. 23 NCA a NMC krystalová mřížka [31].

V klasické cylindrické lithium-iontové baterii nalezneme grafitovou anodu, avšak snahou většiny výrobců je nahradit grafit pomocí křemíků a jeho oxidů. Jelikož křemík vysoce zvyšuje možnosti uložení energetické energie v baterii. Křemík dokáže uložit až desetkrát tolik energie vzato na objem materiálu a třikrát vzato na hmotnost. Proto v bateriových člancích Tesly najdeme kompozitní anodu z grafitu a křemíkových oxidů (5 až 15 % objemu anody). Problém s křemíkem je ale ten, že při nabíjení a vybíjení mění zásadně svůj objem. Grafit svůj objem při plném nabití zvýší přibližně o 13 %, ale křemík přibližně o 400 %. Tento jev je dále zkoumán a vyřešení tohoto problému přispěje k dalšímu navýšení kapacity baterií [30, 33-35].

Modul

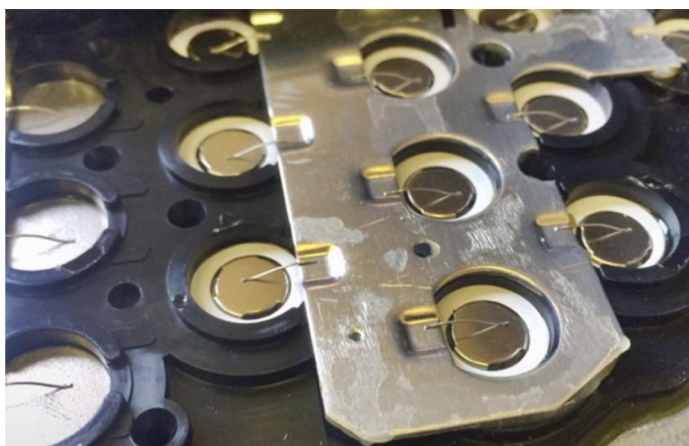
Tesla své bateriové boxy rozděluje na menší díly zvané moduly. V dnešních boxech používají 15 nebo 16 sériově zapojených modulů. Tyto se používají z několika důvodů. Prvním důvodem je snazší výroba. V boxu se nacházejí tisíce bateriových článků a spojů. Je mnohem snazší operovat s těmito menšími moduly, kontrolovat kvalitu a poté pospojovat do většího celku než vyrábět jeden obrovský.

Za druhé jde o bezpečnost práce se součástkami pod napětím. Nominální napětí modulu je 21,6 V. Maximální napětí jednoho modulu je 25,2 V. Jde tedy o bezpečné napětí, na které není třeba žádné speciální oprávnění. Dle normy ČSN je pro dotyk člověkem bezpečné napětí do 120 V DC.

Za třetí jde o zvýšenou bezpečnost při nárazu nebo selhání bateriového článku. Pokud by k takové události došlo, rozdělení do modulů snižuje rychlost šíření případně zamezí šíření případného požáru a tímto může ochránit posádku i zbývající funkční baterie a automobil.

V neposlední řadě jde o servisovatelnost baterie. Pokud by nastala nějaká závada, tak je mnohem snazší i levnější vyměnit jeden modul než kompletně celý bateriový box.

Každý modul obsahuje 444 bateriových článků spojených do zapojení 6s74p. Baterie v modulu jsou rozděleny na 6 paralelně spojených oblastí s vzájemně opačnou polaritou pro snadnější propojení do série. Na horní straně modulu je šest sběrnic s otvory a jednotlivé články jsou k ní přivařené ultrazvukově pomocí tavných pojistek ve formě tenkých niklových drátků. Toto lze vidět na obrázku 24. Ze spodní strany je také šest sběrnic s články přivařené stejnou technologií také pomocí tavných pojistek pro zvýšenou bezpečnost [31, 36].



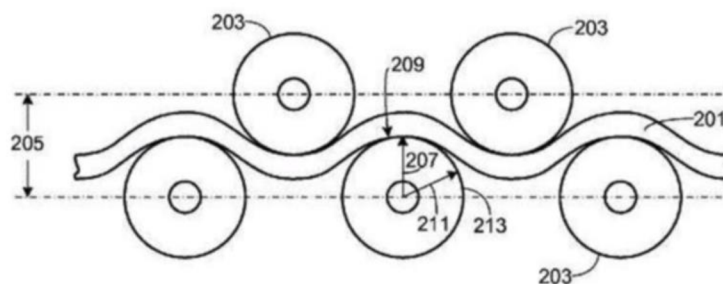
Obr. 24 Spojování článků ke sběrnici pomocí tavných pojistek [31].

Uvnitř modulu se dále nachází část thermal management systému (BTM). Jde o chladicí soustavu, kterou má Tesla patentovanou dle [37]. Skládá se z kovové ohýbané trubky s obdélníkovým průřezem, ve které proudí chladicí roztok vody a glykolu. Ohyby na trubce kopírují tvar bateriových článků a tím zvyšují styčnou plochu, čímž se zvyšuje efektivita chlazení a také je díky specifickému tvaru možné do jednoho modulu naskládat více baterií. Kovová trubka je obmotána izolačním materiálem s dobrou tepelnou vodivostí (bílá páska na obrázku). Díky tomu je odizolována od bateriových článků a zároveň se efektivně odevzdává vznikající teplo z baterií do chladicího systému. Konce trubky jsou obmotány kaptonovou páskou (oranžová páska), která zvyšuje izolační vlastnosti chladicího systému.

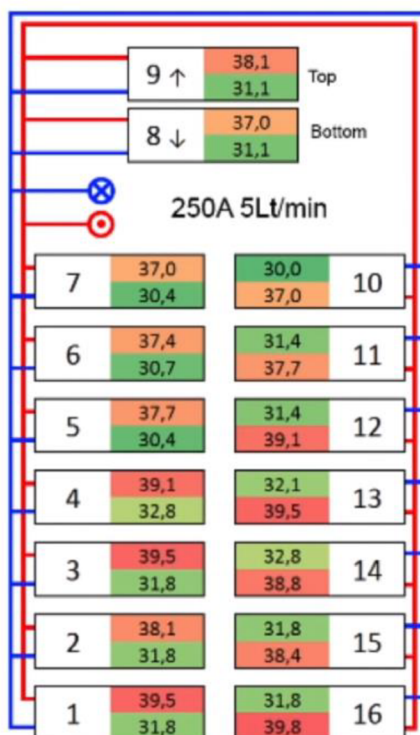
Chladicí soustava udržuje baterie v optimální provozní teplotě a zabraňuje vzniku nekontrolovatelné zpětné tepelné vazby. Tímto se zvyšuje životnost baterií a snižuje riziko požáru.



Obr. 25 Chladicí potrubí z BTM Tesla model S [31].



Obr. 26 Průřez modulu s TMS [37].



Obr. 27 Rozložení teplot v bateriovém boxu při nominálním zatížení 250 A [31].

Bateriové články s chladicí částí BTM jsou vloženy do plastovo-kovové krabice, která celý systém chrání před nečistotami, vlhkostí a poškozením. Krabice má dvě vyvedené elektrody pro kladný a záporný pól modulu. Dále obsahuje rozhraní pro připojení hadic s chladicí kapalinou a mechanický rám pro přišroubování do bateriového boxu.



Obr. 28 Modul z modelu S 6s74p [31].

Bateriový box

Na rozdíl od článku a modulu je bateriový box chytré zařízení, které dodává energii celé pohonné soustavě. Je aktivně řízen pomocí BMS pro maximální výkon, bezpečnost celého procesu nabíjení a vybíjení a balancování jednotlivých článků a modulů. Udržováním článků v optimální úrovni nabití a regulováním výkonu dle aktuálních podmínek je zajištěna dlouhodobá životnost celého systému.

Bateriový box je z mechanického hlediska masivní hliníkový odlitek, který je konstruován jako hlavní součást podvozku. Váží zhruba 120 kilogramů a obsahuje 450 kg baterií a další elektroniky. Dodává autu dostatečnou torzní tuhost pro dobrou jízdní dynamiku sportovního automobilu. Také musí splňovat náročné podmínky pro crash testy v kterých modely Tesla dosahují skvělých výsledků.

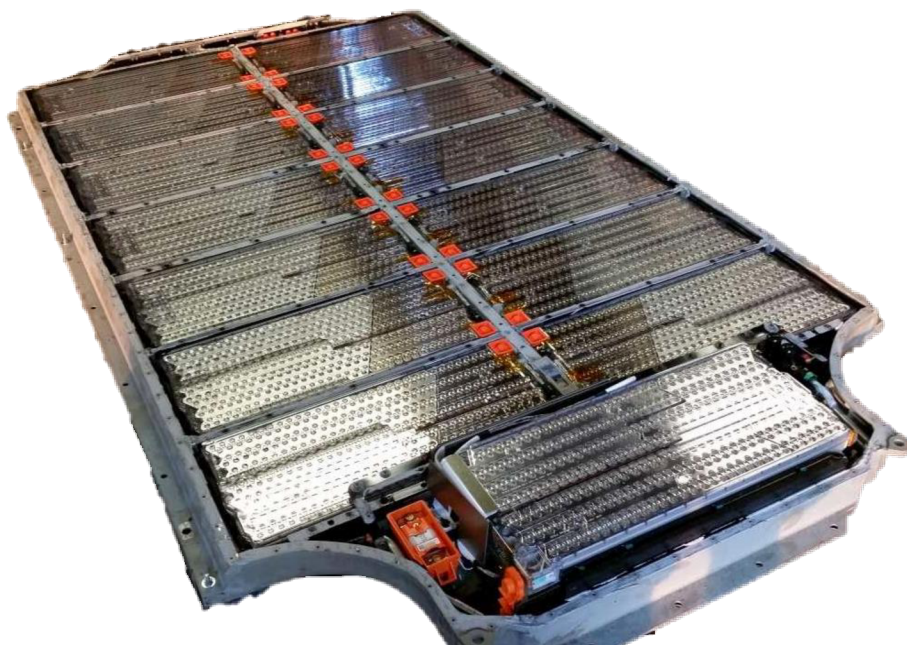
Na obrázku 29 je vnitřní část boxu, která je členěna na sekce pro jednotlivé moduly pomocí hliníkových profilů, které zvyšují tuhost celého zařízení, čímž zamezují průhybu boxu, pomáhají odolávat bočním nárazům do automobilu a zlepšují jízdní vlastnosti vozu. Členění na sekce přidává další úroveň bezpečnosti v případě poruchy nebo nehody, která by nastala pouze na jednom nebo části modulů. Pokud by nastal požár, tak se díky tomuto bude šířit pomaleji a posádka automobilu bude mít více času pro opuštění kabiny.

Jelikož je bateriový box hermeticky uzavřený, jsou pro případ požáru lithiových baterií instalovány fluoro-křemíkové ventily. Tyto se v případě přítomnosti horkých plynů, které vznikají při požáru baterií, ihned rozpustí a přebytečný tlak je vypuštěn do okolního prostředí, čímž se zamezí výbuchu bateriového boxu.



Obr. 29 Vnitřní struktura bateriového boxu Tesla model S [31].

Zapojení jednotlivých modulů do silové soustavy je realizováno pomocí sběrníc z 3 mm hliníkového poniklovaného plechu o užitečném průřezu pro vedení proudu 75 mm^2 , které moduly spojují do série. Bateriový box obsahuje hlavní pojistku, která v případě problému odstaví celý box od pohonné jednotky.



Obr. 30 Bateriový box Tesla model S 85D se zapojenými moduly [31].

Tab. 8 Přehled parametrů bateriového boxu TESLA Model S 85D.

Parametry	Článek	Modul	Bateriový box
Typ článků	li-ion	li-ion	li-ion
Nominální napětí [V]	3,66	21,6	345,6
Maximální napětí [V]	4,2	25,2	403,2
Kapacita 25 °C [Ah]	3,4	251,6	251,6
Hustota energie [Wh/kg]	254	200	170
Energie [kWh]	0,0124	5,43	85
Maximální dojezd [km]	-	-	350
Hmotnost [kg]	0,049	28,6	550
Typ zapojení	-	6S74P	90S74P
Nominální výkon [kW]	-	-	87 kW
Maximální výkon [kW]	-	-	480 kW

1.4 Technický popis automobilu SuperbEL II

Automobil Superb II. Generace (2010) byl přestavěn z původního dieselového motoru na čistě elektrický pohon. Automobil po přestavbě dosahoval dojezdu 200 km s průměrnou rychlostí 80 km/hod (při omezení komfortních prvků jako je klimatizace nebo topení), maximální rychlosti 140 km/hod a byly dodány prvky výbavy, které zajišťují bezpečný provoz elektromobilu.

1.4.1 Karoserie vozidla

Karoserie spolu s podvozkem je vyrobena firmou ŠKODA auto a.s. a byla darována VUT pro účely přestavby na elektromobil. Jde o luxusní kategorii limuzína. Celkem má 5 míst k sezení. Je ponechána původní přístrojová deska vozidla Škoda Superb II. Rozměry karoserie jsou zobrazeny na obrázku 31.



Obr. 31 Rozměry karoserie automobilu SuperbEL II.

1.4.2 Hmotnost vozidla

Hmotnost vozidla včetně přidané hmotnosti elektronické pohonné soustavy musí odpovídat hodnotám v technickém průkazu a nesmí je přesáhnout.

Provozní hmotnost vozidla: 1547 kg

Největší technicky přípustná hmotnost: 2110 kg

Největší technicky přípustná hmotnost na nápravu: 1200 kg

1.4.3 Elektrický motor

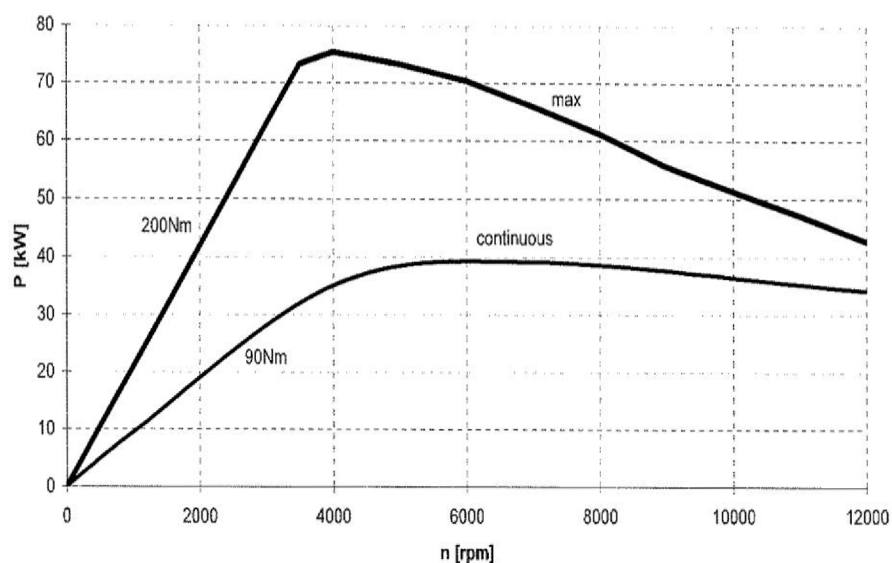
Pro přestavbu vozidla byl zvolen elektrický motor 1PV5133-4WS20 W11 od výrobce SIEMENS. Jde o indukční třífázový, vodou chlazený motor, který je v oblasti amatérských i profesionálních přestaveb automobilů velmi oblíbeným pro svou snadnou použitelnost, spolehlivost a dobrý poměr cena a výkon. Na dnešním trhu ho lze pořídit za 2.500 – 3.000 USD. Trakční propojení je realizováno schválenými vodiči s nehořlavou izolací, které jsou opatřeny oranžovou bužírkou. Tento motor používá mimo jiné americká automobilová společnost FORD pro svůj model EV Ford Ranger.

V EV Fordu Ranger je motor použitý ve spojení s bateriovým boxem postaveným na bateriových článcích s nikl – metal hybridní technologií. Pracuje s napětím 312 V, maximálním výkonem 75 kW a kapacitou 23 kWh.

Ve vozidle najdeme motor standardně pod přední kapotou, kde je přímo napojený na původní převodovku ze spalovacího motoru, jak vidíme na obrázku 33. Při jízdě se dá jeho chování srovnat se spalovacím benzínovým motorem a jízda je velice komfortní a předvídatelná. I pro řidiče, který nemá zkušenosti s elektromobily.



Obr. 32 Umístění motoru ve vozidle SuperBEL II.



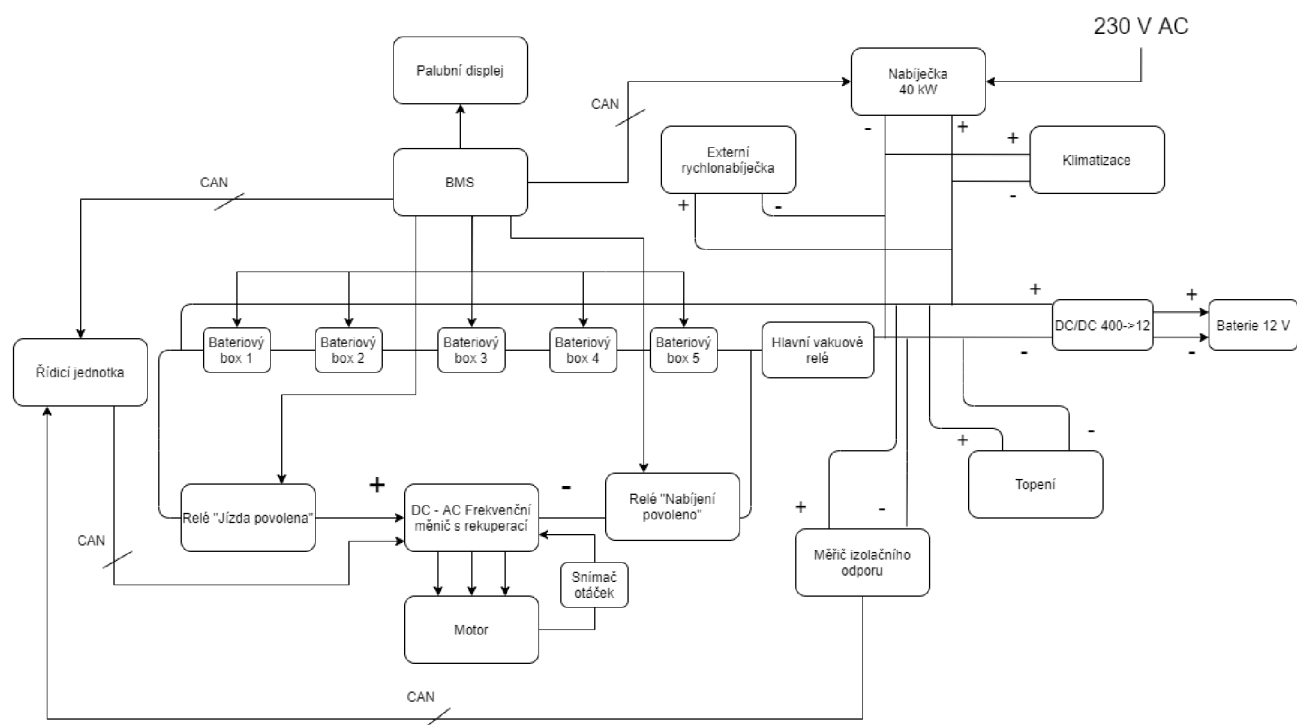
Obr. 33 Průběh výkonu motoru [38].

Tab. 10 Parametry motoru SIEMENS 1PV5133-4WS20 W11.

Parametry	1PV5133-4WS20 W11
Provozní napětí [V]	215-380
Maximální proud [A]	400
Dlouhodobý proud [A]	282
Špičkový výkon [kW]	75
Dlouhodobý výkon [kW]	40
Točivý moment [Nm]	200
Hmotnost [kg]	80 kg
Maximální otáčky [min^{-1}]	13.000

1.4.4 Elektrické schéma zapojení SuperbEL II

Elektromobil je komplexní elektromechanický systém. Na obrázku 35 je načrt zjednodušeného schématu zapojení celé pohonné soustavy. Hlavními prvky pohonné soustavy jsou BMS, řídicí jednotka, bateriové boxy, frekvenční měnič a motor. Bezpečnostní prvky jsou instalovány do soustavy, aby v případě problému nebo nehody odpojily silovou síť od soustavy. Jsou to pojistky na bateriových boxech, hlavní vakuové relé, měřič izolačního odporu a dále dvě relé kontrolované pomocí BMS, které umožňují spustit režim jízdy a nabíjení. Dalšími prvky soustavy jsou jednotky komfortu jako klimatizace, topení a nabíječka 12 V baterie.



Obr. 34 Elektrické schéma elektromobilu SuperbEL II.

1.4.5 Popis úprav pro elektrický pohon

Velká spousta systémů, ať už jde o systémy komfortu nebo bezpečnosti, které se v autě používají, přímo závisí na principu funkce spalovacího motoru. Proto pro zachování jejich funkcionality musí funkci spalovacího motoru nahradit substitučními systémy. Níže seznam nejdůležitějších úprav s ohledem na bezpečnost a komfort, které jsou již na autě instalovány z původní přestavby:

- Funkce a zapojení brzd
 - Podtlaková pumpa byla nahrazena elektrickou rotační pumpou, která je spínána podtlakovým čidlem
 - Při aktivaci ABS řídicí jednotka deaktivuje rekuperační brždění elektromotorem

-
- S pohybem pedálu se lineárně zvyšuje rekuperační účinek motoru
 - Řízení a posilovač řízení
 - Zde nebyly nutné žádné zásahy, jelikož automobil využívá elektrický posilovač řízení
 - Nové řídicí jednotky
 - Řídicí jednotka BMS
 - Kontroluje napětí jednotlivých článků baterie a zabezpečuje jejich optimální provozní podmínky během jízdy i nabíjení.
 - Hlavní funkcí z hlediska bezpečnosti je zapnout a vypnout povolení k jízdě po zapojení nabíjecího kabelu a po odpojení nabíjení
 - Homologování dle EHK 10.
 - Řídicí jednotka E-Gateway
 - Zajišťuje komunikaci mezi trakčním měničem, BMS a vozidlem. Zabezpečuje ovládání indikátorů a přístrojů přístrojové desky v kabině.
 - Homologování dle EHK 10.
 - Klimatizace
 - Jelikož je klimatizace v automobilu se spalovacím motorem poháněna rozvodou motoru – bylo třeba najít vhodný substitut. Pro toto použití byl vybrán kompresor 36CC Series Sensorless Brushless DC Electric Compressor. Ovládací napětí 12 nebo 24 V. Maximální výkon 3 kW.

2 NÁVRH BATERIOVÉHO BOXU

V této kapitole je popsán návrh bateriového boxu pro elektromobil SuperEl II. Je postaven na technologii cylindrických lithium-iontových bateriových článků. Jednotlivé bateriové články jsou pospojované do modulů pomocí plastových držáků. Energie je svedena z článků pomocí tavných pojistek na sběrnice, které vedou elektrickou energii přes kabeláž dále přes pojistky z bateriových boxů. Každý modul je spojen s jedním BMS modulem, který řídí jeho nabíjení, vybíjení a teplotu pomocí termočlánku umístěného uvnitř modulů.

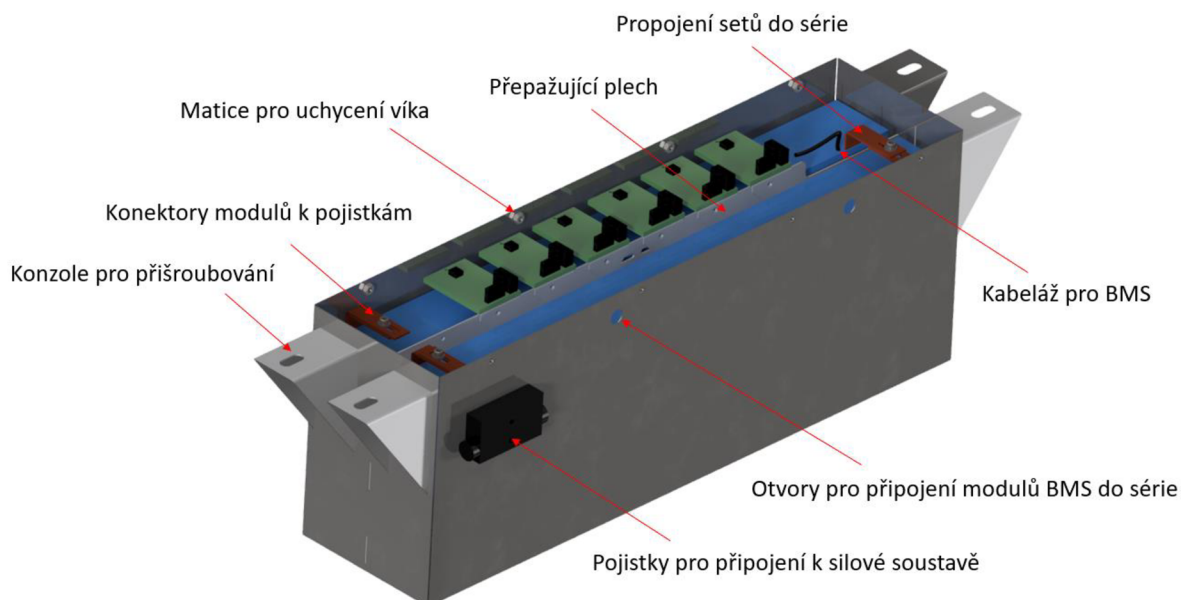
Box je rozdělen na jednotlivé komory přepažovacím plechem o tloušťce 1 mm, který funguje jako přepážka s několika funkcemi. Zaprvé zvyšuje pevnost a tuhost boxu a zabraňuje jeho průhybu pod vahou akumulátorů a přidržuje bateriové moduly na správném místě. Zadruhé jeho umístění jako fyzického oddělovače dvou samostatných komor v případě požáru na jednom z modulů zpomalí hoření a šíření plamene v boxu. A za třetí bude sloužit k přišroubování jednotlivých modulů BMS, ke kterým se přivedou vývody z jednotlivých modulů.

Bateriové moduly jsou uloženy v boxech z plechů z korozi vzdorné oceli 1.4301 a z plechů z hliníkové slitiny EN AW 1050A. Materiál je zvolen v závislosti na pracovním prostředí boxu a na jeho zatížení. Tyto jsou vypáleny pomocí hydroabrazivního paprsku. Dále jsou ohýbány na ohraňovacím lisu a poté svařeny metodou TIG. Plechy jsou fosfátovány a lakovány pro dosažení vyšší korozi vzdornosti a elektroizolačních vlastností.

Dále je box vystlán netkanou textilií se sníženou hořlavostí, která tlumí otřesy a dodatečně zabraňuje elektronickému kontaktu baterií s boxem.

Jednotlivé zaizolované sety modulů budou vloženy do boxu vyloženého netkanou textilií a jejich konektory budou sešroubovány. Dále se přišroubují konektory krajních modulů ke konektorům pojistek. Na závěr se propojí konektory od baterií k jednotlivým modulům BMS.

V principu jde o spojení původní technologie s upravenou technologií, kterou používají elektromobily společnosti Tesla.



Obr. 35 Pohled dovnitř bateriového boxu 2

2.1 Porovnání a výběr bateriových článků

Porovnáním jednotlivých technologií akumulátorů z kapitoly 1 vychází, že v úvahu přichází nejvíce akumulátory s lithiium-iontovou technologií. Konkrétně se pro porovnání vybrali tři nejzajímavější zástupci:

- 21700-5000
- 18650-3500
- LFP25

Nejvýhodnější pro použití v elektromobilu Super EL II jsou články 18650-3500 a 21700-5000, které mají největší gravimetrickou energetickou hustotu a to 274 a 264,3 Wh/kg. Pro porovnání jsem také použil články Li-Fe-PO₄ o velikosti 160 Ah, které se používaly v předchozí verzi bateriového boxu. Cylindrické lithiium-iontové články se dají velice snadno poskládat do jednotlivých modulů o potřebné velikosti a kapacitě. Z hlediska výkonu jsou oba články velice podobné. Články mají stejné nominální napětí 3,6 V a maximální 4,2 V. Oba typy dokážou dodávat trvale proud o velikosti 2 C. V případě prvního jmenovaného jde až o 10 A u druhého 7 A.

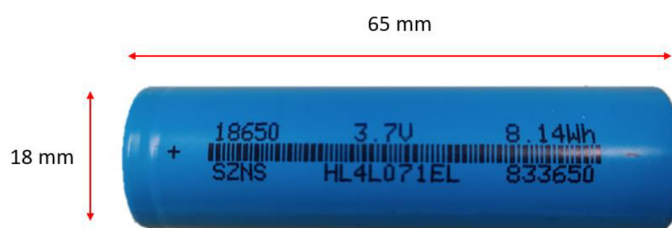
Z předběžného odhadu plánované kapacity bateriového boxu lze usoudit, že oba články jsou dostatečně dimenzované pro toto použití. Díky velikosti bateriového boxu budou články zatěžovány minimálně. Z toho vyplývá i minimální zahřívání článků při zátěži. Díky velikosti kapacity bateriového boxu a malému výkonu motoru si můžeme dovolit v konstrukčním řešení opominout chladicí systém baterií. Čímž se celá sestava výrazně zjednoduší.

V případě článků 21700-5000 je problém s jejich dostupností a také jsou dražší v porovnání s 18650-3500. Je to z toho důvodu, že jde o novinku, která ještě není vyráběna v takovém množství jako články 18650. Porovnání parametrů jednotlivých článků vidíme v tabulce 9.

Tab. 9 Porovnání vybraných článků [Zdroj: Katalog firmy BatteryX].

Typ článku	21700	18650	Li-Fe-PO ₄
Nominální napětí [V]	3,6	3,6	3,3
Maximální napětí [V]	4,2	4,2	3,7
Kapacita 25 °C [mAh]	5000	3500	160.000
Hustota energie 25 °C [Wh/kg]	264,3	274	133,3
Max. vybíjecí proud [C]	2	2	3
Počet cyklů 80 % DOD	800	800	3.000
Hmotnost článku [kg]	0,07	0,046	4
Prodejní cena 1 kWh [Kč]	7.153	6.599	8.159,06
Prodejní cena za ks bez DPH [Kč]	130,9	83,92	652,72
Maximální napětí [V]	4,2	4,2	3,65
Konečné vybíjecí napětí [V]	2,75	2,75	2,5

Z údajů v tabulce 9 vychází nejlépe článek 18650 s kapacitou 3500 mAh. Má největší gravimetrickou hustotu energie a také vychází v přepočtu na 1 kWh energie levněji než článek 21700. S bateriovým článkem typu 21700 by se výrazně usnadnila výroba bateriového boxu z důvodu výrazně nižšího počtu článků, avšak tento důvod neopodstatňuje podstatně vyšší cenu za nákup bateriových článků.



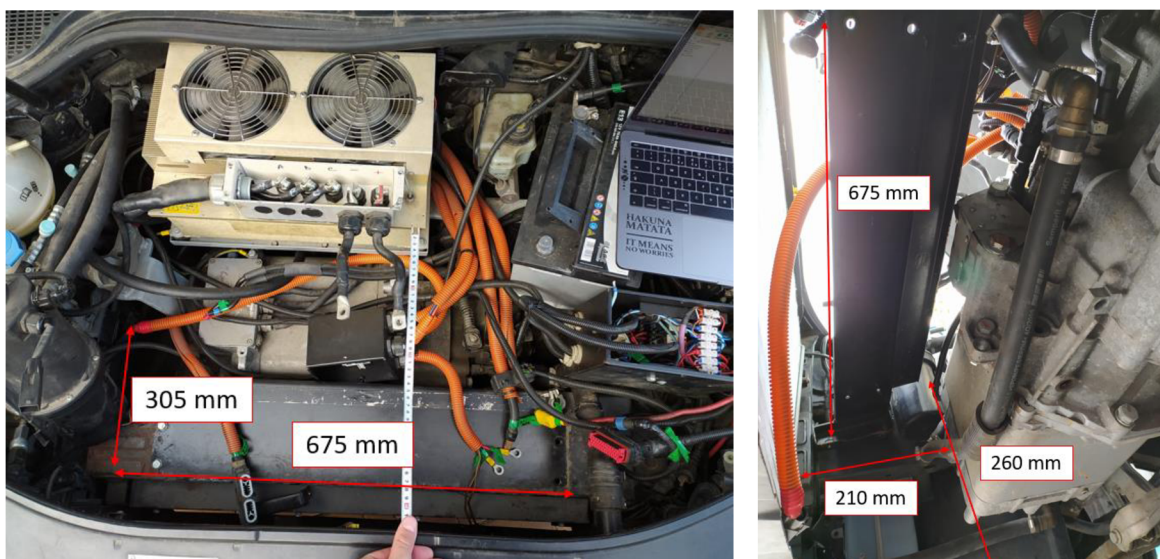
Obr. 36 Bateriový článek 18650.

2.2 Analýza prostor automobilu VUT SuperEL II

Prvním krokem pro kvalitní návrh nového bateriového boxu je analýza prostor automobilu. Vytipovat místa, kam všude by se daly vložit baterie s ohledem na mechanické a elektronické vlastnosti automobilu a bateriové sestavy. Baterie 18650 INR 3500 2C z katalogu firmy BatteryX byly vybrány pro svou vysokou gravimetrickou energetickou hustotu. Tyto baterie mají přesně dané standardizované rozměry 65x18 mm.

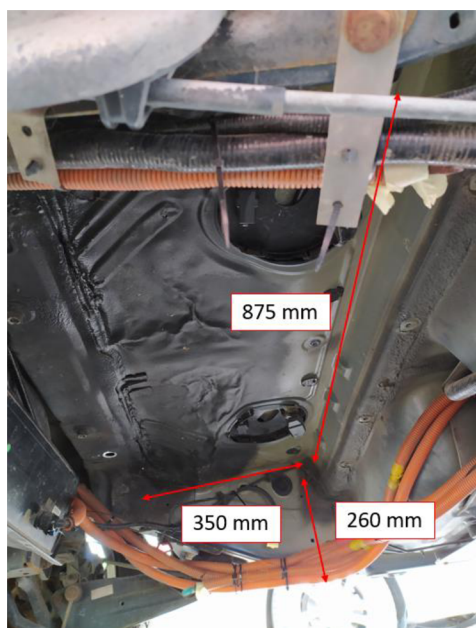
Při výběru míst pro umístění baterií se vycházelo z původního umístění bateriových boxů a dále se hledal patřičný zatím nevyužitý prostor. Tohoto prostoru v automobilu není mnoho, protože automobil je zkonstruovaný jako komplexní výrobek a každá součást má svůj účel. Původním plánem bylo oskenovat automobil na 3D skeneru a poté tyto datové podklady využít pro konstrukci bateriových boxů. Ale po důkladném zvážení se došlo k závěru, že by šlo o nadbytečně komplikované řešení. Vhodnější variantou bylo naměřit prostory pomocí klasických měřidel. Po průzkumu automobilu a konzultacích s Dr. Marušincem byly zvoleny prostory vhodné pro umístění bateriových boxů:

- Motorový prostor pod přední kapotou (1, 2)
 - Díky odstranění ICE se vytvořil významný prostor v motorovém prostoru. Po přeměření se ukázalo, že je možné umístit dva bateriové boxy o rozměrech 675 x 210 x 210 mm a 635 x 305 x 260 mm.



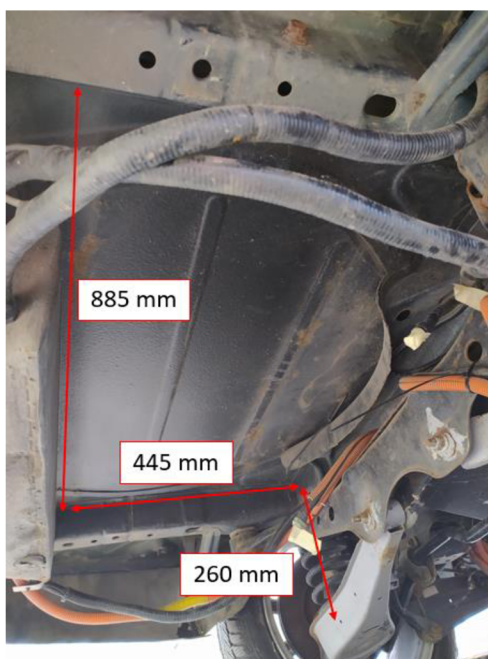
Obr. 37 Motorový prostor box 1 a box 2

- Prostor před zadní nápravou (3)
 - Zde je v klasickém automobilu umístěna palivová nádrž. Předchozí bateriový box byl také situován v tomto místě. Díky použití modulů s bateriemi 18650 je možné dokonce tento box vytvořit nižší oproti předcházejícímu a navýšit tak světlou výšku automobilu, která byla z důsledku umístění battery packu snížena. Celkový prostor pro baterie činí 875 x 350 x 260 mm.



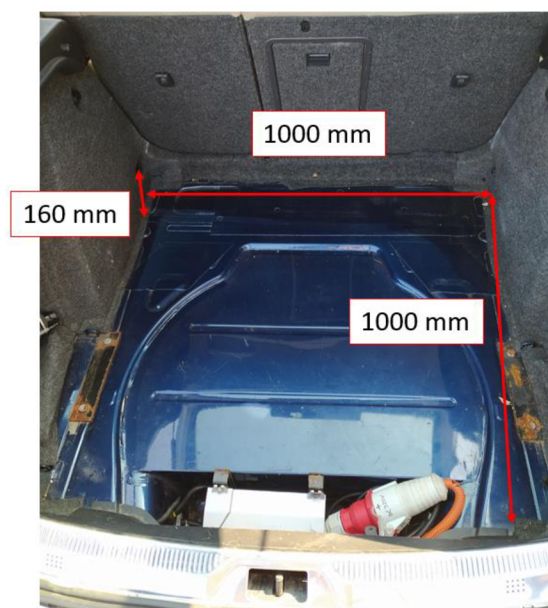
Obr. 38 Prostor před zadní nápravou pro box 3

- Mezi zadní nápravou kufrem (4)
 - Tento prostor o rozměrech 885 x 445 x 260 mm je vhodný pro umístění velkého množství baterií. Zde bude umístěn největší bateriový box z celé sestavy. Jde o prostor určený ke skladování rezervní pneumatiky.



Obr. 39 Prostor pro rezervu, kde bude umístěný box 4.

- Kufrový prostor (5)
 - Kufrový prostor zatím pro účel uložení baterií využit nebyl. Díky tomu, že karoserie automobilu, s kterým disponujeme obsahuje nadstandardně velký kufrový objem – je možné sem bez ztráty komfortu umístit také velké množství baterií. Využitelný prostor je 1000 x 1000 x 160 mm.



Obr. 40 Prostor v kufru pro box 5.

2.3 Návrh elektronických parametrů bateriového boxu

Pro návrh parametrů bateriového boxu je klíčové určit si jaké dispozice bude celý bateriový box mít. Jde o návrh paralelního a sériového zapojení jednotlivých článků. Tento počet se univerzálně označuje $XsXp$ (Počet článků zapojených sériově a počet článků zapojených paralelně). Spojením článků do série získáme vyšší celkové napětí. Spojením článků paralelně získáme vyšší kapacitu celkové sestavy.

Okrajovými podmínkami jsou napájecí napětí frekvenčního měniče, které činí maximálně 350 V. Nominální napětí 300 V. A maximální únosnost vozidla bez cestujících, které činí dle technické dokumentace s upraveným a zesíleným podvozkem 670 kg. Pro výpočet nutného počtu sériově zapojených baterií podělíme maximální dovolené napájecí napětí na frekvenčním měniči maximálním napětím baterie. Výsledkem je počet článků, které zapojíme do série pro získání zamýšleného napětí.

$$\frac{350 \text{ V}}{4,2 \text{ V}} = 83,33 \text{ ks} \quad (4)$$

Zvoleno 84s.

Nominální napětí navrhovaného bateriového boxu:

$$84 \text{ ks} * 3,6 \text{ V} = 302,4 \text{ V} \quad (5)$$

Maximální napětí navrhovaného bateriového boxu:

$$84 \text{ ks} * 4,2 \text{ V} = 352,8 \text{ V} \quad (6)$$

Nyní vypočteme maximální počet článků, které jsme schopni umístit do vybraných prostorů. Ve výpočtu se počítá s rezervou pro umístění baterií.

2.3.1 Výpočet maximálního počtu baterií pro uložení v boxech

Ve výpočtu se vychází z maximálního změřeného volného prostoru v automobilu, kam je možné baterie umístit. Dále z rozměrů baterií s přidavkem pro rozmístění v držáku. Výpočet poslouží k odhadu maximálního počtu kusů bateriových článků, které do těchto prostor můžeme uložit. Tento odhad poté porovnáme s únosností automobilu a dle tohoto počet baterií vhodně nadimenzujeme. V potaz je nutné brát v potaz dispozice baterie, které činí 84s. Dalším výpočtem získáme velikost modulu a maximální kapacitu bateriového boxu.

Tab. 11 Přehled prostor automobilu vhodných pro umístění bateriových boxů.

Rozměr	1	2	3	4	5
Výška [mm]	210	250	250	250	160
Šířka [mm]	210	305	350	445	1000
Délka [mm]	675	635	875	885	1000
Objem [m ³]	0,0298	0,05	0,079	0,02	0,16

- 1 – Kufrový prostor nad motorem
- 2 – Kufrový prostor pod motorem
- 3 – Umístění palivové nádrže
- 4 – Prostor pro rezervní pneumatiku pod kufrem
- 5 – Kufrový prostor

Výpočet prvního boxu

1. Bateriový box – výška

$$\frac{210}{65} \approx 3 \text{ ks} \quad (7)$$

1. Bateriový box – šířka

$$\frac{210}{20} \approx 10 \text{ ks} \quad (8)$$

1. Bateriový box – délka

$$\frac{675}{20} \approx 33 \text{ ks} \quad (9)$$

$$\text{Celkem: } 3 \times 10 \times 33 = 990 \text{ ks} \quad (10)$$

Výpočet druhého boxu

2. Bateriový box – výška

$$\frac{250}{65} = 3 \text{ ks} \quad (11)$$

2. Bateriový box – šířka

$$\frac{305}{20} \approx 15 \text{ ks} \quad (12)$$

2. Bateriový box – délka

$$\frac{635}{20} \approx 31 \text{ ks} \quad (13)$$

$$\text{Celkem: } 3 \times 15 \times 31 = 1.395 \text{ ks} \quad (14)$$

Výpočet třetího boxu

3. Bateriový box – výška

$$\frac{250}{65} = 3 \text{ ks} \quad (15)$$

3. Bateriový box – šířka

$$\frac{350}{20} \approx 17 \text{ ks} \quad (16)$$

3. Bateriový box – délka

$$\frac{875}{20} \approx 43 \text{ ks} \quad (17)$$

$$\text{Celkem: } 3 \times 17 \times 43 = 2.193 \text{ ks} \quad (18)$$

Výpočet čtvrtého boxu

4. Bateriový box – výška

$$\frac{250}{65} = 3 \text{ ks} \quad (19)$$

4. Bateriový box – šířka

$$\frac{445}{20} \approx 22 \text{ ks} \quad (20)$$

4. Bateriový box – délka

$$\frac{885}{20} \approx 44 \text{ ks} \quad (21)$$

$$\text{Celkem: } 3 \times 22 \times 44 = 2.904 \text{ ks} \quad (22)$$

Výpočet pátého boxu

5. Bateriový box – výška

$$\frac{160}{65} = 2 \text{ ks} \quad (23)$$

5. Bateriový box – šířka

$$\frac{1000}{20} \approx 50 \text{ ks} \quad (24)$$

5. Bateriový box – délka

$$\frac{1000}{20} \approx 50 \text{ ks} \quad (25)$$

$$\text{Celkem: } 2 \times 50 \times 50 = 5.000 \text{ ks} \quad (26)$$

Celkový počet článků je sumou dílčích výsledků.

$$\sum 990 + 1.395 + 2.193 + 2.904 + 5.000 = 12.482 \text{ ks} \quad (27)$$

Nyní zkontrolujeme okrajovou podmínku únosnosti automobilu. Celková hmotnost bateriových článků:

$$12482 \text{ ks} * 0,046 \text{ kg} = 574,17 \text{ kg} \quad (28)$$

$$574 \text{ kg} < 670 \text{ kg}$$

Z hlediska únosnosti vozidla byl zvolen nižší počet článků v počtu 11.000 ks. Jelikož nemůžeme započítat pouze hmotnost bateriových článků, ale také hmotnost kabeláže, konektorů a mechanických součástí. Jelikož má tato hmota u bateriového boxu nezanedbatelný vliv – je třeba počítat s dostatečnou rezervou z hlediska hmotnosti.

