

UMÍSTĚNÍ SVARU A JEHO VLIV NA KONCENTRACI NAPĚTÍ

THE POSITION OF A WELD AND ITS INFLUENCE ON MECHANICAL STRESS CONCENTRATION

Petr Jilek^{1,*}, Jan Berg²

Abstrakt Příspěvek se zabývá umístěním svarů rámu a jejich vlivem na pevnost konstrukce. U konstrukce rámu je nutné brát zřetel na minimalizaci hmotnosti při zachování jeho dostatečné pevnosti a únosnosti. Za tímto účelem byl vytvořen 3D model rámu, který odpovídá reálnému provedení rámu, a tento model byl podroben analýze metodou konečných prvků (MKP). Na základě této analýzy byly vytipovány oblasti s koncentrací napětí. Požadavkem je, aby pokud možno se směr svarů co nejméně vyskytoval v oblastech vysokého mechanického napětí. Díky vhodnému uspořádání svarů může dojít ke snížení hmotnosti rámu díky použití profilů s nižší tloušťkou stěny při zachování požadované pevnosti. Návrhem vhodného směru svarů a kontrolních zkoušek mohl být zvýšen součinitel hodnoty svarového spoje v dané oblasti a tím i maximální dovolené namáhání.

Klíčová slova optimalizace rozložení svaru, součinitel hodnoty svarového spoje, svařenec, metoda konečných prvků (MKP), koncentrace mechanického napětí

Summary The paper deals with the appropriate positioning of the welds of the frame and their influence on the strength of the structure. In the frame design, it is considered to minimize the weight while maintaining its strength and load capacity. For this purpose, a 3D model of the frame corresponding to the actual frame was created and this model was subjected to Finite Element Analysis (FEA). Based on this analysis, areas with stress concentrations have been identified in which it is desirable to change the direction of the welds in order to minimize the occurrence in areas of high mechanical stress. