

PROGRESIVNÍ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE INTEGRÁLNÍCH HRUBÝCH STAVEB KOLEJOVÝCH VOZIDEL ZE SLITIN HLINÍKU

PROGRESSIVE PRODUCTION TECHNOLOGY OF INTEGRAL CAR BODY SHELL FROM ALUMINIUM ALLOYS

Martin KOPEČNÝ¹, Ota STRNAD²

Abstrakt

Snaha zvýšit produktivitu výroby integrálních hrubých staveb ze slitin hliníku a snaha snížit celkovou hmotnost vozidla vedou k tomu, že jsou intenzivně hledány progresivní výrobní technologie. Mezi ně patří frikční svařování a kompozitní panely.

Při frikčním svařování dochází k menšímu tepelnému ovlivnění v místě svaru, a tedy menším deformacím po svaření, než je tomu u nyní nejčastěji používaného svařování elektrickým obloukem. Výhody této technologie se projevují jak u tenko-, tak i tlustostěnných profilů či plechů. Škoda Transportation momentálně tuto technologii používá při výrobě hrubých staveb jedno- i dvoupodlažních vozidel.

Kompozitní panely se v dnešní době používají nejen jako pohledové panely vnějšího či vnitřního obložení, ale i jako nosné části hrubé stavby. Příkladem použití jsou strukturální příčky nebo podlahy patrových vozidel. Panely jsou tvořeny jádrem z hliníkové voštiny, obvodovými profily a potahem z hliníkového plechu na obou stranách. Všechny části panelu jsou vzájemně slepeny a ke zbytku hrubé stavby mohou být přinýtovány, přišroubovány nebo i přivařeny.

Klíčová slova

FSW, svařování, čelník, kompozitní, podlaha

Abstract

Efforts to increase the productivity of the production of integral car body shell from aluminium alloys and to reduce the overall weight of the vehicle lead to the intensive search for progressive production technologies. These include friction stir welding and composite panels. In friction welding, there is less thermal influence at the weld site and thus less deformation after welding than in the currently most commonly used electric arc welding. The advantages of this technology are reflected in both thin- and thick-walled profiles or sheets. Škoda Transportation currently uses this technology in the production of car body shell for single- and double-deck vehicles.

Today, composite panels are used not only as visible panels of external or internal cladding, but also as load-bearing parts of a car body shell. Examples of applications are structural partitions or floors of double-decker vehicles. The panels consist of a core of aluminium honeycomb, peripheral profiles and a coating of aluminium sheet on both sides. All parts of the panel are glued to each other and can be riveted, screwed or even welded to the rest of the rough construction.

Keywords

FSW, welding, headstock, composite, floor

¹ Ing. Martin Kopečný, ŠKODA TRANSPORTATION a.s. 1. máje 3176/102, 703 00 Ostrava. Tel.: +420 597 477 354, e-mail: martin.kopecny@skoda.cz

² Ing. Ota Strnad, VÚKV a.s. Bucharova 1314/8, 158 00 Praha 13 – Stodůlky. Tel.: +420 251 113 438, e-mail: strnad@vukv.cz

1 ÚVOD

Snaha zvýšit produktivitu výroby integrálních hrubých staveb ze slitin hliníku a snaha snížit celkovou hmotnost vozidla vedou k tomu, že jsou intenzivně hledány progresivní výrobní technologie. Mezi ně patří frikční svařování a kompozitní panely.

2 SVAŘOVÁNÍ V SOUČASNOSTI

V současnosti, při svařování konstrukcí kolejových vozidel ze slitin hliníku, jsou jedním z největších problémů velké deformace svařovaných konstrukcí a jejich nákladné odstraňování. S velkými deformacemi, tepelným ovlivněním v okolí svarů a následnou snahou o dosažení přípustných rozměrů a tolerancí svařenců je spojeno riziko poškození, například vzniku prasklin.