Celková hmotnost upraveného počtu kusů:

$$11.000 \text{ ks} * 0,046 \text{ kg} = 506 \text{ kg} \quad (29)$$

$$506 \text{ kg} < 670 \text{ kg}$$

Nyní můžeme vypočítat počet paralelně spojených článků v jednom sériovém modulu.

$$\frac{11.000}{84} = 130,9 \text{ ks} \quad (30)$$

Zvoleno 130p z hlediska jednodušší práce s bateriovým modulem a jeho tvarováním.

Reálný počet článků:

$$84 * 130 = 10.920 ks \quad (31)$$

2.3.2 Výpočet kapacity bateriového boxu

Nominální energie v jednom článku:

$$3,6 V * 3,5 Ah = 12.6 Wh \quad (32)$$

Celková uložená energie v článcích vyjádřená v ampérhodinách:

$$130 * 3,5 Ah = 455 Ah \quad (33)$$

Celková uložená energie v článcích vyjádřená v kilowatthodinách:

$$10.920 ks * 12,6 Wh = 137,592 kWh \quad (34)$$

Teoretický výpočet dojezdu elektromobilu s novým bateriovým boxem na jedno nabití v ekonomickém módu jízdy:

$$\frac{137,592 kWh}{14 \frac{Wh}{km}} = 982,8 km \quad (35)$$

Pro srovnání můžeme využít nezávislého testu dojezdu elektromobilů, který prováděl autosalon.tv, kde jako vítěz vzešel Jaguar I-Pace. Jeho dojezd činí přibližně 470 km. V našem případě tedy jde o dvakrát vyšší dojezd než u nejlepšího komerčně dostupného řešení. [5]

Nyní je možné přejít k návrhu a modelování modulu s parametry 84s130p a spojování těchto modulů do sestav jednotlivých bateriových boxů.

2.4 Návrh modulu bateriového boxu

Vypočtené parametry se vizualizovaly v 3D modelu pomocí CAD software Autodesk Inventor 2020. Na základě výpočtů v kapitole 2.3 byl zvolen počet článků v modulu na 130 ks. Modul se skládá z 26 těchto držáků a 130 kusů bateriových článků. Na obrázku 41 je model modulu 1s130p.

Pro spojování článků do modulů se vybralo komerčně dostupné řešení. Ačkoliv se původně zvažovala výroba mechaniky modulů pomocí 3D tisku z materiálu PET. Tato myšlenka se zavrhla z hlediska časové náročnosti výroby pomocí 3D tisku, výsledné ceny mechanických držáků, která by převyšovala nákupní cenu dostupných běžně používaných komponent a z hlediska bezpečnosti. Materiály pro 3D tisk, které jsou běžně dostupné nemají nehořlavou alternativu. Hořlavé materiály je nevhodné při výrobě bateriových boxů používat.

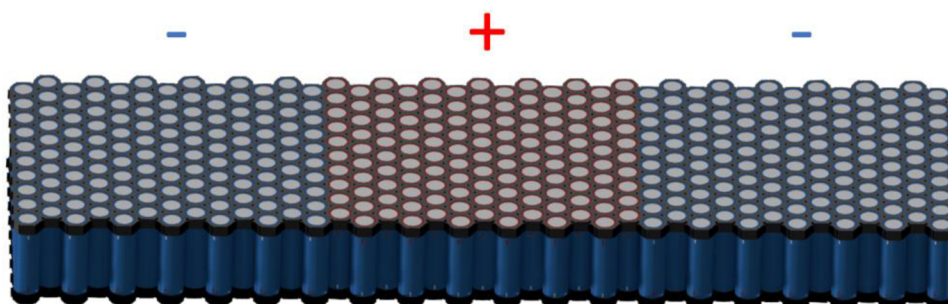
Z dostupných možností se vybral hexagonální držák baterií z e-shopu aliexpress.com, který pojme 10 baterií a dá se snadno nerozebíratelně spojit do větších modulů. Byl zakoupen v dostatečném množství pro stavbu všech bateriových boxů za cenu celkem v desítkách dolarů.

Po otestování na prototypu modulu se ukázalo, že jde o vhodné řešení. Baterie drží na místě velmi pevně, modul je velmi tuhý – neohýbá se a baterie z něj nemají tendenci vypadávat. Baterie z držáku lze vyjmout až po značném vynaloženém úsilí.



Obr. 41 3D model paralelního modulu 1s130p.

Zvolené řešení umožňuje propojení jednotlivých modulů do setů po třech nebo čtyřech. Počet modulů v setu se odvíjí od velikosti boxu. Propojením modulů do setu ušetříme šroubované spoje mezi jednotlivými moduly a celá sestava bude obsahovat méně samostatných součástí. Jednotlivé moduly se skládají vedle sebe opačně dle polarity, aby se daly snadno sériově propojit pomocí sběrnic.



Obr. 42 Spojení modulů do setu po třech.

2.4.1 Spojování článků v modulu

Články v modulu budou spojeny paralelně pomocí tavných pojistek ke sběrnici z měděného plechu o tloušťce 0,8 mm, která byla vyvinuta pro toto použití. Sběrnice bude zároveň sloužit k propojení jednotlivých bateriových modulů do série pomocí šroubového spoje. Pro účely stavby bateriového boxu byly vyvinuty různé typy sběrnic. Jde o tenké měděné plechy vyřezané pomocí vodního paprsku. Vyřezaná geometrie slouží pro možnost připojení tavné pojistky k článku.

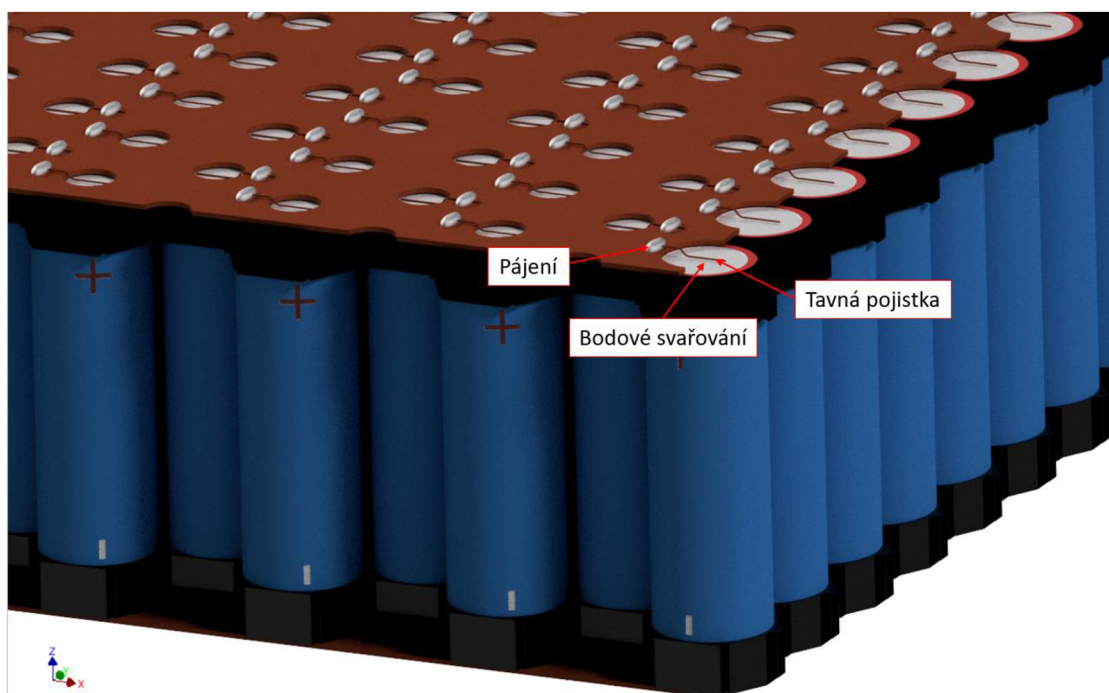
Měď byla zvolena pro sběrnici především díky své nízké rezistivitě proti vedení elektrického proudu. Tato při uvažování standardní teploty a tlaku dosahuje hodnoty až $0,0172 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

Tavné pojistky budou s bateriovými články bodově svařeny. Se sběrnici budou pájeny z důvodu nízkého přechodového odporu a jelikož bodové svařování neumožňuje spojení takovýchto dvou měděných součástí.

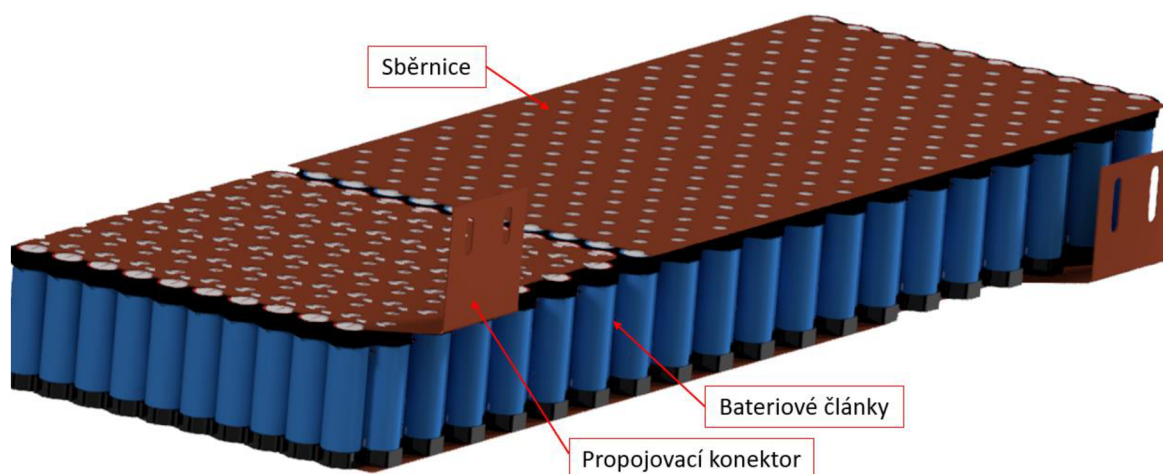
Celkem obsahuje kompletní sestava 10.920 kusů bateriových článků. To znamená 21.840 svařovaných a stejný počet pájených spojů.

V původním návrhu měla sběrnice tloušťku 2 mm kvůli dostatečnému průřezu pro proud. Toto řešení by však bylo neekonomické a hmotnostně neefektivní. Proto byl vybrán plech o tloušťce 0,8 mm a úzká místa byla zesílena. Propojení jednotlivých sběrnic je realizováno vždy pomocí dvou šroubů pro vyšší bezpečnost a zamezení vzniku elektrického oblouku v bateriovém boxu.

Jednotlivé moduly budou podle potřeby složeny do setů po třech a po čtyřech z důvodu usnadnění práce s moduly a nižšího počtu šroubovaných spojů. Příklad setu opatřeného sběrnicemi. Viz obrázek 44.



Obr. 43 Spojování bateriových článků ke sběrnici přes tavnou pojistku.



Obr. 44 Set tří modulů v zapojení 3s130p.

2.4.2 Pojistka bateriových článků

Tavná pojistka na jednotlivých člancích je klíčovým prvkem bezpečnosti. Pokud některý článek bude obsahovat vadnou izolaci nebo jinou výrobní vadu, může vzniknout vnitřní zkrat baterie. Článkem začne procházet proud v řádu stovek ampér a baterie se začne zahřívat a později i hořet. Lithiová baterie začíná hořet již při teplotě kolem 500 °C. [7] Efektivní průřez pojistky byl určen dle maximálního proudu, který pojistkou může protékat do přepálení. Z výpočtu vychází, že maximální proud z jedné baterie nepřesáhne 2 A. Pojistka musí tedy tento proud zvládnout bez problému přenášet. Pokud bychom zvolili průřez příliš malý, pojistkový drát by se zbytečně zahříval. Proto byl zvolen měděný drát o průměru 0,3 mm. Experimentem bylo otestováno, že zvolený průřez se do 5 A při průchodu proudu nezahřívá. Při proudu 15 A a více se okamžitě přepálí a odpojí obvod.

Výpočet potřebného proudu z jednoho článku při špičkovém výkonu motoru:

$$\frac{\text{Špičkový výkon motoru}}{\text{Kapacita battery packu}} = \frac{75 \text{ kW}}{137,592 \text{ kWh}} = 0,545 \text{ C} \cong 1,9 \text{ A} \quad (36)$$

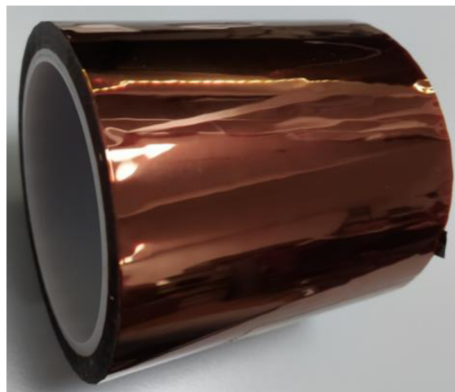
Výpočet potřebného proudu z jednoho článku při dlouhodobém odběru výkonu:

$$\frac{\text{Dlouhodobý výkon motoru}}{\text{Kapacita battery packu}} = \frac{40 \text{ kW}}{137,592 \text{ kWh}} = 0,29 \text{ C} \cong 1 \text{ A} \quad (37)$$

2.4.3 Obal a izolace modulů

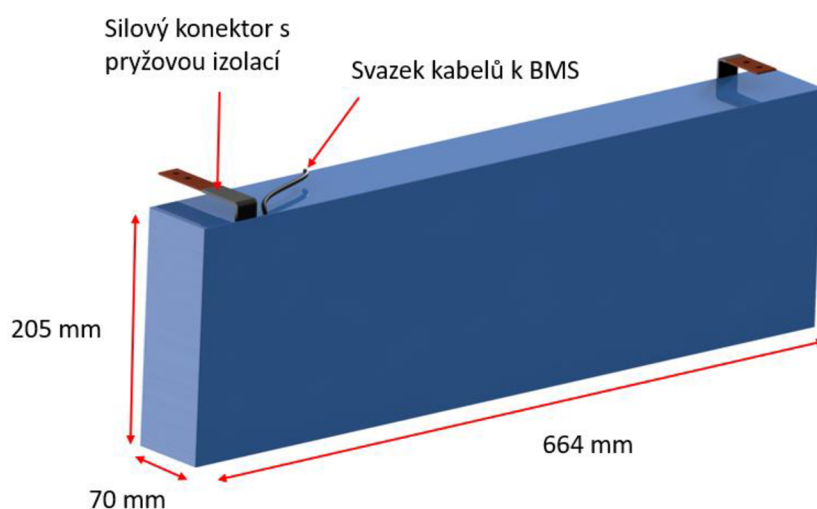
Jednotlivé moduly musí být chráněny vůči vnějším vlivům a odizolovány vůči celé sestavě. Pro toto použití je vhodná kaptonová páska a smršťovací fólie.

Kaptonová páska je přilepena na sběrnice na horní a spodní stranu modulu. Chrání tavné pojistky před mechanickým porušením a elektronicky izoluje kontakty.



Obr. 45 Kaptonová páska

Celý modul je zabalen do smršťovací fólie a poté působením tepla pevně stáhnut. Z modulu jsou vyvedeny pouze silové konektory pro připojení a konektory pro BMS. Silové konektory mají na sobě navlečenou izolaci z pryže pro omezení kontaktu s okolím.



Obr. 46 Zaizolovaný set tří modulů 3s130p.

2.4.4 Battery management systém BMS

Pro řízení optimálního nabíjení a vybití baterií bylo zvoleno řešení od firmy GWL Europe Ltd. Konkrétně jde o jednotku RT-BMS. Tato jednotka umí ovládat až 192 sériově zapojených článků pomocí modulů nazvaných „Cell balancing unit“ (CBU). Pro naše potřeby plně postačuje (84s < 192s). Jednotlivé články mají na sobě jednotku, která snímá údaje o napětí a přenáší je do centrální řídicí jednotky (Master RT-BMS CU), která je umístěna v motorovém prostoru pro snadný přístup.

Každý bateriový modul bude obsahovat jeden modul BMU. Zapojení jednotlivých modulů je provedeno tak, že kladný pól modulu je přiveden na BMU a jednotlivé BMU jsou pospojované do série. Do centrální jednotky je poté přiveden jeden kabel ze záporného pólu baterie a jeden kladný kabel ze série modulů. Pomocí komunikace přes CAN bus je centrální řídicí jednotka schopná rozpoznat a řídit napětí na jednotlivých člancích a tyto informace předat hlavní řídicí jednotce.



Obr. 47 Modul CBU a Master RT-BMS CU.

2.5 Návrh výroby bateriových boxů

Boxy budou vyrobeny v několika provedeních. Boxy zavěšené pod automobilem budou vyrobeny z plechů z ošetřené korozivzdorné oceli kvůli zvýšeným korozním podmínkám a nebezpečí nárazu. Méně zatížené boxy budou vyrobeny z plechu o tloušťce 1 mm. Boxy, které obsahují více baterií budou vyrobeny z plechů o tloušťce 1,5 mm. Přípojné konzole budou vyrobeny vždy z plechu o tloušťce 1,5 mm. Boxy umístěné v automobilu budou vyrobeny z hliníkové slitiny o tloušťce 2 mm z důvodu ušetření hmotnosti. Víka všech boxů budou vyrobeny ze stejné hliníkové slitiny.

Základem svařence je výpalek z plechu. Tento bude dále pozohýbán na ohraňovacím lisu dle znázorněných přehybových čar a poslán dále na svařování pomocí technologie Tungsten inert gas (TIG). Výhodou této technologie je vysoká výsledná kvalita svaru. Svar je těsný a vzhledný. Také se materiál málo deformuje [39].

2.5.1 Výběr materiálu pro boxy

Boxy zavěšené pod automobilem budou vyrobeny z válcovaných plechů za studena z austenitické chrom-niklové korozivzdorné oceli ČSN 10088-1 1.4301 (X5CrNi18-10). Tento materiál byl vybrán díky své výborné odolnosti vůči koroznímu prostředí, a navíc jde o běžně používaný materiál, který má dobrou svařitelnost, tažnost a tvářitelnost. Podstatnou vlastností této oceli je i její houževnatost. Z důvodu prostředí podvozku, kde může dojít k nárazům. [45]

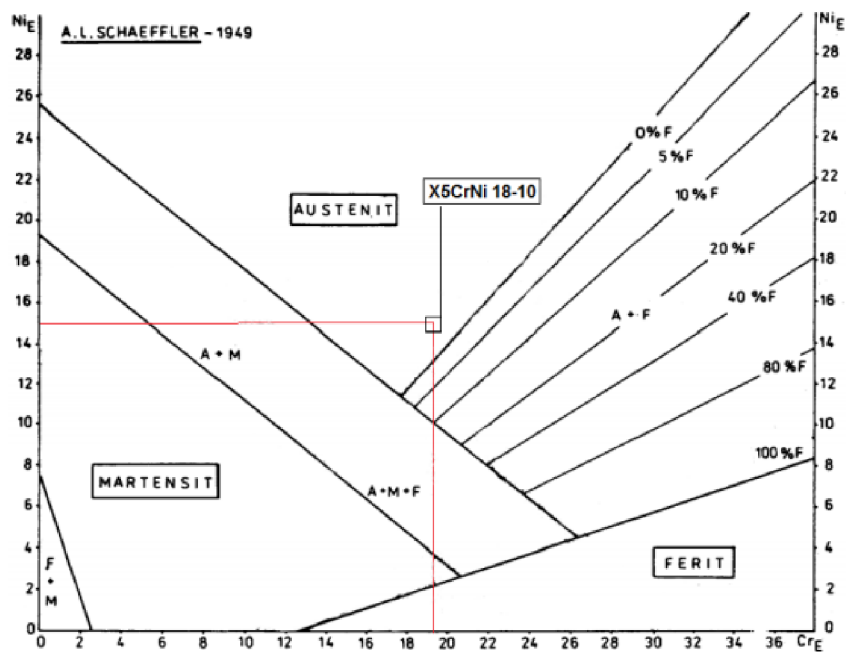
Tab. 12 Chemické složení materiálu 1.4301 [46].

