

PROCES NÁVRHU A VALIDACE LEPENÝCH SPOJŮ KOLEJOVÝCH VOZIDEL

DESIGN AND VALIDATION PROCESS OF ADHESIVELY BONDED JOINTS OF RAILWAY VEHICLES

Lukáš JETENSKÝ¹, Petr ŠINDELÁŘ²

Abstrakt

Lepení se řadí mezi tzv. speciální procesy, u kterých nelze následnými nedestruktivními zkouškami 100% ověřit kvalitu spoje. Cílem tohoto příspěvku je popsat problematiku lepených spojů kolejových vozidel od návrhu a konstrukce, kde se pojednává o volbě vhodného lepicího systému, dimenzování rozměrů lepidla atd., až po možné způsoby validaci lepených spojů včetně výpočtů lepených spojů.

Klíčová slova

železniční vozidla, lepené spoje, konstrukční návrh, validace

Abstract

Adhesive bonding will be ranked with so called special processes where is impossible to absolutely verify the joint quality by means of the following non-destructive tests. The goal of this entry is to describe the adhesive bonded joints questions from the proposal and design, where the suitable adhesive bonding system will be discussed, the adhesive proportions dimensioning etc. to the possible adhesive bonding validation methods including bonded joints calculation analysis.

Keywords

railway rolling stock, adhesively bonded joint, design, validation

1 ÚVOD

Při výrobě kolejových vozidel byly na počátku využívány dostupné technologie spojování konstrukcí – nýtování a šroubování. S rozvojem nových technologií došlo v průběhu druhé světové války k masivnímu zavedení konstrukcí svařovaných. Pokud se podíváme na dnešní kolejové vozidlo, tak si můžeme povšimnout, že dominantními technologiemi spojování jsou svařování, případně šroubování nebo nýtování, a ve větší míře se začíná využívat i lepení. Je to pochopitelné, protože proces lepení v sobě skrývá relativně velké množství benefitů. Jedná se například o možnost spojovat materiály s různými vlastnostmi (laminát, ocel, hliník atd.) a tloušťkami. Vhodnou volbou lepicího systému lze vytvořit pevný nebo pružný spoj. V případě lepení také nedochází k tepelnému ovlivnění oblasti spojování, oblast spoje nebývá zeslabena otvorem atd. Každá technologie ale také přináší jisté nedostatky. V případě lepení je to např. nemožnost 100% ověření kvality spoje (odhalení

¹ Ing. Lukáš Jetenský, VÚKV a.s. Bucharova 1314/8, 158 00 Praha 5 – Stodůlky. Tel.: +420 225 343 418, e-mail: jetensky@vukv.cz

² Ing. Petr Šindelář, VÚKV a.s. Bucharova 1314/8, 158 00 Praha 5 – Stodůlky. Tel.: +420 225 343 407, e-mail: sindelar@vukv.cz

vad) a relativně malá pevnost lepidel, díky které je nutné kontaktní (lepené) plochy navrhovat větší. Asi největší nevýhodou lepení je poměrně velká závislost charakteristických vlastností lepidel na okolní podmínky (např. teplota, vlhkost, dlouhodobé statické zatížení atd.). Tyto nevýhody lze ale do jisté míry eliminovat vhodným konstrukčním řešením lepeného spoje.

Lepení se řadí mezi tzv. speciální procesy, u kterých nelze následnými nedestruktivními zkouškami 100% ověřit kvalitu spoje. S větším rozšířením této technologie spojování v kolejovém průmyslu a se zvyšujícím se počtem poškození lepených spojů bylo nutné pro tento proces definovat legislativní předpisy. Z toho důvodu byly započaty práce na normě DIN 6701 *Kleben von Schienenfahrzeugen und – fahrzeugteilen*, která má v současné době celkem čtyři části:

- *Teil 1: Grundbegriffe, Grundregeln* (v současné době je tato část neplatná),
- *Teil 2: Qualifikation der Anwenderbetriebe, Qualitätssicherung*,
- *Teil 3: Leitfaden zur Konstruktion und Nachweisführung von Klebverbindungen im Schienenfahrzeugbau*,
- *Teil 4: Ausführungsregeln und Qualitätssicherung*.