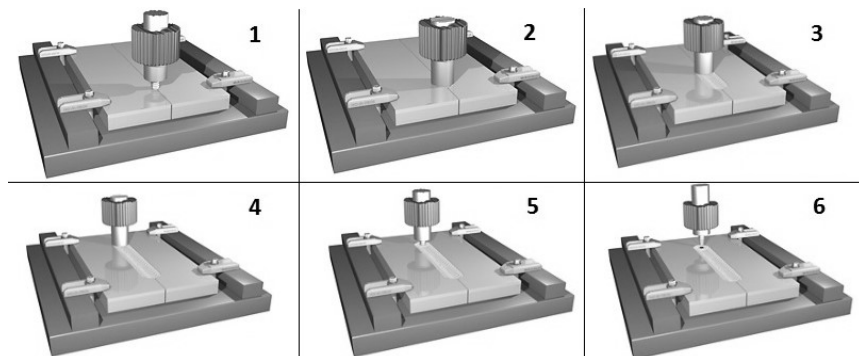
Optimalizace technologie svařování se dosud nejčastěji provádí až na hotových svařencích systémem „pokus-omyl“ a v nemalé míře se řeší jejich „násilným“ rovnáním po svaření. Takový postup způsobuje díky času potřebnému na tyto operace a riziku poškození velké finanční náklady na straně výrobce, může vést k prodloužení dodacích termínů a může být příčinou finančních penále za pozdní dodání. Proces rovnání také vnáší do konstrukce zbytkovou napjatost a způsobuje další materiálové degradace, které snižují odolnost svařované konstrukce vůči provozním (únavovým) i výjimečným zatížením. Aby skříňové vozidel byly pevnostně vyhovující, je potřeba je dimenzovat i s ohledem na tyto nepříznivé výrobní vlivy.

V posledních letech je kladen velký důraz na snižování hmotnosti vozidel, a tedy i na ekologičnost provozu (nižší hmotnost = nižší energetické nároky). Tento stav techniky tak vede k volbě nových materiálů nebo nových výrobních technologií i v oblasti hrubých staveb skříní. Jednou z nových technologií je i technologie FSW svařování.

3 TECHNOLOGIE FSW SVAŘOVÁNÍ

Jedná se o princip třecího svařování s promíšením (Friction stir welding ve zkratce FSW). Tento způsob svařování byl vynalezen a patentován již v roce 1991 institutem TWI v Cambridge [1]. Při svařování je využíván rotační nástroj s cylindrickým ramenem a profilovaným kolíkem (pinem), který se otáčí a pomalu zanořuje do místa spoje. Vzhledem k relativně velkým silám je zapotřebí pevné upnutí spojovaných dílů. Teplo vzniklé třením mezi svařovacím nástrojem a svařencem způsobuje, že materiál svařence může změkknout, aniž by bylo dosaženo teploty tavení.

Většina výhod tohoto procesu třecího svařování vyplývá z faktu, že v rámci výrobního procesu nedochází k žádnému makroskopickému tavení spojovaných částí. Díky tomu dochází k minimálním deformacím i u dlouhých a velkých svarů.



Obr. 1 Princip FSW svařování v šesti krocích: (1) vnoření pinu do materiálu, (2) prodleva při vnoření, (3) pohybem pinu dochází k vytvoření svaru, (4) ukončení svaru, (5) vytažování pinu, (6) úplně vytažený pin

4 MOŽNOSTI POUŽITÍ TECHNOLOGIE FSW

Metoda FSW svařování má nezanedbatelný technologický přínos pro široké spektrum svarů, přičemž významný je především pro svařence s velkými nebo velmi malými tloušťkami svarů. U kolejových vozidel se jedná v případě velkých svarů například o svařence z oblasti připojení skříně s podvozkem (hlavní příčník) nebo místa, kde jsou ke skříní připojena nárazecí a spřahovací ústrojí (čelníky). Svary v těchto místech dosahují tloušťek i více jak 20 mm a při konvenčním (tavném) svařování způsobují mnohdy nepřijatelné deformace.

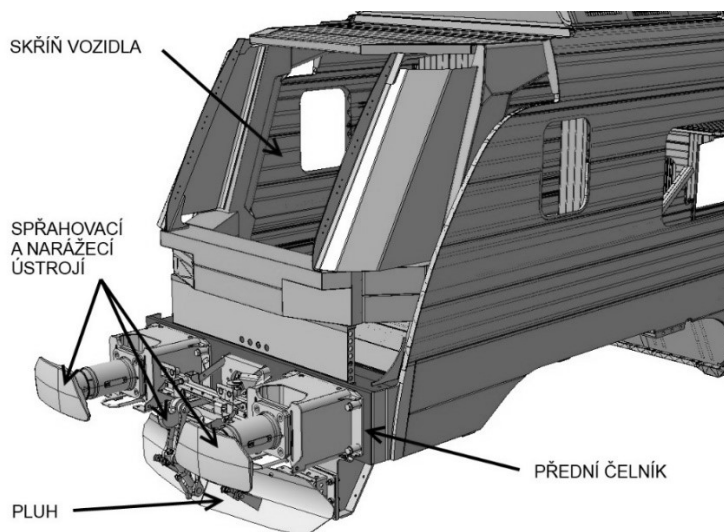
Při aplikaci FSW svařování se tyto deformace výrazně sníží. Výrobní náklady na samotné FSW svařování i jeho přípravu jsou sice vyšší než náklady na tavné svařování, ale aplikací FSW svařování dojde k výrazné úspoře nákladů jak po svaření – nižší náklady na rovnání deformací vzniklých po svařování, tak i před zahájením výroby – nižší materiálové náklady z důvodu menších přídavků na obrábění.

Přínosem této nové technologie tak není primárně výrazné snížení nákladů samotné výroby, ale optimálnější a levnější průběh celého výrobního procesu včetně zkrácení výrobních časů a minimalizace vedlejších nákladů. Zároveň se touto technologií získají svařené konstrukce, které budou v oblasti svarů i v jejich okolí méně tepelně degradovány, materiál může být lépe využit a může tak být dosaženo snížení hmotnosti hrubé stavby.

5 APLIKACE TECHNOLOGIE FSW NA PROJEKTECH ŠKODA VAGONKA

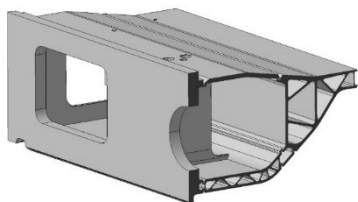
Nakupované svařence s využitím technologie FSW svařování jsou použity na několika posledních projektech vyráběných ve firmě Škoda Vagonka a.s. První použití bylo aplikováno na patrové PUSH-PULL jednotce pro České dráhy, která se začala vyvíjet v roce 2017.

Velmi problematické (především z hlediska pevnostního dimenzování a technologické optimalizace) bývají čelní partie konstrukce spodku skříní kolejových vozidel. Přední čelník řídicího vozu je nejvíce zatěžovanou částí. Musí umožňovat přenos zatížení ze spřahovacích i nárazecích ústrojí a ze smetadla překážek (pluhu) – viz obrázek 2. Tato část konstrukce je dimenzována dle normy [2], kategorie P-II na tlakovou sílu na nárazecí ústrojí 1 500 kN a tahovou sílu na spřahovací ústrojí 1 000 kN.



Obr. 2 Vyznačení předního čelníku na skříní řídicího vozu

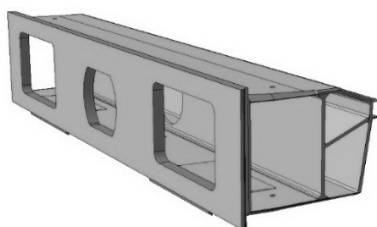
S ohledem na velká zatížení, která musí konstrukce předního čelníku přenášet, jsou obvykle použity masivní profily s velkými tloušťkami stěn a svarů. Aby se co nejvíce zamezilo deformacím po svařování, tak se do konstrukce čelníků určených pro konvenční svařování aplikuje větší počet pásnic a svislých žebér, čímž se dosahuje určitého snížení velikosti svarů – viz obrázek 3. Ovšem i s těmito opatřeními zde bývají svary o velikosti až 20 mm. Konstrukce bývají složité a jejich výroba je velmi pracná.



Obr. 3 Konvenčně svařovaný přední čelník; pro ilustraci použit čelník ze staršího projektu spol. Škoda Vagonka

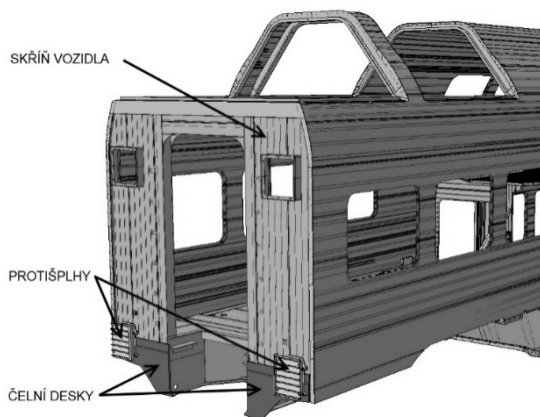
Metoda FSW svařování umožňuje svařovat profily až do tloušťky 60 mm, a to bez větších deformací. Toto je velká výhoda, protože díky ní lze navrhnout konstrukce, které by byly pro konvenční svařování absolutně nerealizovatelné. U konstrukce FSW čelníků tak lze použít i svar v čelní desce (tloušťky 40 až 60 mm), což umožňuje optimálnější rozdělení protlačovaných profilů.

Díky tomuto dělení tak mohla vzniknout výrazně jednodušší konstrukce, která přinesla odhadované snížení hmotnosti kolem cca 15 % (v porovnání s dříve vyráběnými čelníky svařovanými metodou MIG).



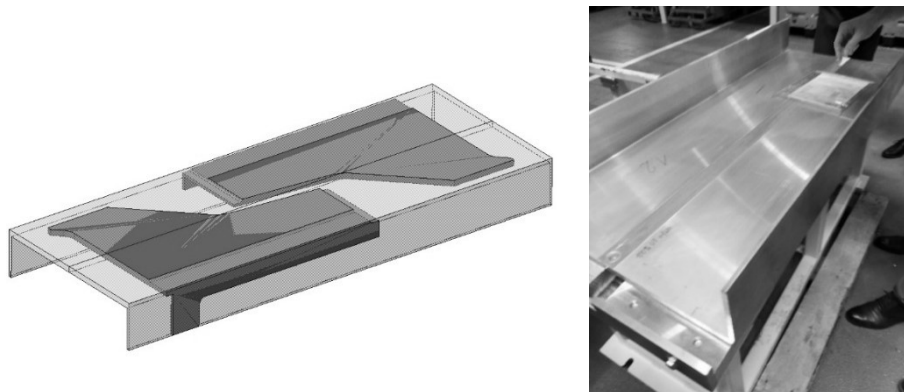
Obr. 4 Přední čelník svařovaný metodou FSW

Dalšími díly, které jsou vhodné pro svařování technologií FSW, jsou čelní desky na zadních čelech mezivozových částí skříní (viz obrázek 5). V této části konstrukce spodku skříně jsou přišroubovány tzv. protišplhy. Jejich úkolem je zabránit vzájemnému šplhání vozů při uvažovaných kolizních scénářích dle normy [3]. Protišplhy jsou dimenzovány na výjimečná zatížení 2×750 kN.