C (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mn (%)	Si (%)	N (%)	S (%)
<0,07	17-19,5	8-10,5	<2	<1	<0,11	<0,03

Pro ověření struktury materiálu přepočteme složení materiálu na chromový a niklový koeficient. Poté hodnoty vyneseme do schaefflerova diagramu a odečteme strukturu materiálu. [41]

$$Cr_E = 18 + 1,5 * 1 = 19,5 \% \quad (38)$$

$$Ni_E = 10 + 0,5 * 2 + 30 * 0,007 + 30 * (0,11 - 0,05) = 14,9 \% \quad (39)$$



Obr. 48 Schaefflerův diagram s vyznačenou oblastí odpovídající oceli X5CrNi 18-10 [40].

Mechanické vlastnosti oceli 1.4301 [45]:

- Mez kluzu v tahu $R_e = 230$ MPa
- Mez pevnosti $R_m = 540$ MPa
- Poissonova konstanta $\mu = 0,3$
- Modul pružnosti v tahu $E = 200$ GPa
- Modul pružnosti ve smyku $G = 77$ GPa
- Hustota $\rho = 7900$ kg/m³

Boxy umístěné v automobilu a také víka všech boxů budou vyráběny z hliníkové slitiny EN AW 1050A. Tato slitina třídy 10 obsahuje minimálně 99 % hliníku. Vyznačuje se vysokou korozní odolností, houževnatostí a výbornou svařitelností.

Mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 1050A [45]:

- Mez kluzu $R_e = 75$ MPa
- Mez pevnosti $R_m = 145$ MPa
- Poissonova konstanta $\mu = 0,33$
- Modul pružnosti v tahu $E = 70$ GPa
- Modul pružnosti ve smyku $G = 26$ GPa
- Hustota $\rho = 2700$ kg/m³

Vhodnost materiálů z hlediska mechanických vlastností a jejich tloušťek bude ověřena pomocí MKP analýz.

2.5.2 Dělení materiálu

K dělení materiálu pro výrobu bateriových boxů bude použito vodního paprsku CNC WJ 40201Z-UJ-PJ-5AX. Hydrodynamické obrábění vodním (WJM) nebo hydroabrazivním (AWJ) paprskem je jediná paprsková metoda, která nevyužívá pro dělení materiálu teplo. Díky tomu nedochází k tepelnému ovlivňování materiálu.

Pro řezání se využívá kinetická energie paprsku vody, který pod obrovským tlakem (300–600 MPa) prochází dýzou se safírovou, rubínovou nebo diamantovou clonou. V dýze o průměru 0,2 až 2,5 mm získá paprsek o průměru 0,5 až 2,5 mm (průměr paprsku zásadně závisí na tom, jestli použijeme nebo nepoužijeme abrazivum).

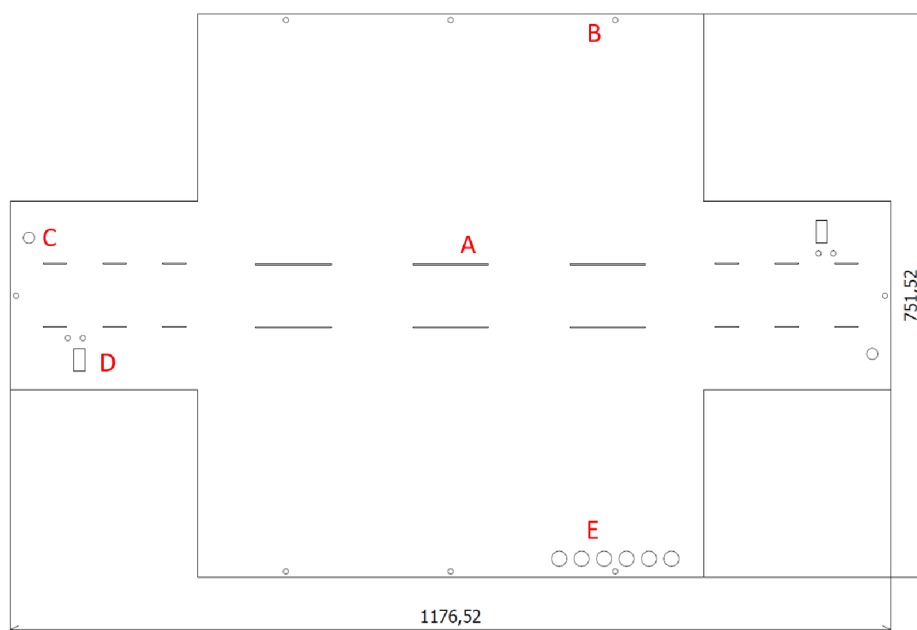
Pro řezání tvrdších materiálů jako je ocel 1.4301 nebo hliníkové slitiny je třeba využít abrazivum. Nejčastěji se používá přírodní granát. V jeho složení dominují křemíkaté, železné a hliníkové oxidy.

Podkladem pro řezání je výkres výpalku, který se z modelu exportuje do formátu dxf v měřítku 1:1. Jednotlivé výkresy pro vypálení boxů jsou přiloženy v příloze.



Obr. 49 Pracovní stůl zařízení CNC WJ 40201Z-UJ-PJ-5AX.

Na 50 je vyobrazen výpalek hlavního dílu bateriového boxu 1. Materiálem je plech z hliníkové slitiny EN AW 1050A o tloušťce 1,5 mm. Jsou zde vyznačeny jednotlivé oblasti s otvory pro různé účely. Oblast A označuje otvory pro přivaření přepažovacího plechu. V oblasti B se nachází otvory pro připojení víka boxu. V oblasti C jsou otvory pro připojení konektorů BMS. Oblast D obsahuje otvory pro umístění hlavních pojistek boxu. A oblast E nabízí otvory pro rozhraní připojení silové kabeláže. Ostatní bateriové boxy jsou konstruovány podobným způsobem. Viz výkresová dokumentace v příloze.



Obr. 50 Výpalek z plechu pro hlavní díl boxu 1

2.5.3 Ohýbání plechů

Pro ohýbání plechů je využito hydraulického ohraňovacího lisu Trumpf TruBend 5170. Stroj dokáže vyvinout maximální lisovací sílu 1700 kN. Maximální ohraňovací délka je 3230 mm [49]. Ohraňování se uplatňuje zejména při tváření pásů plechu do tvaru profilů – jde většinou o ohyb ostrý. Různé profilové tvary se tvoří kombinací ohybu geometrie V a U. Při výrobě se uplatňuje tzv. postupný ohyb.

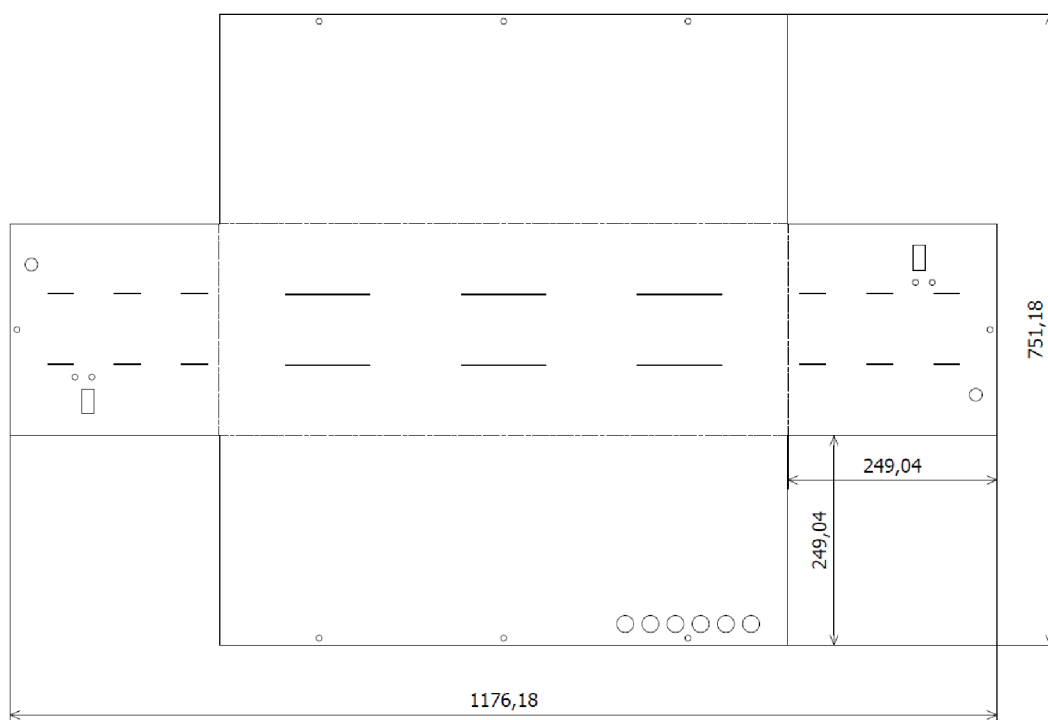
Plech o tloušťce 1 mm budou ohýbány s poloměrem 2 mm. Plechy o tloušťce 1,5 a 2 mm budou ohýbány s poloměrem 3 mm. Dále v této kapitole bude ověřena realizovatelnost těchto poloměrů. Kompletní výkresová dokumentace v příloze.



Obr. 51 Ohraňovací lis Trumpf TruBend 5170 [48].

Výpočet velikosti úhlu odpružení při ohýbání do „U“ pro hlavní díl boxu 1

Hlavní díl boxu 1 je vyroben z plechu z hliníkové slitiny EN AW 1050A o tloušťce 2 mm. Obruby budou ohýbané s poloměrem 3 mm. Výpočty v této kapitole jsou prováděny dle [42].



Obr. 52 Rozměry ohýbané součásti.

Hodnoty pro výpočet:

$$s = 2 \text{ mm}$$

$$k = 1 - x = 1 - 0,445 = 0,555$$

x... posunutí neutrální plochy napětí

$$l_m = 249,04 \text{ mm}$$

l_m ... rameno ohybu

$$R_e = 75 \text{ MPa}$$

$$E = 70 \text{ GPa}$$

$$tg\beta = 0,75 * \frac{l_m}{k*s} * \frac{R_e}{E} \quad (40)$$

$$tg\beta = 0,75 * \frac{249,04}{0,555*1} * \frac{75}{70000} = 0,360579 \quad (41)$$

$$\beta = 0,377^\circ \quad (42)$$

Výpočet minimálního a maximálního poloměru ohybu pro hliník o tloušťce 1,5 mm

Minimální poloměr je takový poloměr, při jehož překročení by na vnější tahové straně ohybu došlo k porušení.

Koeficient c pro hliník 0,35

$$R_{min} = \frac{s}{2} * \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) = c * s \quad (43)$$

$$R_{min} = 0,35 * 2 = 0,7 \text{ mm} \quad (44)$$

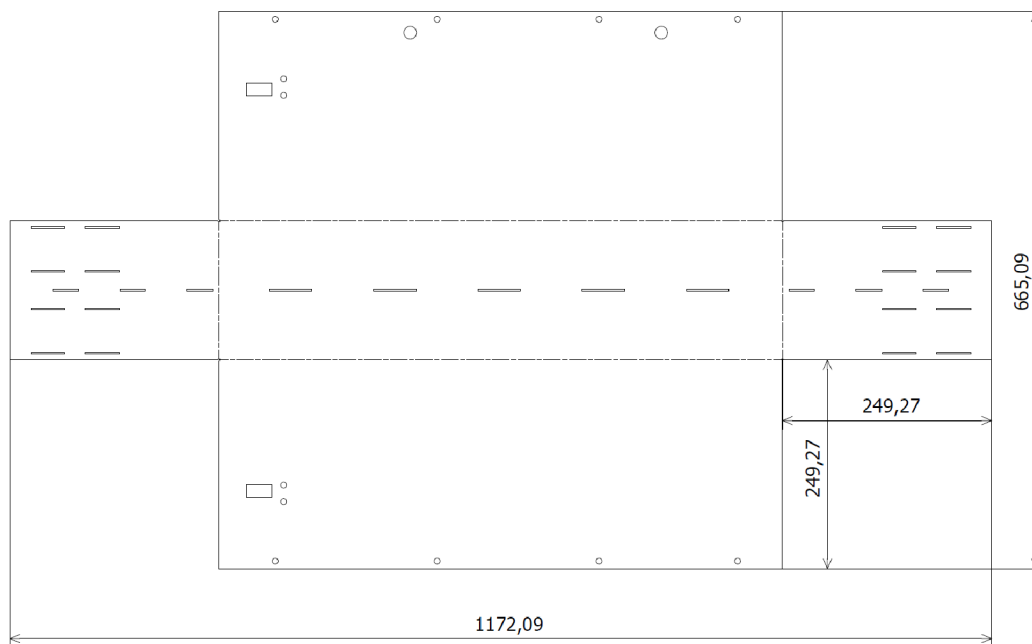
Maximální poloměr je takový poloměr, při němž v krajních vláknech na tahové straně dojde ještě k trvalé deformaci.

$$R_{max} = \frac{s}{2} * \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right) \quad (45)$$

$$R_{max} = \frac{1}{2} * \left(\frac{70000}{75} - 1 \right) = 466,17 \text{ mm} \quad (46)$$

Výpočet velikosti úhlu odpružení při ohýbání do „U“ pro hlavní díl boxu 2

Hlavní díl boxu 2 je vyroben z plechu z oceli 1.4301 o tloušťce 1 mm. Obruby budou ohýbané s poloměrem 2 mm.



Obr. 53 Rozměry ohýbané součásti

Hodnoty pro výpočet:

$$s = 1 \text{ mm}$$

$$k = 1 - x = 1 - 0,38 = 0,62$$

x... posunutí neutrální plochy napětí

$$l_m = 249,27 \text{ mm}$$

l_m ... rameno ohybu

$R_e = 230 \text{ MPa}$

$E = 200 \text{ GPa}$

$$tg\beta = 0,75 * \frac{l_m}{k*s} * \frac{R_e}{E} \quad (47)$$

$$tg\beta = 0,75 * \frac{249,27}{0,62*1} * \frac{230}{200000} = 0,3468 \quad (48)$$

$$\beta = 0,361^\circ \quad (49)$$

Výpočet minimálního a maximálního poloměru ohybu pro ocel o tloušťce 1 mm

Minimální poloměr je takový poloměr, při jehož překročení by na vnější tahové straně ohybu došlo k porušení.

Koeficient c pro ocel 0,5 až 0,6

$$R_{min} = \frac{s}{2} * \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) = c * s \quad (50)$$

$$R_{min} = 0,55 * 1 = 0,55 \text{ mm} \quad (51)$$

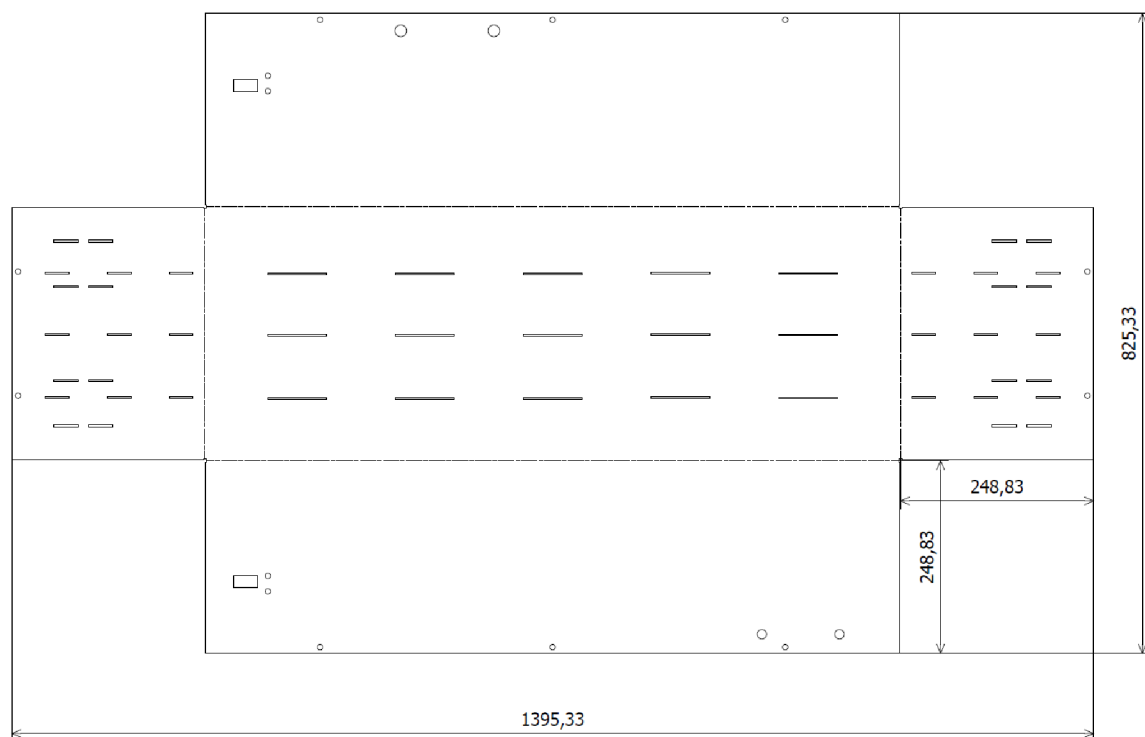
Maximální poloměr je takový poloměr, při němž v krajních vláknech na tahové straně dojde ještě k trvalé deformaci.

$$R_{max} = \frac{s}{2} * \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right) \quad (52)$$

$$R_{max} = \frac{1}{2} * \left(\frac{200000}{230} - 1 \right) = 434,3 \text{ mm} \quad (53)$$

Výpočet velikosti úhlu odpružení při ohýbání do „U“ pro hlavní díl boxu 3

Hlavní díl boxu 3 je vyroben z plechu z oceli 1.4301 o tloušťce 1,5 mm. Obruby budou ohýbané s poloměrem 3 mm.



Obr. 54 Rozměry ohýbané součásti

Hodnoty pro výpočet:

$$s = 1,5 \text{ mm}$$

$$k = 1 - x = 1 - 0,445 = 0,555$$

x... posunutí neutrální plochy napětí

$$l_m = 248,83 \text{ mm}$$

l_m ... rameno ohybu

$$R_e = 230 \text{ MPa}$$

$$E = 200 \text{ GPa}$$

$$tg\beta = 0,75 * \frac{l_m}{k*s} * \frac{R_e}{E} \quad (54)$$

$$tg\beta = 0,75 * \frac{248,83}{0,555*1} * \frac{230}{200000} = 0,3468 \quad (55)$$

$$\beta = 0,411^\circ \quad (56)$$

Výpočet minimálního a maximálního poloměru ohybu pro ocel o tloušťce 1,5 mm

Minimální poloměr je takový poloměr, při jehož překročení by na vnější tahové straně ohybu došlo k porušení.

Koeficient c pro ocel 0,5 až 0,6

$$R_{min} = \frac{s}{2} * \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) = c * s \quad (57)$$

$$R_{min} = 0,55 * 1,5 = 0,825 \text{ mm} \quad (58)$$

Maximální poloměr je takový poloměr, při němž v krajních vláknech na tahové straně dojde ještě k trvalé deformaci.

$$R_{max} = \frac{s}{2} * \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right) \quad (59)$$

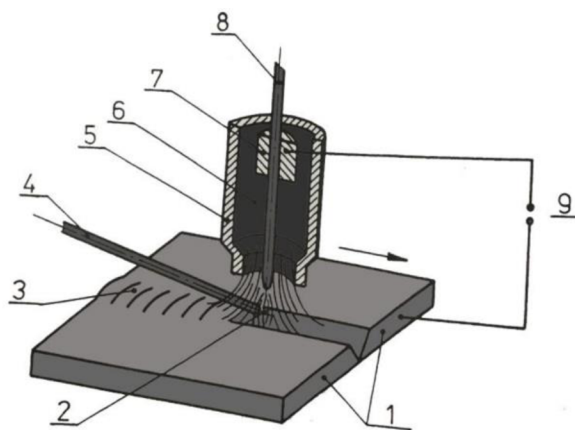
$$R_{max} = \frac{1,5}{2} * \left(\frac{200000}{230} - 1 \right) = 651,42 \text{ mm} \quad (60)$$

Z výpočtů vychází, že navržené poloměry pro ohýbání plechů jsou výrobitelné pro všechny typy použitých materiálů bez poškození.

2.5.4 Svařování boxů

Pro svařování byla zvolena technologie TIG z důvodu vysoké kvality svaru a možnosti použití pro ocel i hliník. Při svařování touto metodou hoří elektrický oblouk mezi netavicí se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Elektrodu i tavnou lázeň chrání proud inertního plynu (často Ar o vysoké čistotě 99,995 %) před účinky okolní atmosféry podobně jako u metody MIG. Plyn také chladí elektrodu a tím zvyšuje její životnost. Svařovací oblouk je u této metody velmi stabilní. Svařuje se bez i s přídavným materiálem. Materiál ve formě drátu se přidává nejčastěji ručně. Slouží k dolegování svaru, k doplnění objemu svarového kovu a také ke chlazení tavné lázně. Přidávání legur do místa svařování je nutné kvůli propalu a odpařování legujících materiálů základního materiálu. Jelikož svarový spoj nesmí znehodnotit vlastnosti svařované konstrukce, měly by se vlastnosti spoje co nejvíce blížit požadovaným vlastnostem základního materiálu. Mez kluzu, mez pevnosti v tahu, tažnost a nejmenší hodnota nárazové práce svarového kovu mají být stejné nebo lepší, než je stanoveno pro základní materiál. Použití elektrod lepší třídy oceli, než základní materiál je obvykle spolehlivé [53].