V roce 2008 německý drážní úřad (EBA) rozhodl, že všechny procesy lepení při výrobě a údržbě kolejových vozidel v SRN musí vyhovovat normě DIN 6701-2. To mělo za následek, že prakticky všichni výrobci lepených komponentů dodávaných do kolejových vozidel provozovaných v SRN se museli certifikovat podle této normy. V dnešní době je obvyklé, že většina lepených spojů, které se vyskytují na kolejových vozidlech, je navrhována v souladu s řadou norem DIN 6701, ačkoliv tato vozidla nejsou provozována v SRN.

V roce 2019 byly započaty práce na evropské normě prEN 17460 *Railway applications – Adhesive bonding of rail vehicles and parts*. Aktuálně bylo u této normy ukončeno připomínkové řízení a její přijetí se očekává v roce 2022.

2 PROBLEMATIKA NÁVRHU LEPENÝCH SPOJŮ

Návrh lepených spojů je téma poměrně rozsáhlé a překračuje možnosti tohoto příspěvku. Proto jsou v následujících kapitolách uvedeny komentáře pouze k vybraným bodům této problematiky.

2.1 Volba lepicího systému

Lepené spoje jsou v průběhu své životnosti vystaveny vnějším vlivům jako je např. teplota, vlhkost, UV záření, ale i třeba účinky různé mycí chemie, které mohou ovlivňovat charakteristické vlastnosti lepidla. Aby lepený spoj odolal všem vlivům, je potřeba navrhnout vhodný lepicí systém, tedy nejen samotné lepidlo, ale také prostředky pro přípravu a předúpravu povrchu jako např. čističe, primery, aktivátory atd. Na trhu je v současné době velké množství lepidel a tmelů, ze kterých je nutné vybrat správné produkty. Toho lze docílit pouze důslednou analýzou provozních a okrajových podmínek, které se musí zároveň uvést do tzv. seznamu požadavků.

Jednou ze stěžejních otázek při návrhu lepicího systému je, jaké mechanické vlastnosti má spoj mít. Pokud je požadováno, aby měl lepený spoj relativně velkou pevnost a s ní související malou elasticitu, lze vybrat nějaké lepidlo ze skupiny strukturálních (např. epoxidové lepidlo). Pokud naopak od lepeného spoje je požadována vysoká elasticita a je přijatelná relativně nízká pevnost, lze vybrat lepidlo ze skupiny elastických (např. jednosložkové polyuretanové lepidlo nebo MS polymer).

Další, v současné době vysoce aktuální, téma při volbě lepicího systému je otázka požární odolnosti. Bohužel velké množství lepidel není primárně vyvíjeno pro použití v kolejovém průmyslu a tak velmi často nemají certifikaci podle normy DIN 5510, případně EN 45545.

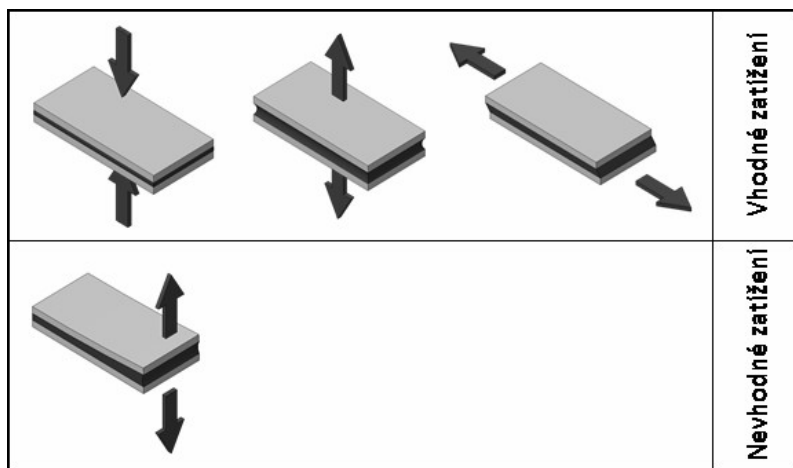
Každý navržený lepicí systém je nutné ověřit příslušnými zkouškami. Zkušenost ukazuje, že např. léty ověřený systém lepení použitý na jednom vozidle může být zcela nefunkční na jiném

vozidle, kde jsou lepené materiály shodné, ale mají různou povrchovou úpravou u ploch, na které je lepicí systém aplikován.