Obr. 5 Čelní desky na zadním čele skříně patrového vozu

K čelním deskám je také přišroubována spodní část přechodových měchů, pro které je nutno zajistit přijatelné geometrické tolerance (především rovnoběžnost s plochou zadního čela a rovinnost). Z tohoto důvodu jsou čelní desky na úrovni představků obráběny a jejich polotovary obsahují technologické přídavky. Svařenec čelních desek je tvořen dvěma L profily, které jsou uprostřed svařeny jedním FSW swarem o velikosti 20 mm. Z tohoto svařence je následně na obráběcím centru obrobena pravé a levé provedení čelních desek – viz obrázek 6.



Obr. 6 Čelní desky svařované metodou FSW

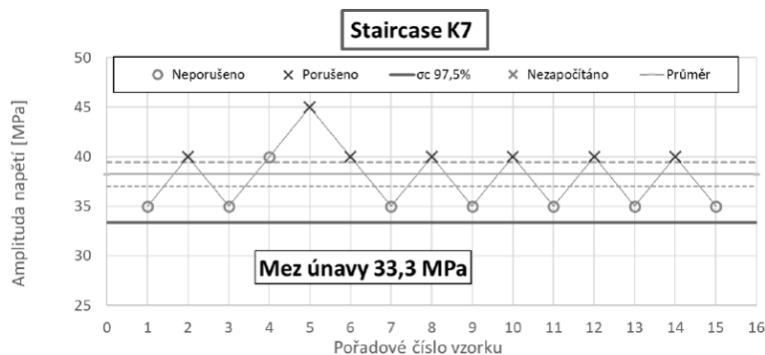
6 ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY FSW SVARŮ

Pro vyhodnocení únavových napětí u konvenčních (tavných) svarů se používají různé metody. V případě kolejových vozidel svařených z obvyklých slitin hliníků je to nejčastěji podle metody uvedené ve směrnici [4]. Tato směrnice ale neposkytuje postup, jak vyhodnotit svary svařené technologií FSW. Z tohoto důvodu byl navržen a odladěn zkušební program pro zkoušky vysokocyklové únavy. Zkoušeny byly 3 typy svarových spojů:

- FSW svar dvou materiálů typu 6005A/T6,
- FSW svar dvou materiálů typu 6082/T6,
- MIG svar dvou materiálů typu 6005A/T6.

Provedeno bylo několik sad zkoušek a každá sada obsahovala 15 platných vzorků. Svary v jednotlivých sadách byly orientovány buď kolmo ke směru namáhání, nebo rovnoběžně se směrem namáhání. Způsob zatížení jednotlivých sad byl rozdílný – byl zvolen různý součinitel asymetrie cyklu.

Výsledné hodnoty meze únavy byly u každé sady zkoušek získány pro 10 milionů cyklů s pravděpodobností přežití větší než 97,5 % na hladině spolehlivosti 95 %. Určení meze únavy bylo provedeno stupňovanou metodou (StairCase).



Obr. 7 Ukázka vyhodnocení meze únavy metodou Staircase

Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že zkoušky u FSW svarů potvrdily vysokou kvalitu a velmi vysoké parametry únavových vlastností. Jejich úroveň se pohybuje výše, než je obvyklá úroveň u velmi kvalitních V-svarů zhotovených technologií MIG, která je daná zveřejněnými hodnotami v příslušných směrnících.

7 KOMPOZITNÍ MATERIÁL

Kompozitní materiál, nebo zkráceně kompozit, je obecně vzato materiál ze dvou nebo více substancí s rozdílnými vlastnostmi, které dohromady dávají výslednému výrobku nové vlastnosti, které nemá sama o sobě žádná z jeho součástí.

Jedním z nejznámějších kompozitních materiálů je železobeton, kompozit z ocelových drátů a betonu (beton je kompozit z kameniva a cementu), dalším známým zástupcem je skelný laminát, kompozit ze skleněných vláken a pryskyřice, obvykle polyesterové. Hojně užívaný kompozitní materiál je asfaltová směs na výrobu povrchu komunikací.