- 1- Svařovaný materiál
- 2- Elektrický oblouk
- 3- Svar
- 4- Přídavný materiál
- 5- Plynová hubice
- 6- Ochranný plyn
- 7- Kontaktní kleštiny
- 8- Wolframová elektroda
- 9- Zdroj proudu



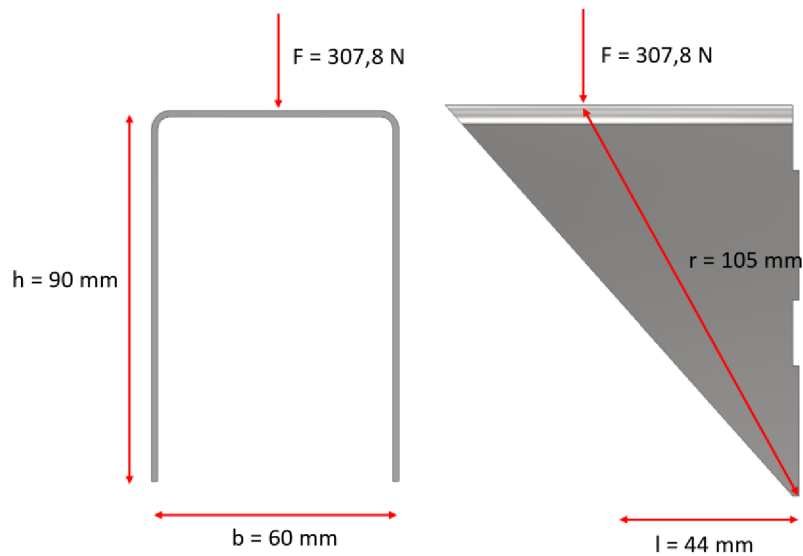
Obr. 55 Princip svařovací technologie TIG [39].



Obr. 56 Svar metodou TIG na materiálu 1.4301.

Pevnostní výpočet svaru

Při navrhování a posuzování svařových spojů se lze opřít o řadu norem, především ČSN 05 0120. Výpočty byly prováděny dle [53]. Svary jsou posuzovány na statickou únosnost dle maximálního smykového napětí ve svaru. Jelikož jsou všechny boxy svařované stejným způsobem. Pro výpočet byl vybrán nejvíce zatížený svar na konzoli z bateriového boxu 4. Na této konzole byl použit svar velikosti a2.



Obr. 57 Svařovaná konzole na bateriovém boxu 4.

Plocha účinného průřezu svaru:

$$S = 0,707 * z * (b + 2h) \quad (61)$$

$$S = 1,5 * (60 + 90) \quad (62)$$

$$S = 225 \text{ mm}^2 \quad (63)$$

Poloha těžiště \bar{y} :

$$\bar{y} = \frac{h^2}{b+2h} \quad (64)$$

$$\bar{y} = \frac{90^2}{60+2*90} \quad (65)$$

$$\bar{y} = 33,75 \text{ mm} \quad (66)$$

Jednotkový osový kvadratický moment účinného průřezu:

$$J_{zu} = \frac{2h^3}{3} - 2h^2\bar{y} + (b + 2h)\bar{y}^2 \quad (67)$$

$$J_{zu} = \frac{2*90^3}{3} - 2 * 90^2 * 33,75 + (60 + 2 * 90) * 33,75^2 \quad (68)$$

$$J_{zu} = 8,991 * 10^6 \text{ mm}^4 \quad (69)$$

Celkový osový kvadratický moment účinných průřezů:

$$J_z = 0,707 * z * J_{zu} \quad (70)$$

$$J_z = 1,5 * 8,991 * 10^6 \text{ mm}^4 \quad (71)$$

$$J_z = 1,3487 * 10^7 \text{ mm}^4 \quad (72)$$

Moment M_c vyvolaný silou F :

$$M_c = F * r \quad (73)$$

$$M_c = 307,8 \text{ N} * 105 \text{ mm} \quad (74)$$

$$M_c = 3,23 * 10^4 \text{ N} * \text{mm} \quad (75)$$

Nominální smykové napětí v účinném průřezu:

$$\tau = \frac{M_c}{J_z} \quad (76)$$

$$\tau = \frac{3,23 * 10^4}{1,3487 * 10^7} \quad (77)$$

$$\tau = 0,0024 \text{ MPa} \quad (78)$$

Statická únosnost svarového spoje:

Součinitel α pro tupý koutový svar je 0,7.

Bezpečnostní koeficient k volen 2.

$$\sigma_D = \alpha * \frac{R_e}{k} \quad (79)$$

$$\sigma_D = 0,7 * \frac{230}{2} \quad (80)$$

$$\sigma_D = 80,5 \text{ MPa} \quad (81)$$

Výsledné smykové napětí ve svaru je velice nízké díky vhodnému uspořádání svarů a nízké zátěžné síle.

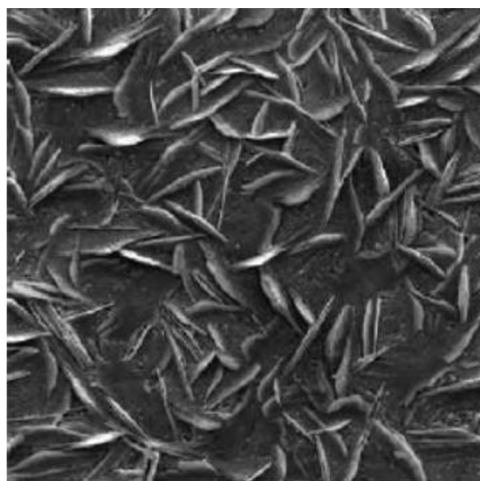
2.5.5 Povrchové úpravy

Podvěšené boxy, které budou vystaveny korodujícímu prostředí mezi vozovkou a podvozkem automobilu budou dále povrchově upraveny pro větší korozní odolnost. Povrchovou úpravou také dosáhneme vysoké hodnoty elektrické izolace.

Fosfátování

Fosfátování je jednou z nejrozšířenějších povrchových úprav kovů. Zajišťuje dokonalé odmaštění před procesem lakování, zvyšuje přilnavost laku k povrchu, výrazně zvyšuje antikorozi odolnost materiálu a zvyšuje elektroizolační vlastnosti materiálu.

Typů fosfátování existuje celá řada. Pro naše potřeby se nejvíce hodí standardní zinečnaté fosfátování. Toto vytváří na povrchu krystalovou vrstvu zinečnatého fosfátu s tloušťkou vrstvy od 1 μm do 7 μm . Tyto povlaky jsou silnější a tvrdší než u ostatních metod fosfátování, a proto se hodí pro přípravu materiálu, kde je nutné zajištění elektrické izolace.



Obr. 58 Krystalická struktura na povrchu materiálu po zinečnatém fosfátování [52].

Pracovní lázně pracují s teplotou mezi 40 °C až 70 °C. Expoziční doba materiálů se běžně pohybuje kolem 3 až 9 minut v závislosti na požadované tloušťce fosfátové vrstvy.

Zinečnaté fosfátování velmi dobře působí na ocelové materiály. U hliníku vytváří za použití speciálních aditiv, které zapříčiní odstranění vrstviček oxidů na povrchu hliníku, velmi tenké vrstvy. Tyto však postačují k dostatečně efektivnímu ochrannému povlaku materiálu.

Lakování

Boxy se budou po aplikaci povrchových úprav dále lakovat dvěma typy laků. Na vnitřní plochy boxů bude aplikován epoxyesterové elektroizolační nátěr S2352 s izolační třídou B-T. Tímto se zajistí maximální elektroizolační vlastnosti boxů a zamezí případnému zkratu. Na vnější plochy boxů se aplikuje antikoroziční základový nátěr. Veškeré nátěry budou aplikovány nástřikem.

2.6 Přehled navržených bateriových boxů

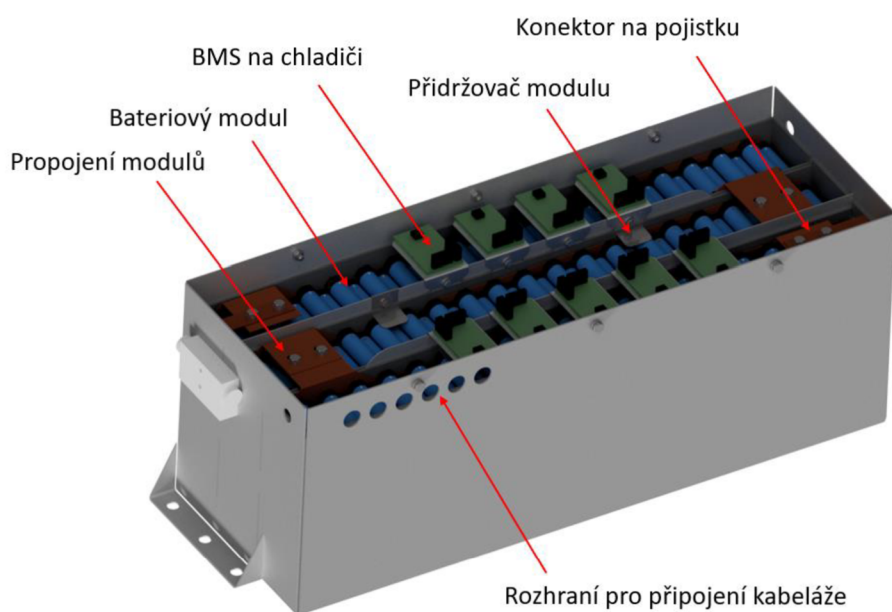
Jak již bylo naznačeno celý bateriový box se skládá z 5 podsestav dle prostorových dispozic automobilu. V této kapitole jsou popsány jejich parametry.

Bateriový box 1

Tento bateriový box bude umístěn pod přední kapotou vozidla v prostoru mezi frekvenčním měničem a chladičem. Umístěn bude na ocelové traverze a přišroubovaný z jedné strany dvěma šrouby a z druhé strany třemi šrouby. Nesymetrické uchycení je z důvodu omezeného prostoru v automobilu. Vyrobený je z plechu z hliníkové slitiny o tloušťce 2 mm.

Parametry boxu:

- nominální energetická kapacita 14,74 kWh
- nominální napětí 32,4 V
- maximální napětí 37,8 V
- počet bateriových článků 1.170 kusů
- zapojení 9s130p
- hmotnost 66,2 kg
- celková gravimetrická energetická hustota boxu 222,65 Wh/kg
- rozměry 679x260x238 mm



Obr. 59 Bateriový box 1 bez víka.

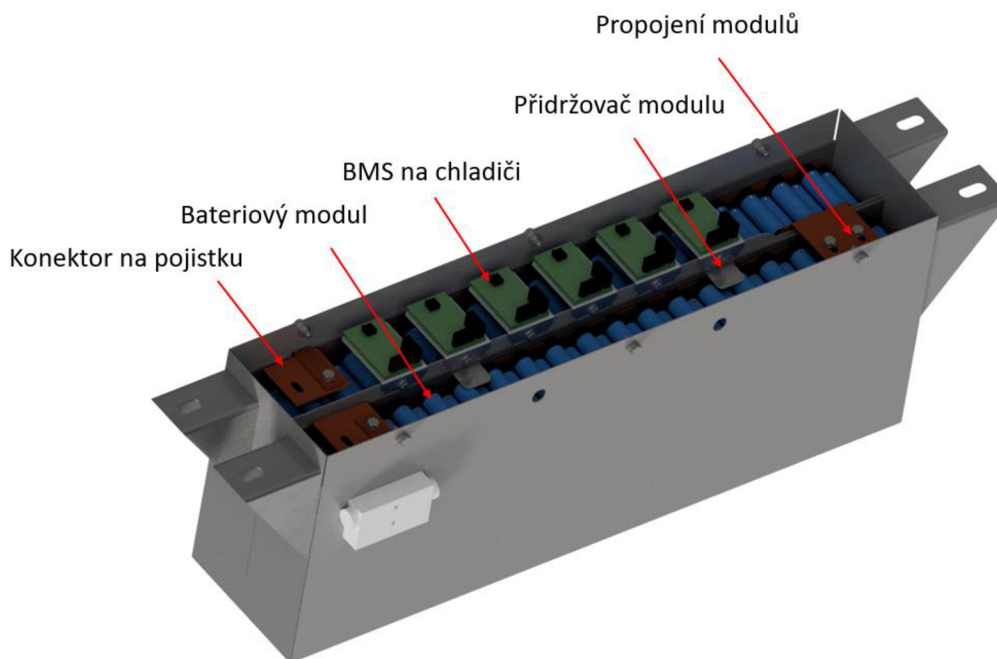
Bateriový box 2

Tento bateriový box bude také umístěn pod přední kapotou vozidla v prostoru mezi motorem a chladičem pod prvním boxem. Vyrobený je z plechu z oceli 1.4301 o tloušťce 1 mm. Konzole pro přišroubování k vozidlu jsou vyrobeny z plechu o tloušťce 1,5 mm.

Parametry boxu:

- nominální energetická kapacita 9,83 kWh
- nominální napětí 21,6 V
- maximální napětí 25,2 V
- počet bateriových článků 780 kusů
- zapojení 6s130p
- hmotnost 48,3 kg

- celková gravimetrická energetická hustota boxu 203,5 Wh/kg
- rozměry 677x157x260 mm



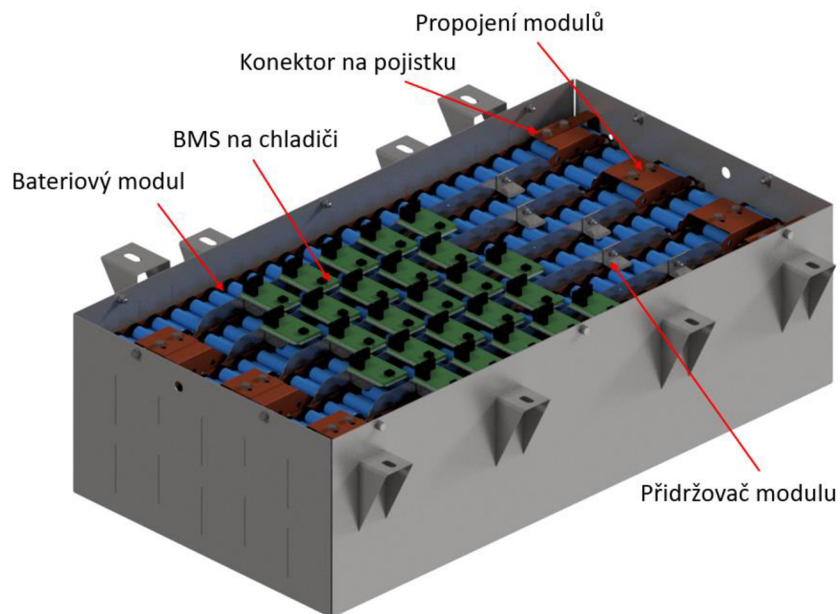
Obr. 60 Bateriový box 2 bez víka.

Bateriový box 3

Tento bateriový box bude umístěn před zadní nápravou vozu, v prostoru, kde bychom běžně našli palivovou nádrž. Uchycený bude pomocí čtyř šroubů na jedné straně a čtyř i na druhé straně. Viz obrázek 61. Nesymetrické uchycení je z důvodu omezeného prostoru v automobilu. Vyrobený je z plechu z oceli 1.4301 o tloušťce 1,5 mm.

Parametry boxu:

- nominální energetická kapacita 39,3 kWh
- nominální napětí 86,4 V
- maximální napětí 100,8 V
- počet bateriových článků 3.120 kusů
- zapojení 24s130p
- hmotnost 186 kg
- celková gravimetrická energetická hustota boxu 211,35 Wh/kg
- rozměry 897x472x260 mm



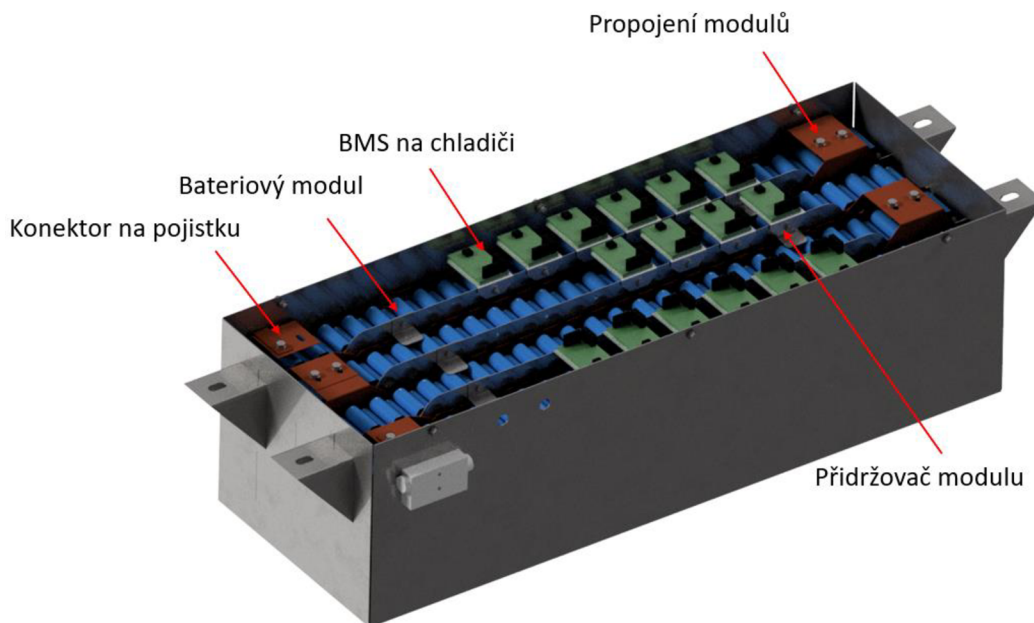
Obr. 61 Bateriový box 3 bez víka.

Bateriový box 4

Tento bateriový box je umístěný za zadní nápravou vozu, v prostoru, pro rezervní pneumatiku. Uchycený bude pomocí dvou šroubů na jedné straně a dvou i na druhé straně. Viz obrázek 62. Vyrobený je z plechu z oceli 1.4301 o tloušťce 1,5 mm.

Parametry boxu:

- nominální energetická kapacita 26,2 kWh
- nominální napětí 57,6 V
- maximální napětí 67,2 V
- počet bateriových článků 2.080 kusů
- zapojení 16s130p
- hmotnost 125,5 kg
- celková gravimetrická energetická hustota boxu 208,8 Wh/kg
- rozměry 897x315x260



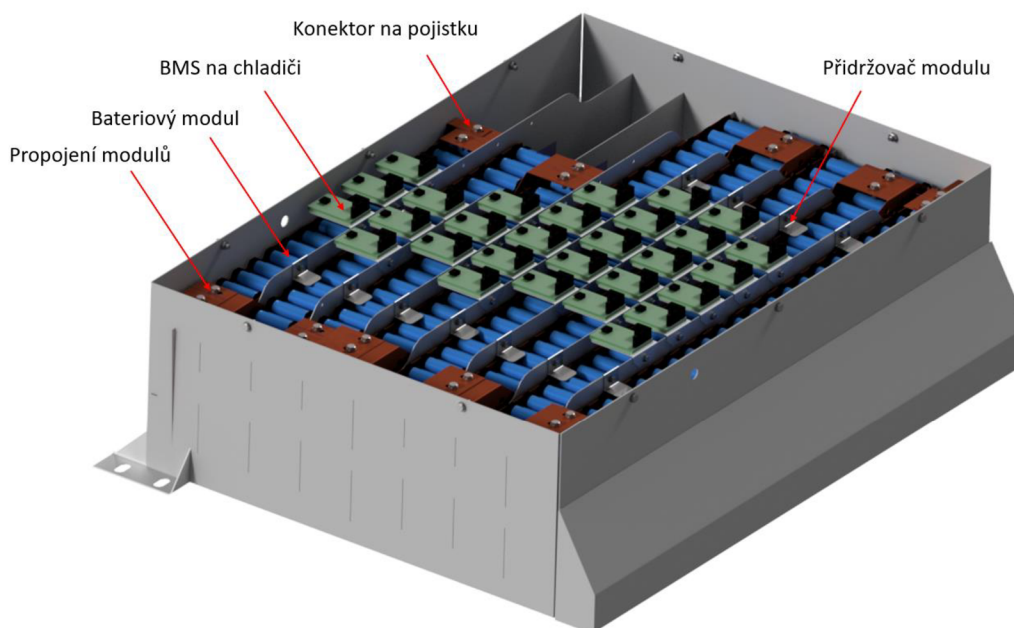
Obr. 62 Bateriový box 4 bez víka

Bateriový box 5

Tento bateriový box je umístěný v kufrovém prostoru, v prostoru, pro rezervní pneumatiku. Uchycený bude pomocí dvou šroubů na jedné straně a dvou i na druhé straně. Viz obrázek 72. Vyrobený je z plechu z hliníkové slitiny o tloušťce 1,5 mm.

Parametry boxu:

- nominální energetická kapacita 47,5 kWh
- nominální napětí 104,4 V
- maximální napětí 121,8 V
- počet bateriových článků 3.770 kusů
- zapojení 29s130p
- hmotnost 205 kg
- celková gravimetrická energetická hustota boxu 231,7 Wh/kg
- rozměry 898x688x260 mm



Obr. 63 Bateriový box 5 bez víka.