Současným trendem při výrobě kolejových vozidel je použití elastických jednosložkových lepicích systémů, pomocí kterých lze realizovat lepené spoje s poměrně velkými tloušťkami (výhodné z hlediska eliminace možných deformací a výrobních tolerancí) a které dovolují efektivně lepit a utěšňovat relativně velké plochy a spáry.

2.2 Konstrukce lepených spojů

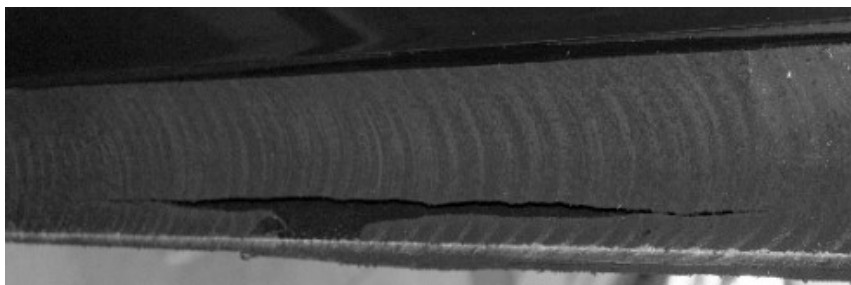
Existuje několik obecných pravidel, které je doporučeno dodržovat při návrhu lepených spojů. Jedním z nich je způsob zatížení. Lepené spoje dokážou bez problému přenést zatížení v tahu, tlaku, krutu a smyku. Naopak, jakékoliv namáhání vedoucí k odlupu nebo štěpení je pro lepidlo velmi nevhodné, protože v místě působící síly vzniká na relativně malé ploše vysoké tahové namáhání.



Obr. 1 Způsoby vhodného a nevhodného zatížení

Při návrhu lepeného spoje je potřeba správně určit jednak velikost lepené plochy, ale také tloušťku lepidla. Velikost lepené plochy se v návrhové fázi většinou určuje na základě zkušeností nebo se provádí zjednodušený analytický výpočet např. metodou výpočtu jmenovitého napětí. Funkčnost celé konstrukce je následně nutné ověřit v rámci procesu jejího prokazování. Tloušťku lepidla je vhodné volit na základě informací uvedených v technickém datovém listu lepidla. Obecně platí, že pevnost strukturálních lepidel je velmi ovlivněná tloušťkou lepidla. Ideální tloušťka lepidla se v tomto případě pohybuje řádově v desetinách milimetru a při jejím zvětšení velmi výrazně klesá pevnost lepeného spoje. Naopak, u elastických lepidel není vliv tloušťky lepidla na pevnost spoje tak výrazný a tloušťku lepidla lze volit od cca 3 až po desítky milimetrů (např. u lepení kompozitních čel na hrubou stavbu).

Již při návrhu lepeného spoje je potřeba přemýšlet o způsobu aplikace lepidla. Zatímco u strukturálních lepidel není problém aplikovat lepidlo celoplošně i na větší plochy, tak u elastických lepidel se doporučuje aplikovat lepidlo pomocí housenek. Bohužel praxe ukazuje, že toto doporučení není vždy dodržováno. V případě nevhodné aplikace může dojít k situaci, že uvnitř lepidla vzniknou vlivem jeho relativně vysoké viskozity vzduchové kapsy, což jsou místa, kde může vzniknout koroze a začít docházet k postupné ztrátě adheze lepidla. Další komplikací při lepení velkých ploch je nutnost použití urychlovače. Většina elastických lepidel používaných v kolejovém průmyslu vytvrzuje pomocí vzdušné vlhkosti, která se vlivem velké plochy lepeného spoje obtížně dostává do částí lepidla dále od okraje.