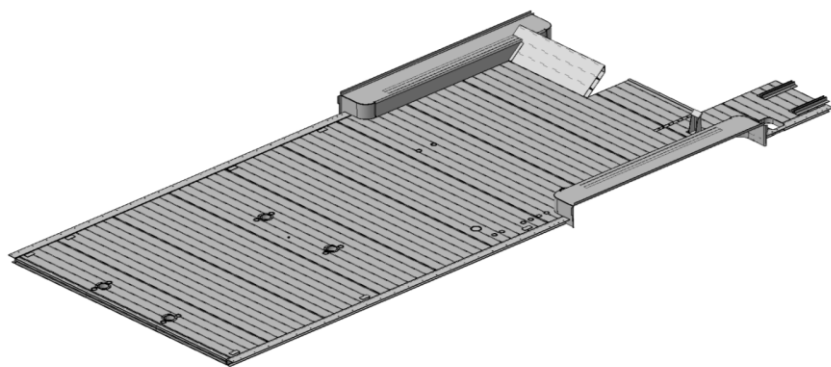
Dalšími zástupci jsou kompozity z vláken uhlíkových a aramidových, ze kterých se vyrábějí extrémně pevné a lehké díly pro konstrukce letadel a raket, užití mají i v automobilovém průmyslu a v ozbrojených složkách (nepřůstřelné vesty).

Obvykle jedna ze součástí dodává výrobku pevnost a druhá slouží jako pojivo.

Přednosti kompozitních materiálů tkví zpravidla především v jejich hmotnosti. Oproti tradičním ocelovým součástem mají i při větším objemu stále podstatně nižší hmotnost, což usnadňuje jejich přepravu a rychlou a snadnou montáž a demontáž. Kompozitní materiály se výrazněji nedeformují (jejich mez elasticity odpovídá mezi pevností). Mají velmi vysokou mez únavy a jsou stabilní a spolehlivé. [5] Využití kompozitních materiálů v oblasti kolejových vozidel je v současnosti hlavně při konstrukci interiérových částí vozů. Jsou využívány deskové materiály s různým typem jádra (voština-honeycomb, pěna) a různým typem povrchových vrstev (laminát, AL plech).

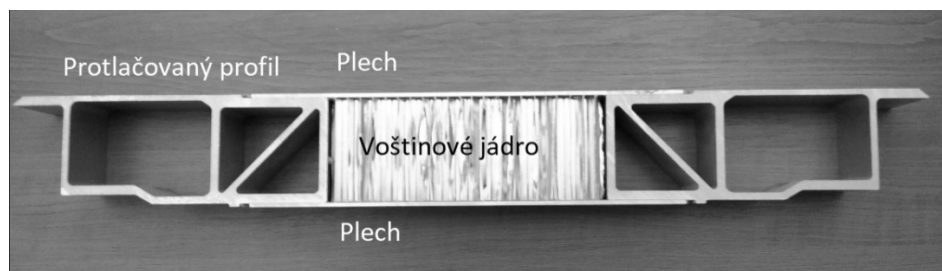
8 APLIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V KONSTRUKCI HRUBÉ STAVBY

Jako vhodné využití kompozitního materiálu se ukázalo použití u svařence podlahy horního oddílu. Jedná se o nosnou část hrubé stavby zatěžovanou hlavně od cestujících. Vrchní strana je tvořená pochozí částí podlahy v horním oddíle. Spodní je stropem dolního oddílu. Na předchozích dvoupodlažních projektech je podlaha horního oddílu tvořená svařovanými protlačovanými hliníkovými profily, viz obrázek 8. **Obr. 8** Polovina podlahy vrchního oddílu EPJ 671 Jedná se o svařenou plochou desku, vloženou mezi bočnice vozu.