2.7 Pevnostní analýza bateriových boxů

Pevnostní analýza byla počítána metodou konečných prvků (MKP) v profesionální výpočtové aplikaci „Nastran“. Příprava sítě byla tvořena v programu „HyperMesh“. Kritériem pro analýzu bylo dosažení meze kluzu materiálu. V rámci pevnostní analýzy pomocí MKP budou zkoumány dvě situace, které mohou za provozu nastat.

Pro účely analýz byly vybrány podvěšené boxy, které byly vyhodnoceny jako nejvíce ohrožené. Položené boxy v autě nebudou analyzovány. Pro vybrané boxy byly vytvořeny zjednodušené modely boxů a bateriových modulů z důvodu snížení náročnosti výpočtu. Víka nejsou v modelu obsažena pro další zjednodušení, jelikož nepřenáší napětí.

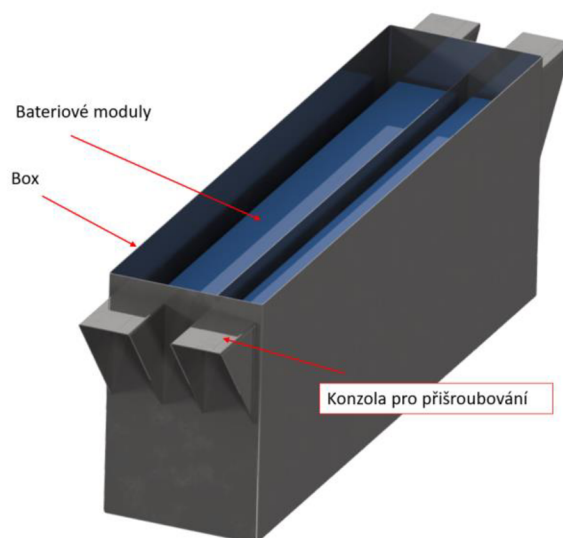
U zavěšených boxů bude pro první analýzu sloužit jako zatížení pouze gravitace a bude zkoumáno, zda nevzniká vlivem vlastní a váhy bateriových modulů k výraznému napětí a také jestli se bateriové boxy příliš nedeformují pod vlastní vahou.

Druhá analýza bude předpokládat prudké brždění automobilu v krizové situaci, kdy jako zatížení bude sloužit záporné lineární zrychlení, které může dosahovat u automobilu vyšší střední třídy dle [50] až $10,8 \text{ m/s}^2$ a gravitační zatížení. Zde budeme sledovat, zda napětí nepřesáhne mez kluzu daného materiálu.

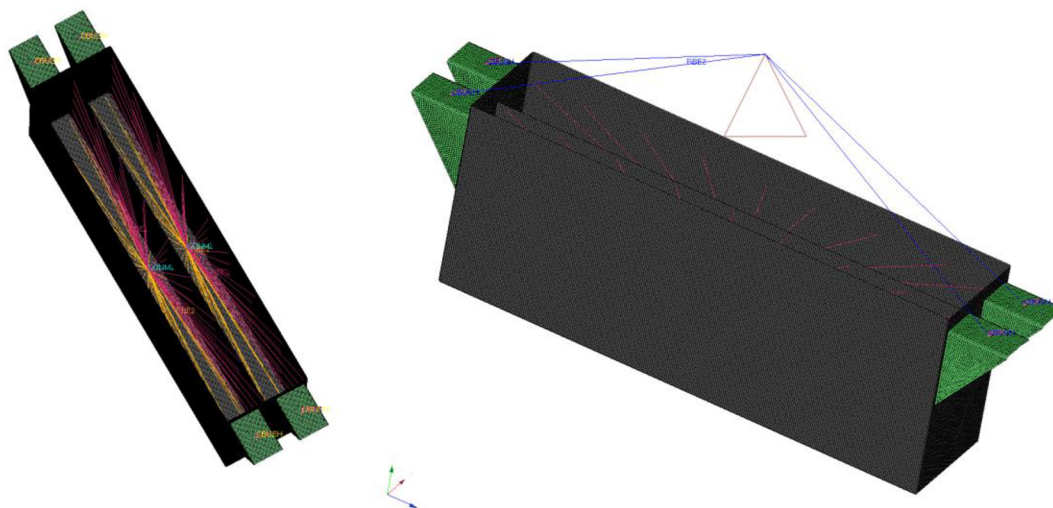
2.7.1 Bateriový box 2

Pro analýzu byl použit zjednodušený model boxu 2. Viz obrázek 64. Jde o sestavu 3 součástí – boxu a dvou bateriových modulů. Byla použita pevná vazba „CBUSH“ na konzole, která simuluje přišroubování. Bateriové moduly byly simulovány pomocí hmotných bodů přichycených vazbou „rigid“ k odpovídajícím plochám boxů. Byla použita síť prvků typu „shell“ o velikosti prvků 2,5 mm. Byly použity materiálové vlastnosti, z kapitoly 2.5.1. Hmotnost je identická jako u originálního modelu a to 48 kg.

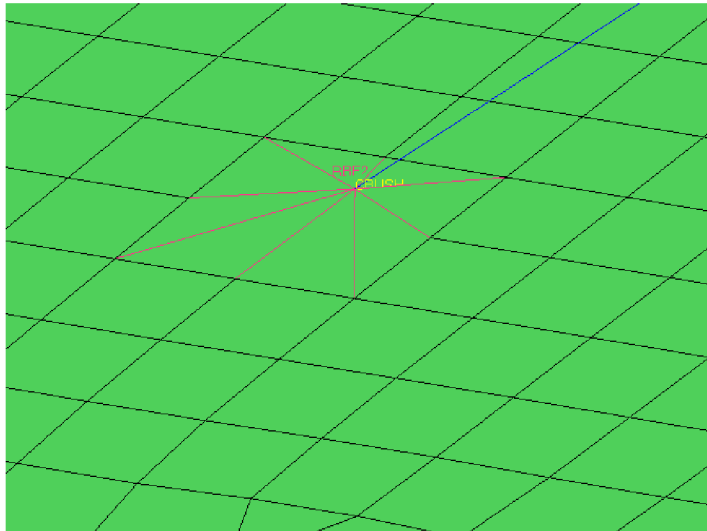
Zavazbený model boxu 2 ve výpočtáři je zobrazen na obrázku 65. Pro ostatní boxy bylo použito stejné nastavení.



Obr. 64 Zjednodušený model boxu 2 pro analýzu MKP.



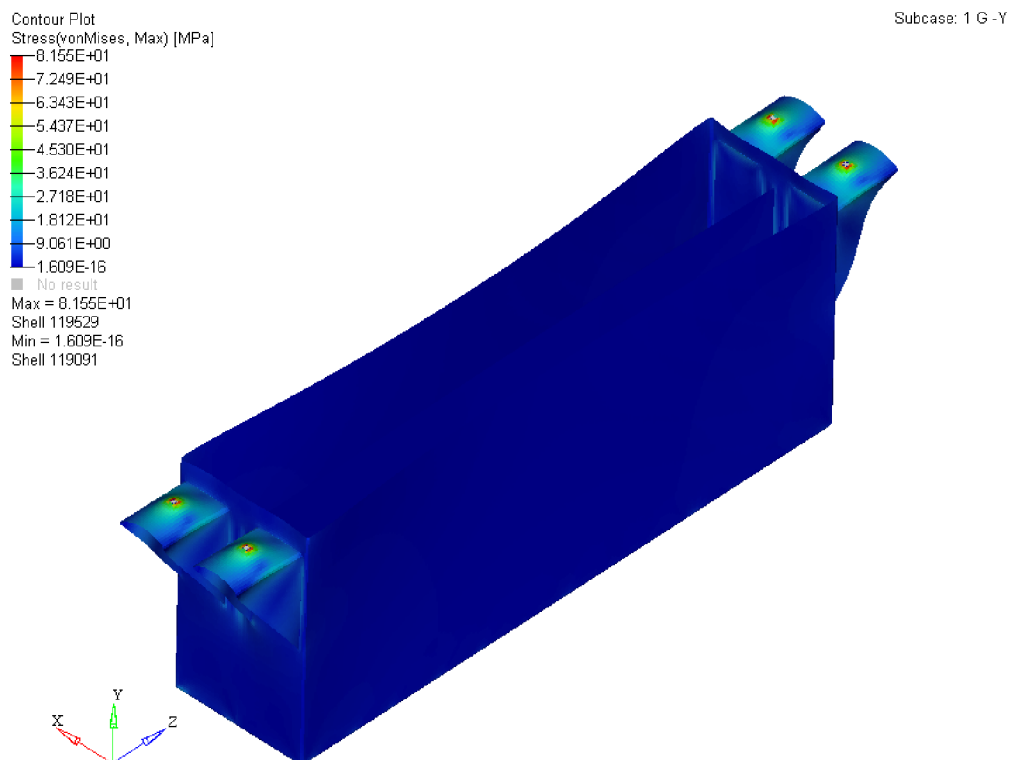
Obr. 65 Vazby a síť na modelu bateriového boxu 2 v programu HyperMesh.



Obr. 66 Detail zavazbení konzole v analýze. Byl přidán prvek RBE simulující podložku pro snížení špičkového napětí.

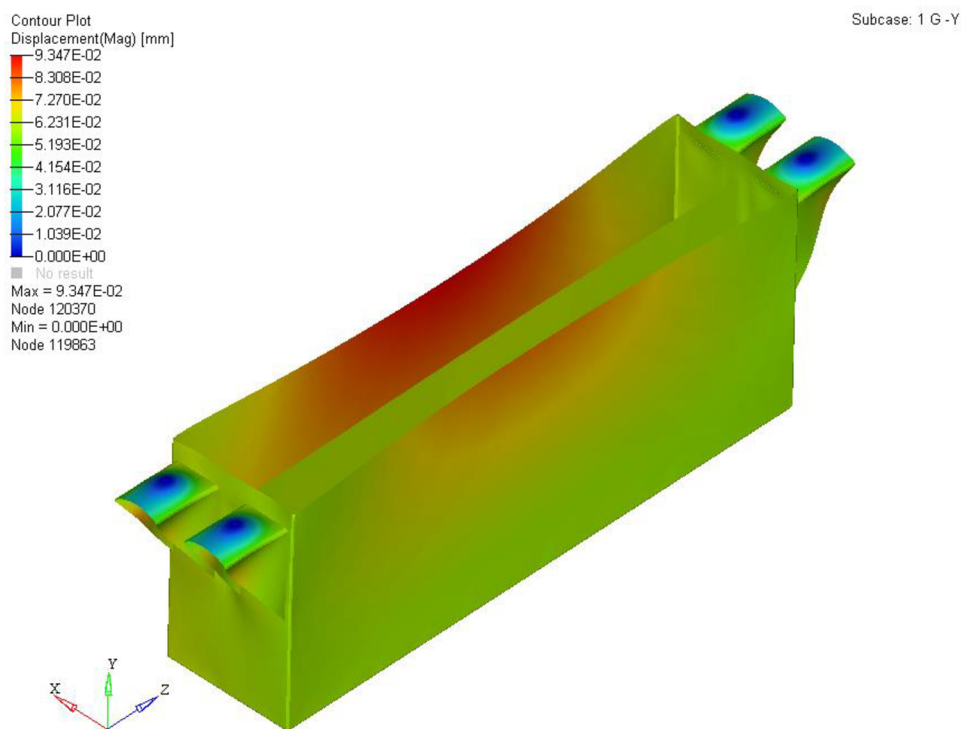
Pevnostní analýza s gravitačním zatížením

Pro tuto analýzu bylo aplikováno pouze gravitační zatížení boxu.



Obr. 66 Napětí na boxu 2 při zatížení pouze gravitací.

Box 2 je přišroubovaný pomocí konzolí na traverze v motorovém prostoru. Při zatížení vlastní vahou dosahuje napětí na konzolích maximální hodnoty kolem 40 MPa. Jde o nízké napětí, které nijak neohrožuje provoz boxu. Maximální deformace boxu je v řádu setin milimetru.



Obr. 67 Deformace boxu 2 při zatížení pouze gravitací.

Součinitel bezpečnosti:

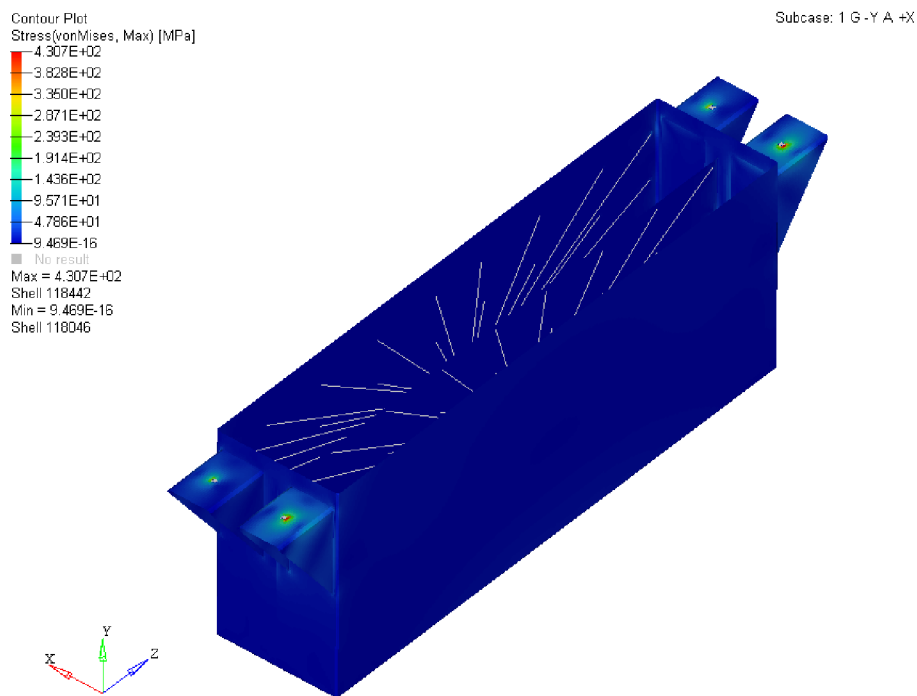
$$k = \frac{R_e}{\sigma_{MAX}} \quad (82)$$

$$k = \frac{230}{40} \quad (83)$$

$$k = 5,75 \quad (84)$$

Pevnostní analýza při brždění

Jako zatížení bylo použito za prvé lineární zrychlení $10,8 \text{ m/s}^2$, které vzniká dle [50] při prudkém brždění za kritické situace. A za druhé gravitační zrychlení.



Obr. 68 Analýza boxu 2 při prudkém brždění.

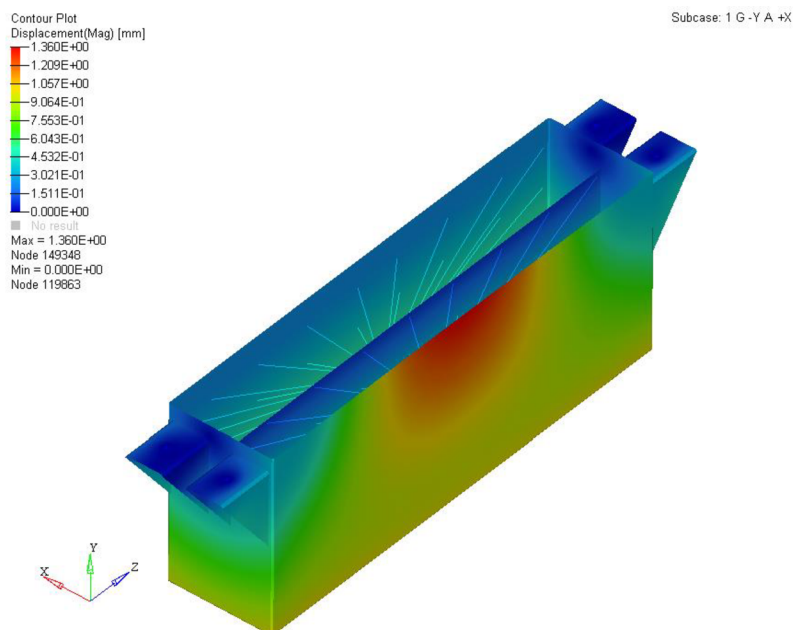
Výsledné maximální napětí na konzolích je 143 MPa, které se koncentruje kolem svarových spojů. Tato hodnota odpovídá velice nízkému napětí, které nijak neohrožuje strukturální integritu boxu. Výsledná maximální deformace modelu se nachází uprostřed boxu a pohybuje se kolem jednoho milimetru.

Součinitel bezpečnosti:

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{MAX}} \quad (85)$$

$$k = \frac{230}{143} \quad (86)$$

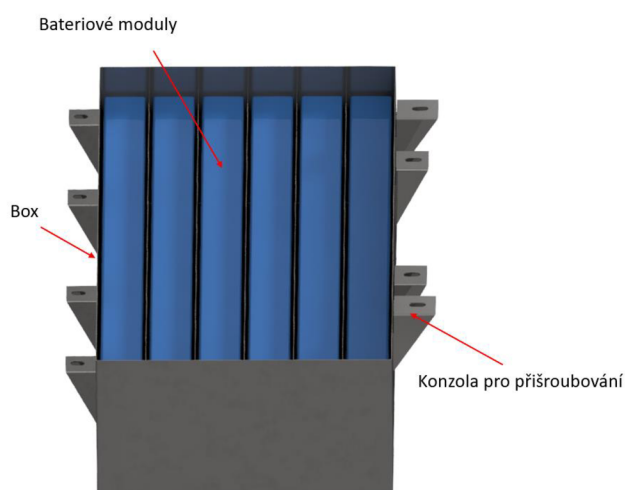
$$k = 1,6 \quad (87)$$



Obr. 69 Deformace boxu 2 při prudkém brždění.

2.7.2 Bateriový box 3

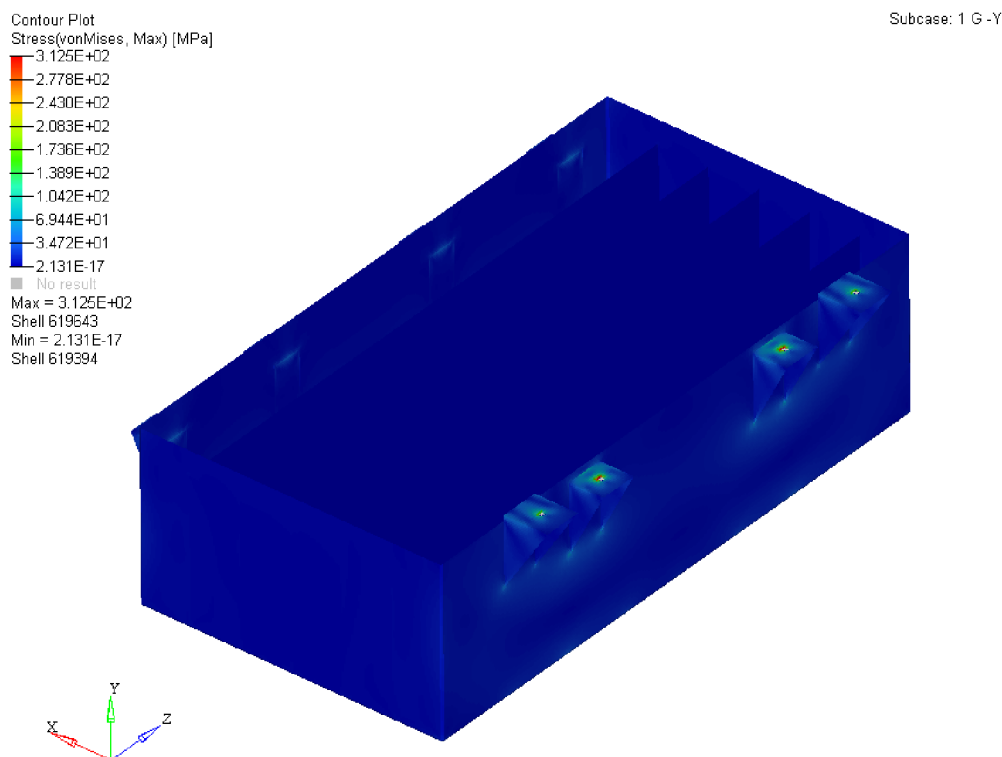
Pro analýzu byl použit zjednodušený model boxu 3. Viz obrázek X. Jde o sestavu 7 součástí – boxu a šesti bateriových modulů. Byla použita pevná vazba „CBUSH“ na konzole, která simuluje přišroubování. Bateriové moduly byly simulovány pomocí hmotných bodů přichycených vazbou „rigid“ k odpovídajícím plochám boxů. Byla použita síť prvků typu „shell“ o velikosti prvků 2,5 mm. Byly použity materiálové vlastnosti, z kapitoly 2.5.1. Hmotnost je identická jako u originálního modelu a to 186,6 kg.



Obr. 70 Zjednodušený model boxu 3 pro analýzu MKP.

Pevnostní analýza s gravitačním zatížením

Pro tuto analýzu bylo aplikováno pouze gravitační zatížení boxu.