Obr. 2 Příklad vady lepeného spoje

Součástí konstrukčních prací je také zařídění lepeného spoje do tzv. třídy bezpečnosti. Zařídění provádí odpovědný konstruktér ve spolupráci s odpovědným dozorem lepení. Podle normy DIN 6701, resp. normy prEN 17460, se jedná o:

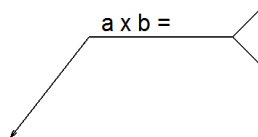
- třídu A1, do které se zařazují lepené spoje kolejových vozidel s vysokými požadavky na bezpečnost,
- třídu A2, do které se zařazují lepené spoje kolejových vozidel se středními požadavky na bezpečnost,
- třídu A3, do které se zařazují lepené spoje kolejových vozidel s nízkými požadavky na bezpečnost,
- třídu Z, do které se zařazují lepené spoje kolejových vozidel bez požadavků na bezpečnost.

Ve výše uvedených normativních dokumentech není uvedeno, jaké konkrétní komponenty kolejových vozidel spadají do příslušné třídy bezpečnosti. Vždy je tedy potřeba individuálně posoudit všechny možné důsledky selhání lepeného spoje a provést zařídění. Proto se může stát, že stejný komponent použitý na více místech vozu může být zařazený do různých tříd bezpečnosti. Zařídění spojů je potřeba provádět s rozmyslem a zbytečně nevyužívat vyšší třídy bezpečnosti tam, kde to není nutné. S vyššími třídami bezpečnosti rostou i požadavky na certifikaci podniků, kvalifikaci personálu, výrobní zkoušky, ale také požadavky na případné výpočty lepených spojů. Pokud je potřeba z nějakého důvodu třídu bezpečnosti (a tím i nároky na lepený spoj) snížit, lze využít tzv. hybridního spoje, tedy technologii lepení doplnit jinou technologií spojování (např. šroubováním nebo nýťováním).

2.3 Dokumentace lepených spojů

Stejně jako v případě svařování, je i při procesu lepení potřeba vytvořit příslušnou dokumentaci. Jedná se např. o již zmíněný seznam požadavků, tj. dokument odůvodňující zařídění lepených spojů do tříd bezpečnosti, dále výpočtové zprávy, pracovní postupy, plány zkoušek, protokoly lepení (informace o teplotě, vlhkosti atd.), ale také výkresovou dokumentaci.

Z výkresové dokumentace, resp. z kusovníků, musí být zřejmé druhy spojovaných materiálů a všechny komponenty lepicího systému. Vzájemné polohy jednotlivých spojovaných dílů musí být přesně definovány. Pokud se lepidlo aplikuje pomocí housenek, je nutné definovat všechny rozměry housenek včetně jejich tloušťek, případně jejich tvaru. Vykázání lepeného spoje se provádí v souladu s normou ČSN EN ISO 15785, tedy odkazovou čarou s šipkou. Na odkazové čáře musí být uvedeny rozměry lepidla a značka lepeného spoje.



Obr. 3 Vykázání lepeného spoje

Nad popisovým polem výkresu musí být uveden text informující o lepení dle příslušné normy, včetně příslušné třídy bezpečnosti a také vyhrazen prostor pro schválení odpovědným dozorem lepení.

Při návrhu lepeného spoje a při tvorbě výkresové dokumentace je potřeba myslet také na tolerance. V praxi je prakticky nemožné dodržet teoretické rozměry housenek. Proto je potřeba při aplikaci lepidla být „na bezpečné straně“.

3 PROKAZOVÁNÍ KONSTRUKCE

U každé konstrukce lepeného spoje (zejména je-li zařazena do třídy bezpečnosti A1 nebo A2) se musí prokázat, že je z hlediska provozu bezpečná. Podle normy DIN 6701 a prEN 17460 to lze provést následujícími způsoby:

- výpočtem prokazujícím, že namáhání je menší než zatížitelnost,
- zkouškou konstrukčního celku,
- prokazatelnými zkušenostmi,
- kombinací výše uvedených možností.