Obr. 8 Polovina podlahy vrchního oddílu EPJ 671

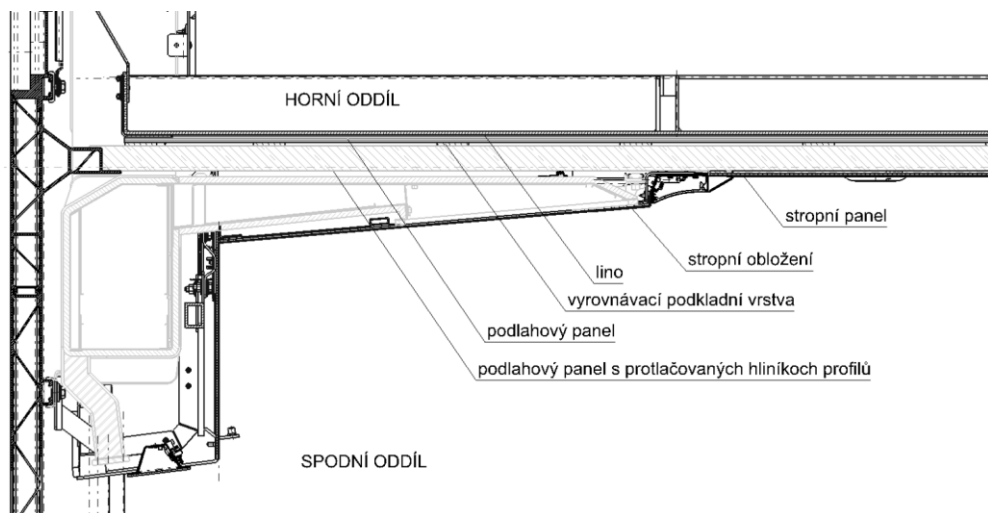
U patrové PUSH-PULL jednotky pro České dráhy je podlaha horního oddílu tvořena kompozitním panelem. Panel je tvořen potahem (skin) z 2 mm silného hliníkového plechu a jádrem (core) z hliníkové voštiny. Celková tloušťka panelu je 63 mm. Po obvodu je panel lemován protlačovaným hliníkovým profilem, který tvoří rozhraní s okolní hrubou stavbou vozu (ta je svařena z hliníkových protlačovaných profilů). Všechny uvedené části kompozitního panelu jsou vzájemně slepeny do jednoho tuhého celku. Panel je do hrubé stavby přinýtován ve fázi skládání jednotlivých podsestav hrubé stavby do jednoho celku (tzv. aretace). Vzhledem ke specifickému charakteru dílu jej s požadovanými vlastnostmi vyrábí jen firma Euro-Composites z Lucemburska.