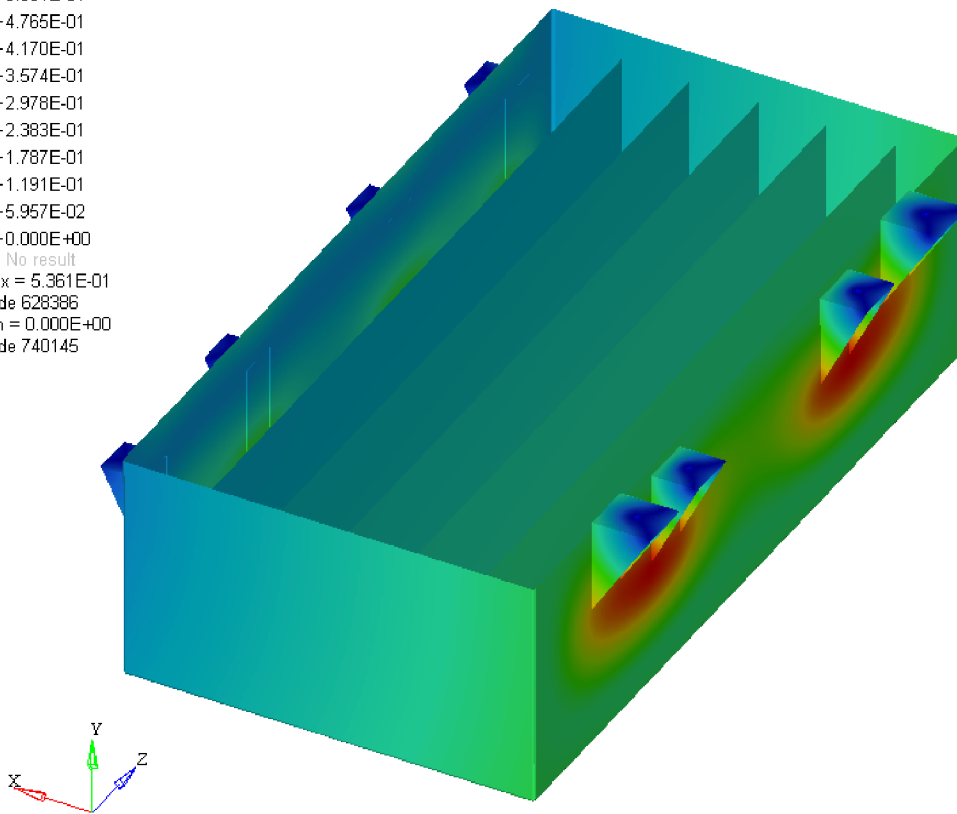


Obr. 71 Napětí na boxu 3 při zatížení pouze gravitací.

Box 3 je přišroubovaný pomocí konzolí na podvozku automobilu v prostoru pro palivovou nádrž. Při zatížení vlastní vahou dosahuje maximální napětí hodnoty kolem 100 MPa. Toto je relativně nízké napětí, které nijak neohrožuje provoz automobilu. Maximální deformace se nachází v oblasti konzolí po pravé straně a dosahuje hodnot v desetinách milimetru. Viz obrázek 72.

Contour Plot
 Displacement(Mag) [mm]
 5.361E-01
 4.765E-01
 4.170E-01
 3.574E-01
 2.978E-01
 2.383E-01
 1.787E-01
 1.191E-01
 5.957E-02
 0.000E+00
 No result
 Max = 5.361E-01
 Node 628386
 Min = 0.000E+00
 Node 740145

Subcase: 1 G-Y



Obr. 72 Deformace boxu 3 při zatížení pouze gravitací.

Součinitel bezpečnosti:

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{MAX}} \quad (88)$$

$$k = \frac{230}{100} \quad (89)$$

$$k = 2,3 \quad (90)$$

Pevnostní analýza při brždění

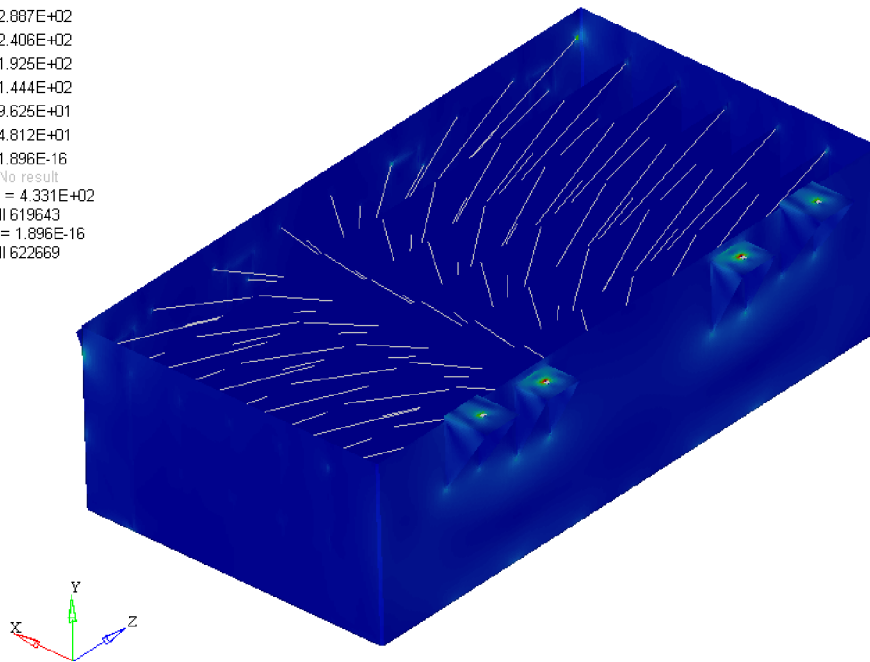
Jako zatížení bylo použito za prvé lineární zrychlení $10,8 \text{ m/s}^2$, které vzniká dle [50] při prudkém brždění za kritické situace. A za druhé gravitační zrychlení.

Contour Plot
 Stress(vonMises, Max) [MPa]

- 4.331E+02
- 3.850E+02
- 3.369E+02
- 2.887E+02
- 2.406E+02
- 1.925E+02
- 1.444E+02
- 9.625E+01
- 4.812E+01
- 1.896E-16
- No result

Max = 4.331E+02
 Shell 619643
 Min = 1.896E-16
 Shell 622669

Subcase: 1 G -Y A +X



Obr. 73 Analýza boxu 3 se zatížením odpovídajícím prudkému brždění.

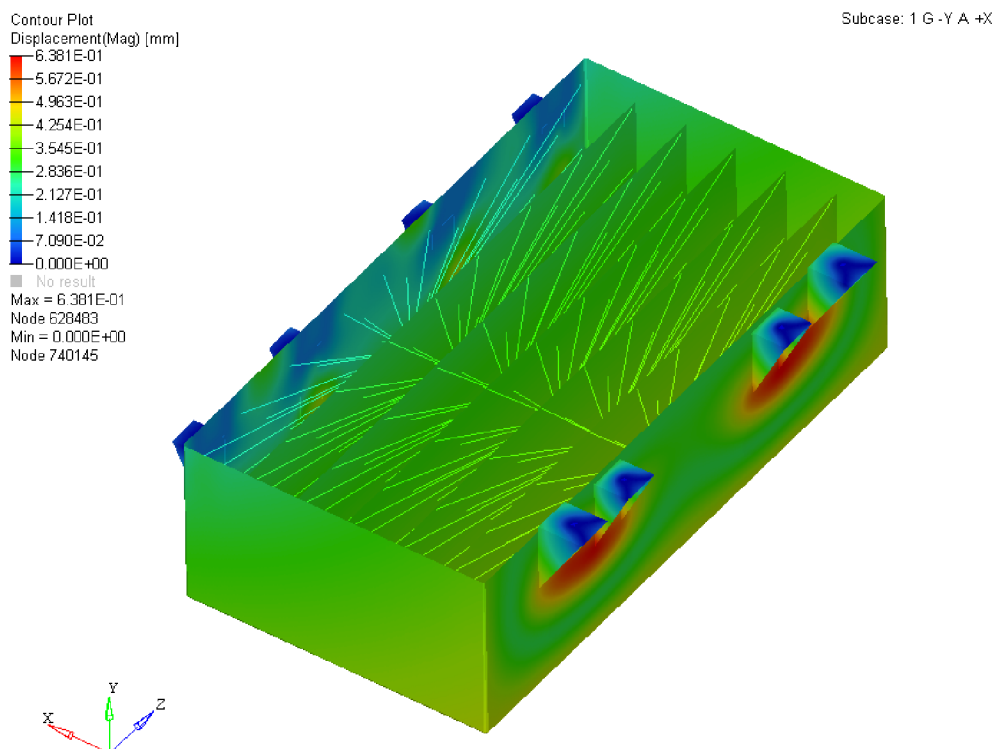
Box 4 je přišroubovaný pomocí konzolí na podvozku automobilu v prostoru za zadní nápravou v prostoru pro rezervní pneumatiku. Výsledné maximální napětí je zhruba 160 MPa, které se koncentruje kolem svarových spojů. Toto napětí je schopný materiál bez problému přenést. Výsledná maximální deformace modelu se pohybuje v řádu desetin milimetru. Viz obrázek 74.

Součinitel bezpečnosti:

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{MAX}} \quad (91)$$

$$k = \frac{230}{160} \quad (92)$$

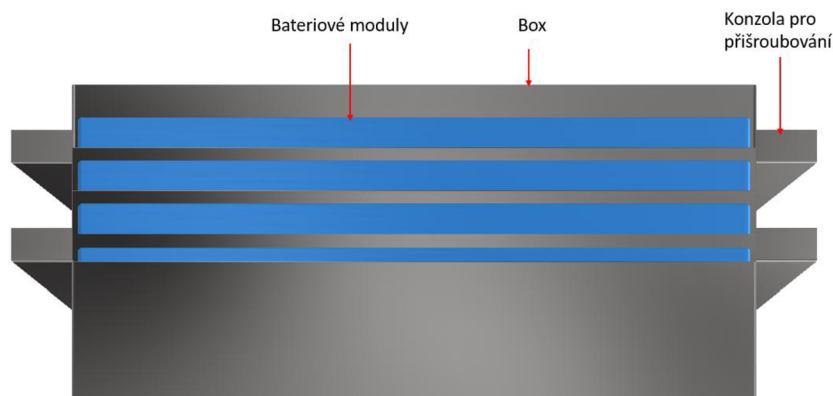
$$k = 1,43 \quad (93)$$



Obr. 74 Deformace boxu 3 při prudkém brždění.

2.7.3 Bateriový box 4

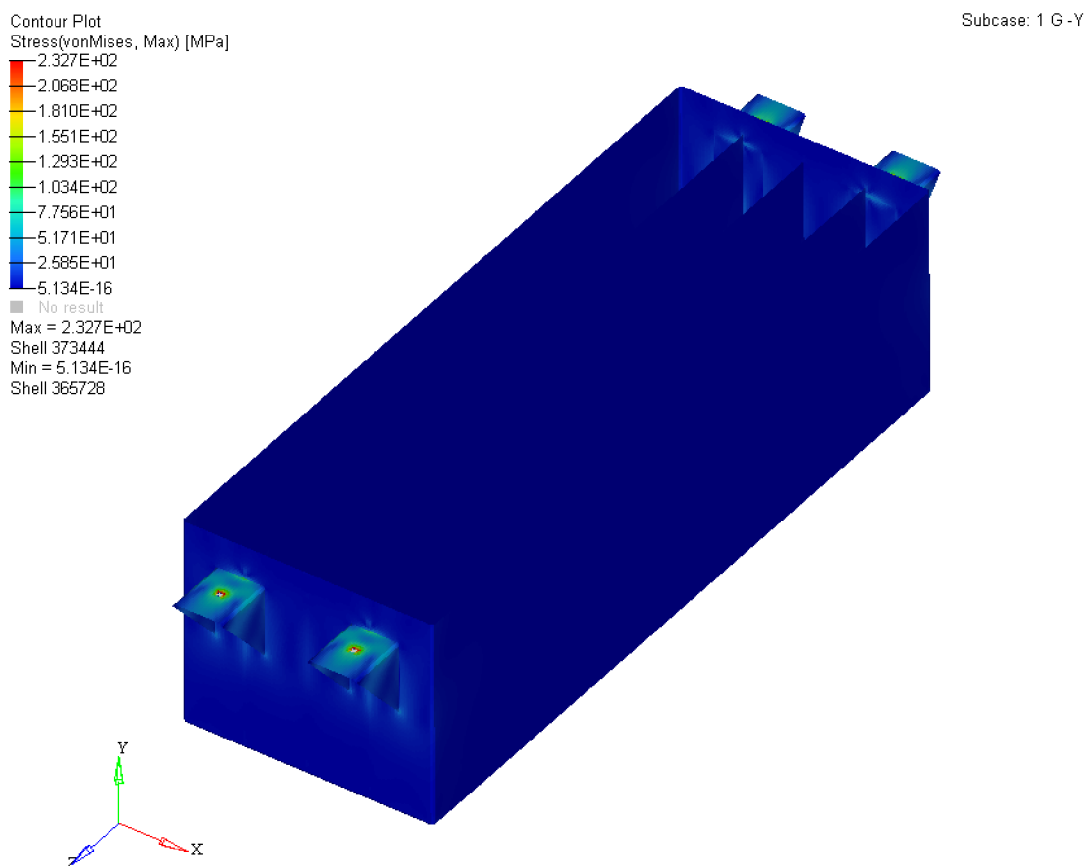
Pro analýzu byl použit zjednodušený model boxu 3. Viz obrázek X. Jde o sestavu 7 součástí – boxu a šesti bateriových modulů. Byla použita pevná vazba „CBUSH“ na konzole, která simuluje přišroubování. Bateriové moduly byly simulovány pomocí hmotných bodů přichycených vazbou „rigid“ k odpovídajícím plochám boxů. Byla použita síť prvků typu „shell“ o velikosti prvků 2,5 mm. Byly použity materiálové vlastnosti, z kapitoly 2.5.1. Hmotnost je identická jako u originálního modelu a to 127 kg.



Obr. 75 Zjednodušený model boxu 4 pro analýzu MKP.

Pevnostní analýza s gravitačním zatížením

Pro tuto analýzu bylo aplikováno pouze gravitační zatížení boxu.



Obr. 76 Napětí na boxu 4 při zatížení pouze gravitací.

Box 4 je přišroubovaný pomocí konzolí k podvozku automobilu v prostoru pro rezervní pneumatiku. Při zatížení vlastní vahou dosahuje napětí maximální hodnoty kolem 100 MPa. Toto je velice nízké napětí, které nijak neohrožuje provoz automobilu. Hodnoty maximální deformace boxu jsou v řádu desetin milimetru. Viz obrázek 77.

Součinitel bezpečnosti:

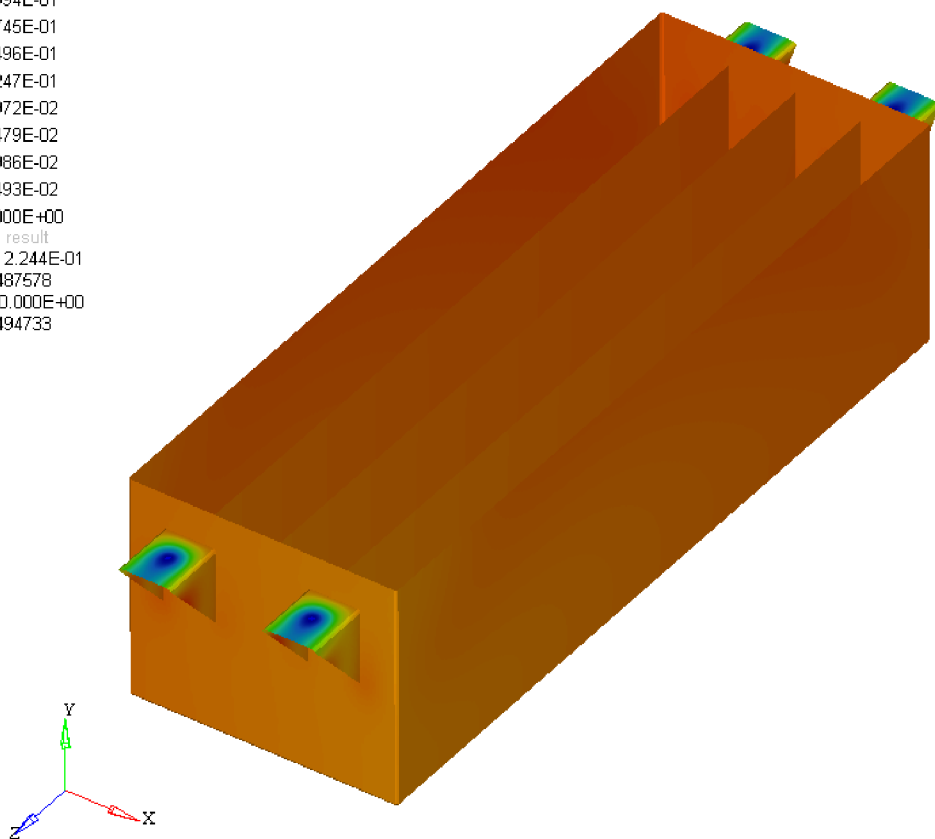
$$k = \frac{R_e}{\sigma_{MAX}} \quad (94)$$

$$k = \frac{230}{100} \quad (95)$$

$$k = 2,3 \quad (96)$$

Contour Plot
Displacement(Mag) [mm]
2.244E-01
1.994E-01
1.745E-01
1.496E-01
1.247E-01
9.972E-02
7.479E-02
4.986E-02
2.493E-02
0.000E+00
■ No result
Max = 2.244E-01
Node 487578
Min = 0.000E+00
Node 494733

Subcase: 1 G-Y



Obr. 77 Deformace boxu 4 při zatížení pouze gravitací.

Pevnostní analýza při brždění

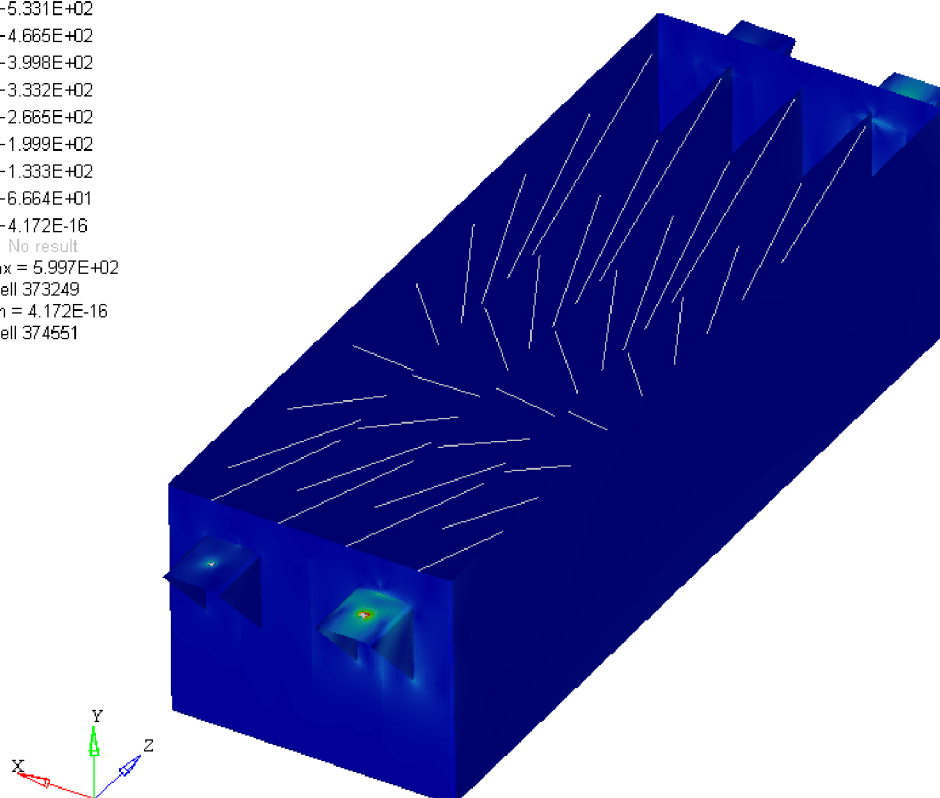
Jako zatížení bylo použito za prvé lineární zrychlení $10,8 \text{ m/s}^2$, které vzniká dle [50] při prudkém brždění za kritické situace. A za druhé gravitační zrychlení.

Contour Plot
 Stress(vonMises, Max) [MPa]

5.997E+02
5.331E+02
4.665E+02
3.998E+02
3.332E+02
2.665E+02
1.999E+02
1.333E+02
6.664E+01
4.172E-16
No result

Max = 5.997E+02
 Shell 373249
 Min = 4.172E-16
 Shell 374551

Subcase: 1 G -Y A +X



Obr. 78 Napětí na boxu 4 při prudkém brždění.