V současnosti nejpoužívanějším způsobem prokázání konstrukce je výpočet. Podle charakteru výpočtu je nutno zvolit koeficient minimální bezpečnosti spoje, který určuje odstup mezi dovoleným namáháním a přípustnou zatížitelností. S ohledem na rozsah této problematiky je tomuto způsobu věnována následující samostatná kapitola.

Zkouška konstrukčního celku je asi nejspolehlivější způsob prokázání konstrukce. Při této zkoušce je potřeba podrobit reálnou konstrukci (nebo její část) relevantním zatížením vč. jejich kombinací podle příslušných norem a předpisů (statika, dynamika, aerodynamické účinky, zvedání atd.) a ověřit tak její únosnost. Dále je nutné při zkoušce zohlednit proces stárnutí lepidla, tedy skutečnost, že se jeho charakteristické vlastnosti v průběhu času mění. To je v praxi poměrně komplikované, proto se tato metoda velmi často používá v kombinaci např. s výpočty lepených spojů.

Princip prokázání konstrukce formou prokazatelných zkušeností je založen na porovnání relevantních parametrů posuzované konstrukce s jinou, léty ověřenou, konstrukcí. Při porovnání musí být prokázána shoda např. provozních podmínek, zatěžujících stavů, legislativních dokumentů, spojovaných materiálů atd. S ohledem na různorodost kolejových vozidel a provozních podmínek se tento způsob ověřování v praxi příliš nevyužívá.

4 VÝPOČTY LEPENÝCH SPOJŮ

Smyslem výpočtu a následného vyhodnocení lepených spojů v rámci procesu prokazování konstrukce je prokázání, že namáhání je menší než dovolená zatížitelnost, tedy porovnat vypočtené napětí v lepidle s hodnotou dovolenou.

4.1 Výpočet namáhání

Při výpočtu namáhání je potřeba nejdříve stanovit zatížení působící na lepený spoj. Jedná se např. o požadavky plynoucí z normativních dokumentů (příslušné směrnice TSI, normy EN 12663 atd.), teplotní účinky, silové účinky (provozní, výjimečné, aerodynamické atd.), požadavky zákazníka nad rámec normativních dokumentů a další. Na základě jednotlivých zatížení se vytvoří kombinace zatížení (výpočtové stavy), se kterými se následně provede výpočet.

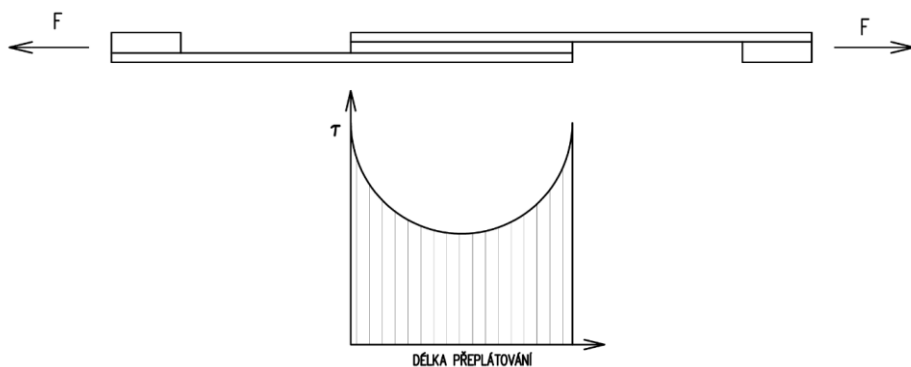
Výpočty lepených spojů jsou poměrně komplikovanou disciplínou. Je to dáno tím, že lepidla (zejména elastická) se chovají silně nelineárně (neplatí pro ně Hookův zákon) a mají anizotropní chování (jsou závislé na směru zatěžování). Z toho důvodu je i skutečný průběh napětí v lepené spáře nelineární. Největším úskalím při výpočtech lepených spojů je dostupnost relevantních vstupních podkladů. V tomto ohledu jsou zhotovitelé výpočtu obvykle odkázáni na podklady získané

od výrobců lepidel, protože provedení zkoušek a zjištění některých charakteristických hodnot lepidel jsou většinou finančně a časově náročné.