Obr. 9 Příklad složení kompozitního panelu

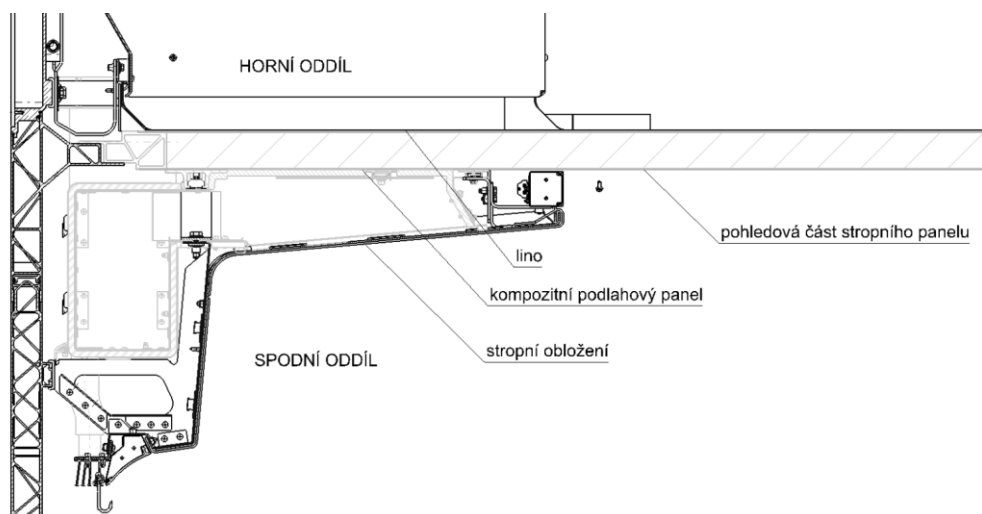
9 PŘÍNOS KOMPOZITNÍHO PANELU

Původní řešení ze svařovaných hliníkových profilů si vyžaduje složitější konstrukci interiérových částí vozu. Podlaha horního oddílu musí být kvůli nerovnostem tvořena z lina, překližky (spoje se musí tmelit), vyrovnávací podkladní vrstvy. Strop spodního oddílu je tvořen stropním obložením, které zakrývá technologii vzduchotechniky, a v uličce nad hlavami cestujících jsou umístěny stropní pohledové panely. Řez podlahou horního oddílu na obrázku 10.



Obr. 10 Řez podlahou horního oddílu – původní řešení

Řešení s kompozitním panelem má rovný povrch bez svarů, toto umožňuje v horním oddíle vypustit překližkový podlahový panel a jeho podkladku. Ve spodním oddíle je možné vynechat stropní panel v uličce vozu. Pohledová část kompozitního panelu je lakována odstínem okolitého interiéru obr. 11.



Obr. 11 Řez podlahou horního oddílu – nové řešení

Nové řešení panelu podlahy horního oddílu přináší zjednodušení montáže, úsporu nákladů na materiál obložení interiéru, nižší součtová výška podlahy jako celku přináší více prostoru v horním i spodním oddíle. Dalším přínosem kompozitního panelu je jeho vyšší tuhost a tím zlepšení chodových vlastností vozu. Největším přínosem kompozitního panelu je úspora celkové hmotnosti vozu.

Nevýhodou je vyšší cena panelu nakupovaného mimo firmu, po kalkulaci nákladů je použití panelu přínosem.

10 ZÁVĚR

Ve společnostech VÚKV a.s. a Škoda Vagonka a.s. vznikly konstrukční návrhy několika FSW svařenců. Tyto svařence byly vyrobeny u externího dodavatele a následně byly úspěšně aplikovány do výroby nových patrových a jednopodlažních jednotek.

Souběžně s návrhem a výrobou FSW svařenců proběhl i výzkum mechanických vlastností. Byl navržen a odladěn zkušební program pro zkoušky vysokocyklové únavy, proběhly únavové zkoušky a byly zpracovány zprávy z měření. Výsledky měření přinesly velmi zajímavé poznatky, které jsou potenciálem pro další výzkum.

Uplatnění FSW svarů v konstrukcích kolejových vozidel se ukazuje jako smysluplné. S využitím této technologie svařování se i nadále počítá u čelních partií spodků u nově vyvíjených vozidel ve firmě Škoda Vagonka a.s.

Využití kompozitního materiálu v konstrukci hrubé stavby zjednoduší montáž podlahy a interiéru, přináší časovou úsporu na montáži vozu. Největším přínosem je snížení celkové hmotnosti vozu.

Aplikace svařenců do výroby hrubých staveb skříní ve firmě Škoda Vagonka a.s. a s ním spojená výzkumná činnost je svázána s projektem TH03020044.



Literatura

- [1] Třecí svařování promíšením. *Wikipedie* [online]. 2011, poslední změna 31. 05. 2021 [cit. 15. 06. 2021]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Třecí_svařování_promíšením

- [2] ČSN EN 12663-1+A1. *Železniční aplikace – Pevnostní požadavky na konstrukce skříňů kolejových vozidel – Část 1: Lokomotivy a vozidla osobní dopravy (a alternativní metoda pro nákladní vozy)*. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [3] EN 15227+A1. *Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies*. Brussels: CEN, 2010.
- [4] DVS 1608. *Gestaltung und Dauerfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen an Aluminiumlegierungen im Schienenfahrzeugbau*. Düsseldorf: Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., 2010.
- [5] Kompozitní materiál. *Wikipedie* [online]. 2008, poslední změna 03. 05. 2020 [cit. 15. 06. 2021]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kompozitn%C3%AD_materi%C3%A1l