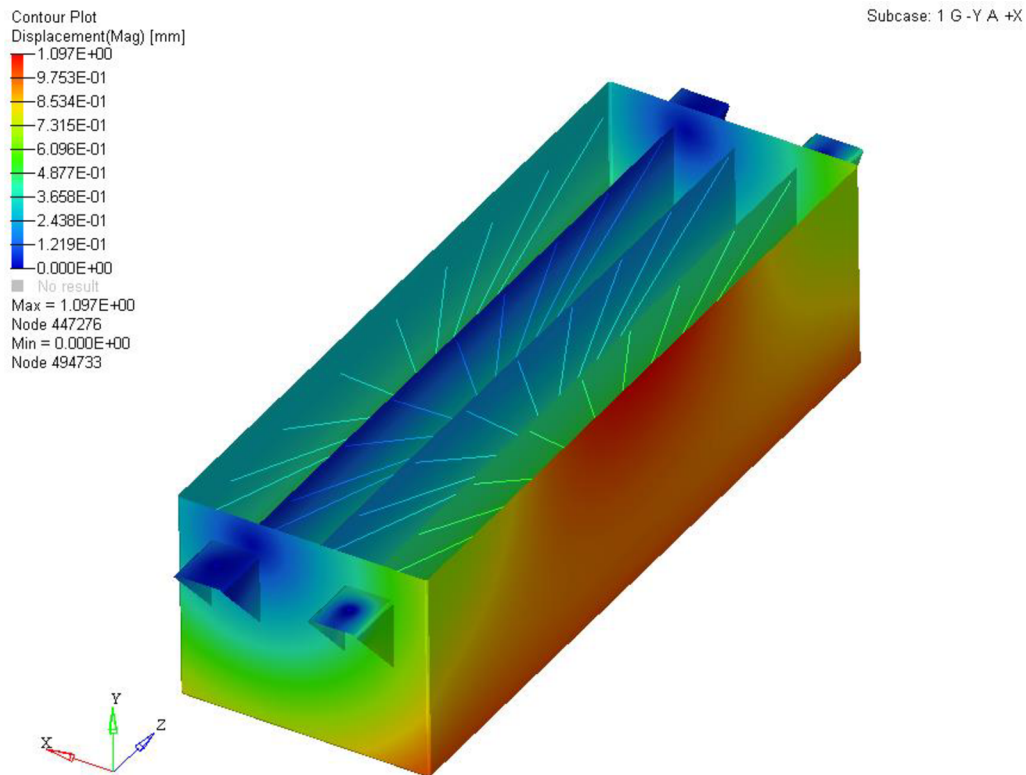
Výsledné maximální napětí se pohybuje kolem 190 MPa, které se koncentruje kolem svarových spojů. Výsledná maximální deformace modelu se pohybuje v řádu desetin milimetru. Viz obrázek 79.

Součinitel bezpečnosti:

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{MAX}} \quad (97)$$

$$k = \frac{230}{190} \quad (98)$$

$$k = 1,21 \quad (99)$$



Obr. 79 Deformace boxu 4 při prudkém brždění.

Shrnutí MKP analýzy boxů

Z výsledků MKP analýz lze vyčíst, že boxy jsou velmi tuhé a nedeformují se při zatížení. Maximální deformace se nalézá vždy v ose x a maximální hodnota je 1 mm. Při větších hodnotách deformace by mohlo hrozit, že se dotkne silové vedení stěn boxu a vznikne zkrat. Součinitel bezpečnosti se při gravitačním zatížení pohybuje od 2,3 do 5,75. Boxy jsou tedy vhodně nadimenzované. Při prudkém brždění se v žádném z případů nepřesáhne mez kluzu materiálu. Můžeme tedy boxy považovat za bezpečné pro provoz i za kritických situací.

3 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ NÁVRHU

V této kapitole jsou popsány ekonomické náklady projektu.

3.1 Cena materiálu pro výrobu boxů

Pro výrobu bateriových boxů bude třeba pěti typů plechů:

- Plech 1.4301 tloušťky 1 mm
- Plech 1.4301 tloušťky 1,5 mm 1.4301
- Plech EN AW 1050A tloušťky 1 mm
- Plech EN AW 1050A tloušťky 2 mm
- Měděný plech tloušťky 0,8 mm

Po naskládání jednotlivých výpalků na výkres vyplynulo, kolik materiálu bude třeba. Viz tabulka 12.

Tab. 12 Rozpis cen za materiál ve formě plechů [46, 47, 51]. Ceny bez DPH.

Typ	Tloušťka [mm]	Rozměr polotovaru [mm]	Cena za m ² [Kč]	Potřebný počet [ks]	Cena celkem [Kč]
1.4301	1	2500x1250	645	1	1.290
1.4301	1,5	2000x1000	952	2	3.808
EN AW 1050A	1	2500x1250	301,5	1	603
EN AW 1050A	1,5	2000x1000	405	1	900
EN AW 1050A	2	2500x1250	603	1	1.884,3
Měděný plech	0,8	2000x1000	1725	5	17.250
Cena celkem [Kč]					25.741,3

Dále je třeba spojovací materiál. Potřebný počet jednotlivých kusů vyplývá z výkresové dokumentace.

Tab. 13 Rozpis cen za spojovací materiál. Ceny bez DPH.

Typ	Cena za kus [Kč]	Potřebný počet [ks]	Cena celkem [Kč]
Šroub šestihranný M4x16	0,4	127	50,8
Šroub šestihranný M6x16	1,2	134	160,8
Šroub šestihranný M10x75	6	25	150
Matice samojistná M4	0,29	127	36,83
Matice samojistná M6	0,4	134	53,6
Matice samojistná M10	1,75	25	43,75
Podložka pérová M4	0,04	254	10,16
Podložka pérová M6	0,16	268	42,88
Podložka pérová M10	0,35	25	8,75
Cena celkem [Kč]			557,57

Celková částka potřebná pro nákup spojovacího materiálu činí 557,57 Kč bez DPH.

3.2 Cena bateriových článků

Vybrané bateriové články 18650-3500 INR mají stanovenou cenu za kus bez DPH 83,15 Kč od distributorské firmy BatteryX s.r.o. Potřebný počet článků je 10.920 ks.

Cena celkem:

$$10.920 \times 83,15 \text{ Kč} = 907.998 \text{ Kč}$$

3.3 Cena za práci

Výroba boxů bude probíhat na několika pracovištích. Za prvé se materiál bude dělit na vodním paprsku, za druhé půjde na pracoviště ohráňovacího lisu. Dále se bude svařovat metodou TIG. Poté se budou aplikovat povrchové úpravy. Nakonec se bude celý bateriový box montovat do sestavy. V ceně je také započítaná cena za práci při kompletaci modulů.

Pro jednotlivé pracovní operace při výrobě boxů je stanovena hodinová sazba dle ceníku firem. Ta se násobí časem potřebným ke zhotovení výrobku.

Tab. 14 Rozpis cen za práci. Ceny bez DPH.

Pracoviště	Hodinová sazba [Kč]	Potřebný čas pro výrobu [hod]	Cena celkem [Kč]
Vodní paprsek	650	4	2.600
Svařování TIG	660	6	3.960
Fosfátování	800	3	2.400
Lakování	400	3	1.200
Bodové svařování	400	50	20.000
Pájení	400	50	20.000
Cena celkem [Kč]			50.160

Celková částka za práci činí 50.160 Kč bez DPH. Nejvýznamnější položkou v rozpočtu je práce na bateriových modulech – konkrétně bodování a pájení bateriových článků.

3.4 Shrnutí ekonomického zhodnocení

Po sečtení částek vychází celková ekonomická náročnost projektu na 983.978,17 Kč bez DPH. Z tohoto rozpočtu činí cena bateriových článků téměř 92 % z celkové částky. Pro zahrnutí dalších drobných nákladů na dopravu a ostatní materiál vynásobíme celkovou částku koeficientem 1,05. Nyní celková částka činí 1.033.177,1 Kč bez DPH. Odhadovaný schválený předběžný rozpočet pro projekt sponzorem byl stanoven na 1.000.000 Kč bez DPH.

ZÁVĚR

V této diplomové práci byl navržen a zkonstruován nový bateriový box pro elektromobil SuperBEL II. Tento je rozdělen na 5 samostatných boxů umístěných na vhodných místech. Důraz byl kladen na co největší energetickou kapacitu celého řešení a tím i co nejvyšší dojezd elektromobilu s ohledem na únosnost a prostorové možnosti karoserie a podvozku. Díky použití lithium-iontových článků a technologie ohýbaných plechů bylo možné dosáhnout velmi vysoké hodnoty gravimetrické hustoty celého boxu, a to díky reaktivně nízké hmotnosti celého řešení. Pro jednotlivé součásti boxů byly voleny materiály s ohledem na mechanické vlastnosti a důrazem na co nejnižší hmotnost.

Parametry navrženého bateriového boxu:

- Nominální energetická kapacita 138 kWh
- Nominální napětí 302,4 V
- Maximální napětí 352,8 V
- Počet bateriových článků 10.920 kusů
- Zapojení 84s130p
- Hmotnost 640 kg
- Celková gravimetrická energetická hustota boxu 215,6 Wh/kg
- Celková cena bateriového boxu činí 1.033.177,1 Kč bez DPH.

Popis konstrukčního návrhu:

- Celý bateriový box byl rozdělen dle prostorových dispozic na 5 podsestav;
- Byla zvolena cylindrická lithium-iontová technologie z důvodu vysoké energetické kapacity;
- Při návrhu bateriových boxů je klíčovým aspektem bezpečnost. Tato je zajištěna v návrhu použitím tavných pojistek mezi terminály bateriových článků a sběrnici, které jsou spojovány pomocí bodového svařování a pájení;
- Dále kompletním elektrickým zaizolováním modulů a boxů proti elektrickému zkratu. Toho bylo dosaženo elektroizolační fosfátovou povrchovou úpravou ocelových plechů a aplikací epoxyesterového nátěru. Pro ochranu nátěru proti odření, dodatečnou izolaci a ochranu modulů proti vibracím jsou boxy vyloženy netkanou nehořlavou textilií o tloušťce 3 mm;
- Fosfátová povrchová úprava byla aplikována i z důvodu zvýšení korozivzdornosti materiálu. Mezi podvozkem a vozovkou se nachází silně korodující prostředí, především v zimě za účinku vlhkosti a soli rozrušuje pasivační ochranu oceli a způsobuje korozi;
- Plechy byly řezány na vodním paprsku, ohýbány na ohraňovacím lisu a poté svařeny metodou TIG. Tato byla zvolena z důvodu vysoké kvality svaru a tím zajištění těsnosti boxů;
- Byly spočítány parametry pro ohýbání plechů a únosnost svarových spojů;

-
- Pomocí MKP analýzy byla ověřena únosnost jednotlivých bateriových boxů i za krizových situací;

Dalšími kroky řešení práce bude ověření návrhu na automobilu pomocí prototypů, které budou vyřezány na laseru z překližky. Po ověření rozměrů se vyrobí boxy z příslušných navrhovaných materiálů a bateriové moduly dle návrhů.

Ačkoliv navrhovaný bateriový box dosahuje výborných parametrů; důvod proč se taková auta běžně v provozu nevyskytují je především vysoká cena za bateriové články. Viz kapitola 3. Pořizovací cena elektromobilu s tisícikilometrovým dojezdem vysoce přesahuje náklady na pořízení automobilu se spalovacím motorem stejné třídy. Pouze bateriové články stojí stejně jako luxusně vybavený automobil střední třídy. Tuto skutečnost lehce vyvažuje výrazně nižší spotřeba elektromobilu a menší nároky na servis automobilu. Avšak než budou elektromobily s podobným odjezdem dostupné široké veřejnosti, ještě se bude třeba zaměřit na vývoj vysokovýkonných bezpečných a levných bateriových článků, které jsou klíčem k elektromobilům s vyšší hodnotou dojezdu s konkurenční pořizovací cenou.

4 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KWADE, Arno, Wolfgang HASELRIEDER, Ruben LEITHOFF, Armin MODLINGER, Franz DIETRICH a Klaus DROEDER. Current status and challenges for automotive battery production technologies. *Nature Energy*. 2018, 3(4), 290-300. DOI: 10.1038/s41560-018-0130-3. ISSN 2058-7546. Dostupné také z: <http://www.nature.com/articles/s41560-018-0130-3>
- [2] Fusek, P. Nové elektrodové struktury pro alkalické akumulátory: Diplomová práce, Brno, 2011. 77, Vedoucí Bakalářské práce Ing. Jiří Vrbický, FEKT VUT v Brně.
- [3] HROMÁDKO, Jan. Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada Publishing, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1
- [4] 17. NiCd akumulátory. www.battex.info. [Online] BATTEX, spol. s r.o., 2009-2013. [Citováno dne 20. 3. 2020] <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nicd-akumulatory>.
- [5] Nezávislý test dojezdu elektromobilů. Dostupné online. [Citováno dne 19.3.2020] <https://www.autosalon.tv/novinky/bonusy-k-tv-poradu/elektromobily-s-nejdelsim-dojezdem-uz-porazeji-benzinova-auta-a-bude-jich-pribyvat/pohledy/3>
- [6] Bodové svařování konektorů. Dostupné online. [Citováno dne 19.3.2020] <http://www.chinaexpress.cz/cs/item/SUNKKO-737G-Battery-Spot-welder-1-5kw-LED-light-Spot-Welding-Machine-for-18650-battery-pack/32852027012.html>
- [7] BU-304a: Safety Concerns with Li-ion. [Batteryuniversity.com](http://batteryuniversity.com) [online]. USA: Isidor Buchmann, 2019, 2019-04-23 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/safety_concerns_with_li_ion
- [8] Baterie (článek) LiFePO4 3.2V 160Ah. In: [Ecoprodukt.cz](http://ecoprodukt.cz) [online]. ČR: ecoprodukt, 2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.ecoprodukt.cz/e/2160>
- [9] WEICKER, Phillip. A systems approach to Lithium-ion battery management. USA, MA: Artech house, 2013. ISBN 9781608076598.
- [10] WARNER, John T. Lithium-Ion Battery Chemistries: A Primer. USA: Elsevier, 2019. ISBN 9780128147788.
- [11] THACKERAY, M. M. Structural Considerations of Layered and Spinel Lithiated Oxides for Lithium Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. 1995, **142**(8). DOI: 10.1149/1.2050053. ISSN 00134651. Dostupné také z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2050053>
- [12] Lithium Air Battery. In: [Http://alpha.chem.umb.edu/](http://alpha.chem.umb.edu/) [online]. USA: alpha chem, 2011, 2011 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <http://alpha.chem.umb.edu/chemistry/ch471/documents/Lithium%20Air%20Presentation%20josh.pdf>

-
- [13] Prezentace firmy ŠKODA auto a.s., divize vývoje baterií. 22.10.2019, Mladá Boleslav
- [14] Li-ion baterie: principy, provoz, rady (1.část). Cnews.cz [online]. ČR: cnews.cz, 2011, 15.4.2011 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1-cast/>
- [15] Lithium-iontový akumulátor. In: Wikipedia.cz [online]. ČR: Wikipedia, 2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-iontov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [16] CHEN, Mingyi, Jiahao LIU, Yaping HE, Richard YUEN a Jian WANG. Study of the fire hazards of lithium-ion batteries at different pressures. Applied Thermal Engineering. 2017, **125**, 1061-1074. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.131. ISSN 13594311. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431116322797>
- [17] Lithium-polymerové baterie. In: <https://www.laskarduino.cz/> [online]. ČR: LaskaArduino, 2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: https://www.laskarduino.cz/baterie-li-po-3-7v-900mah-lipo/?gclid=EAIaIQobChMIiPqlzda96AIVRbTtCh1uhwtNEAQYAiABEGLmx_D_BwE
- [18] WANG, Q., J. SUN a Guanquan CHU. Lithium Ion Battery Fire And Explosion. Fire Safety Science. 2005, **8**, 375-382. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.8-375. ISSN 18174299. Dostupné také z: <http://www.iafss.org/publications/fss/8/375>
- [19] ZHU, Juner, Tomasz WIERZBICKI a Wei LI. A review of safety-focused mechanical modeling of commercial lithium-ion batteries. Journal of Power Sources. 2018, **378**, 153-168. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.12.034. ISSN 03787753. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775317316361>
- [20] BU-206: Lithium-polymer: Substance or Hype? Batteryuniversity.com [online]. USA: Isidor Buchmann, 2020, 2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/the_li_polymer_battery_substance_or_hype
- [21] BRAND, Martin J., Philipp A. SCHMIDT, Michael F. ZAEH a Andreas JOSSEN. Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances. Journal of Energy Storage. 2015, **1**, 7-14. DOI: 10.1016/j.est.2015.04.001. ISSN 2352152X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352152X15000055>
- [22] Praktické rady pro kvalitní a efektivní ruční pájení. Wwww.soselectronic.cz [online]. ČR: SOSelectronic, 2019, [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.soselectronic.cz/articles/weller/prakticke-rady-pro-kvalitni-a-efektivni-rucni-pajeni-2297>
- [23] Tvrdé pájení [online]. ČR: Chem-weld, 2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://eshop.chemweld.cz/http/eshop-chemweld-cz/tvrde-pajeni-b4050-htm>
- [24] ZHANG, Hongyan a Jacek SENKARA. Resistance Welding. 2011-12-13. DOI: 10.1201/b11752.
- [25] DANIELS, H.P.C. Ultrasonic welding. Ultrasonics. 1965, **3**(4), 190-196. DOI: 10.1016/0041-624X(65)90169-1. ISSN 0041624X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0041624X65901691>

-
- [26] CHOI, Sang, Thomas FUHLBRIGGE a Srinivas NIDAMARTHI. Vibration analysis in robotic ultrasonic welding for battery assembly. 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2012, 2012, , 550-554. DOI: 10.1109/CoASE.2012.6386349. ISBN 978-1-4673-0430-6. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6386349/>
- [27] SCHWEIER, M., J.F. HEINS, M.W. HAUBOLD a M.F. ZAEH. Spatter Formation in Laser Welding with Beam Oscillation. *Physics Procedia*. 2013, **41**, 20-30. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.047. ISSN 18753892. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389213000618>
- [28] MALÝ, Petr. Měření mechanických a elektrických vlastností pájeného spoje [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <<https://theses.cz/id/jqlgp1/>>. Diplomová práce.
- [29] NiCd akumulátor. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/akumulator-paskovy-panasonic-subc-nicd-1700mah-1-2v-n-1700scr>
- [30] Tesla's Battery Tech Explained: Part 1 – The Cell [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=P7GR5fERXNY>
- [31] Tesla's Battery Tech Explained: Part 2 – The Module [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=bNd-yJtRPhk>
- [32] Tesla's Battery Tech Explained: Part 3 – The Pack [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=izUI28YtQbE>
- [33] NITTA, Naoki, Feixiang WU, Jung Tae LEE a Gleb YUSHIN. Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*. 2015, **18**(5), 252-264. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040. ISSN 13697021. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369702114004118>
- [34] PATEL, Prachi. Improving the Lithium-Ion Battery. *ACS Central Science*. 2015, **1**(4), 161-162. DOI: 10.1021/acscentsci.5b00223. ISSN 2374-7943. Dostupné také z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscentsci.5b00223>
- [35] MYUNG, Seung-Taek, Filippo MAGLIA, Kang-Joon PARK, Chong Seung YOON, Peter LAMP, Sung-Jin KIM a Yang-Kook SUN. Nickel-Rich Layered Cathode Materials for Automotive Lithium-Ion Batteries: Achievements and Perspectives. *ACS Energy Letters*. 2016, **2**(1), 196-223. DOI: 10.1021/acseenergylett.6b00594. ISSN 2380-8195. Dostupné také z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acseenergylett.6b00594>
- [36] Teardown of new 100 kWh Tesla battery pack reveals new cooling system and 102 kWh capacity. Fred Lambert [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://electrek.co/2017/01/24/tesla-teardown-100-kwh-battery-pack/>
- [37] Extruded and Ribbed Thermal Interface for use with a Battery Cooling System. Dostupné z: <https://patents.justia.com/patent/20110212356>
- [38] Motor SIEMENS 1PV5133-4WS20 W11 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://bmpenterprises.net/blog/wp-content/uploads/2009/12/AC-Motor.jpg>

-
- [39] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0
- [40] Schaefflerův diagram [10. 6. 2020] [online]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/svaritelnost_materialu__ambroz.pdf
- [41] ČÍHAL, Vladimír. Korozivzdorné oceli a slitiny. 1. Vyd. Praha: Academia, 1999. ISBN 80-200-0671-0
- [42] DVOŘÁK, Milan. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: CERM, 2007, 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
- [43] MOURITZ, Adrian P. Introduction to aerospace materials. Oxford u.a: Woodhead Publ. Limited, 2012. ISBN 978-085-7095-152.
- [44] SHEIKH-AHMAD, Jamal Y. Machining of polymer composites. London: Springer, 2009. ISBN 978-038-7355-399.
- [45] Korozivzdorné oceli. [15. 6. 2020] [online]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyNerez/Nerez-2.pdf>
- [46] Korozivzdorná ocel 1.4301 [15. 6. 2020] [online]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
- [47] Plechy válcované za studena. [15. 6. 2020] [online]. Dostupné z: <https://www.inerez.cz/nerezove-plechy/nerezove-plechy-valcovane-za-studena/nerezovy-plech-valcovany-za-studena-2b-1.4301/>
- [48] Trumpf TruBend 5170. [15. 6. 2020] [online]. Dostupné z: <https://www.netbid.com/cz/aukce/detail-prehled/17158946-Trumpf-TruBend-5170-hydraulic-2-pillar-press-brake-160/>
- [49] Trumpf TruBend 5170 parametry. [15. 6. 2020] [online]. Dostupné z: <https://asperatechnology.cz/strojni-park/trumpf-trubend-5170/>
- [50] SEMELA, Marek. Analýza silničních nehod I. Vysoké učení technické, Ústav soudního inženýrství. Brno: VUT, 2014. ISBN 978-80-214-5037-0.
- [51] Měděný plech 0,8 mm. [15. 6. 2020] [online]. Dostupné z: <http://www.klempirsky-eshop.cz/Plech-tabule-med-0-80-mm-1x2m-d3.htm>
- [52] Fosfátování. [15. 6. 2020] [online]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62012/klasifikace-fosfatovych-povlaku.html>
- [53] SHIGLEY, Joseph E. Konstruování strojních součástí. 7. vydání. Brno: VUTIUM, 2010, 1158 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

5 SEZNAM PŘÍLOH

- [1] Datasheet RT-BMS GWL Europe Ltd.
- [2] Výkresy pro pálení plechů
- [3] Výkresy pro ohýbání součástí
- [4] Výkresy pro svařování součástí
- [5] Výkresy sestav bateriových boxů
- [6] Elektronické schéma zapojení Super EL II
- [7] 3D CAD modely konstrukčního řešení