Výpočty lepených spojů lze obecně rozdělit do dvou základních skupin – analytické a numerické metody výpočtu.

Jednou ze základních analytických metod je metoda výpočtu jmenovitého napětí. Ta spočívá ve výpočtu normálových a smykových napětí působících v lepeném spoji a následným výpočtem redukovaného napětí. A právě výpočet redukovaného napětí je v případě lepených spojů poměrně komplikovaný, protože v současné době existuje relativně málo ověřených hypotéz, pomocí kterých by bylo možné tento výpočet provést. Jednou z hypotéz používanou při výpočtu redukovaného napětí elastických lepidel je metoda podle Raghava. Tato metoda zohledňuje mimo vypočteného normálové a smykového napětí také poměr napětí v tlaku a tahu v místě, při němž se lepidlo stává zřetelně nelineárním. Tato metoda se ve zjednodušené podobě, kdy normálová a smyková napětí jsou vypočtena na základě Hookova zákona, může použít při orientačním dimenzování lepené plochy.

Napětí v lepeném spoji lze stanovit také pomocí analytických modelů. Příkladem může být hypotéza podle Volkersena. Tato hypotéza uvažuje pouze smykové namáhání lepidla a neuvažuje ohybový moment, který vzniká v důsledku excentrického zatížení. Dále je to hypotéza podle Gollanda a Reissnera. Tato hypotéza, oproti hypotéze podle Volkersena, uvažuje navíc také normálové namáhání vlivem excentrického zatížení posouvajících sil. Velkým omezením obou těchto hypotéz je oblast použití, protože jsou odvozeny pro jednoduché přelátované lepené spoje. Pro tvarově obecné lepené spoje lze využít hypotézu Bigwood a Crocombe, což je v podstatě zobecněná hypotéza podle Gollanda a Reissnera.



Obr. 4 Rozložení smykového napětí přelátovaného lepeného spoje dle Volkersena

Mezi nejpoužívanější numerickou metodu patří jednoznačně metoda konečných prvků (dále jen MKP). Postup výpočtu lepených spojů touto metodou se příliš neliší od jiných výpočtů MKP. Při vytváření sítě konečných prvků se doporučuje v místech, kde lze očekávat napěťové špičky, vytvořit síť s větší koncentrací prvků. S ohledem na vlastnosti lepidel se doporučuje provést výpočet nelineární metodou. V praxi to není vždy možné, z důvodu dostupných podkladů k lepidlům.

Při výpočtech lepených spojů je potřeba vnímat nejen problematiku výpočtu napětí, ale také možné deformace od zatížení a teplotních účinků, které nesmí být větší než deformace dovolené. Např. u elastických lepidel je hodnota prodloužení při přetržení řádově ve stovkách procent, zatímco velikost dovolené deformace pro statické nebo dynamické zatížení může být řádově v desítkách procent.

4.2 Výpočet zatížitelnosti

Každou vypočtenou hodnotu namáhání je potřeba porovnat s dovolenou hodnotou – tzv. zatížitelností. Vzhledem k tomu, že charakteristické vlastnosti lepených spojů jsou silně závislé na okolních podmínkách jako je např. teplota, způsob zatížení, okolní prostředí atd., tak hodnota

zatížitelnosti pro jednotlivé kombinace zatížení může být rozdílná. Hodnotu zatížitelnosti lepených spojů lze vypočítat podle následujícího vzorce:

$$\sigma_{dov} = \sigma_{char} \cdot \prod f \quad (1)$$

kde σ_{char} je charakteristická hodnota pevnosti lepidla a $\prod f$ je součin redukčních faktorů.

Pevnost lepidla při přetržení bývá uvedena v technickém datovém listu lepidla (TDS). Použití této hodnoty v rámci stanovení zatížitelnosti by ale nebylo správné, protože tato hodnota nereflektuje vliv výroby. Proto se při stanovení zatížitelnosti pracuje s tzv. charakteristickou hodnotou pevnosti lepidla, což je hodnota, která zohledňuje vliv výroby, pravděpodobnost poruchy, úroveň důvěry a počet zkušebních vzorků. V praxi se postupuje tak, že se v podniku, kde se budou zhotovovat lepené spoje, vytvoří sada zkušebních vzorků. Tyto vzorky se následně podrobí např. smykové zkoušce tahem. Z takto naměřených hodnot se vypočte průměrná hodnota pevnosti lepidla, která se následně zredukuje koeficientem zahrnujícím třídu bezpečnosti spoje a počtem naměřených vzorků. Podrobný popis stanovení charakteristické hodnoty je uvedený v normě DIN 6701-3 a prEN 17460.

Pevnost lepidla silně ovlivňují vnější vlivy jako např. teplota, dlouhodobé statické zatížení, dynamické zatížení, stárnutí atd. Všechny tyto vlivy se zohledňují tzv. redukčními faktory f . Získání relevantních hodnot redukčních faktorů je poměrně komplikované a věrohodně je lze získat dlouhodobými zkouškami, což je z pohledu ceny a času obtížně dosažitelné. Proto se v tomto případě zhotovitelé výpočtu spoléhají na výrobce lepidel. V rámci validace lepených spojů se provádějí také tzv. zkoušky stárnutí. Provedení těchto zkoušek je uvedeno v některých normativních dokumentech.

4.3 Výpočet bezpečnosti

Po výpočtu namáhání a zatížitelnosti lepeného spoje je možné vypočítat bezpečnost konstrukce. To lze provést např. podle následujícího vzorce.

$$K = \frac{\sigma_{dov}}{\sigma_{max} \cdot S} \quad (2)$$

kde σ_{max} je maximální vypočtené napětí jednou z metod, σ_{dov} je hodnota zatížitelnosti a S je tzv. faktor bezpečnosti.

Jak je výše uvedeno, výpočet lepených spojů může být proveden mnoha způsoby a každý z nich má svá specifika (zjednodušení, míru přesnosti atd.). A právě tato specifika zohledňuje hodnota faktoru bezpečnosti S .



Obr. 5 Výsledky výpočtu lepených spojů

5 ZÁVĚR

Příspěvek pojednává o lepených spojích, které se postupem času staly běžně používanou technologií spojování v konstrukcích kolejových vozidel.

S ohledem na rozsah problematiky návrhu a konstrukce lepeného spoje jsou v první části příspěvku analyzována pouze stěžejní témata jako např. volba lepicího systému, obecné zásady konstrukce lepených spojů a požadavky na výkresovou dokumentaci.

Druhá část příspěvku se podrobněji zabývá otázkou možných způsobů prokazování (validace) lepených spojů a zaměřuje se na výpočty.



Literatura

- [1] DIN 6701-1. *Kleben von Schienenfahrzeugen und – fahrzeugteilen Teil 1: Grundbegriffe, Grundregeln*. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2005.
- [2] DIN 6701-2. *Kleben von Schienenfahrzeugen und – fahrzeugteilen Teil 2: Qualifikation der Anwenderbetriebe, Qualitätssicherung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2015.
- [3] DIN 6701-3. *Kleben von Schienenfahrzeugen und – fahrzeugteilen Teil 3: Leitfaden zur Konstruktion und Nachweisführung von Klebverbindungen im Schienenfahrzeugbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2015.
- [4] DIN 6701-4. *Kleben von Schienenfahrzeugen und – fahrzeugteilen Teil 4: Ausführungsregeln und Qualitätssicherung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2015.
- [5] prEN 17460. *Railway applications – Adhesive bonding of rail vehicles and parts*. Brussels: European committee for standardization, 2019.
- [6] ČSN EN 12663-1+A1. *Železniční aplikace – Pevnostní požadavky na konstrukce skříní kolejových vozidel – Část 1: Lokomotivy a vozidla osobní dopravy (a alternativní metoda pro nákladní vozy)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [7] ČSN EN 12663-2. *Železniční aplikace – Pevnostní požadavky na konstrukce skříní kolejových vozidel – Část 2: Nákladní vozy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.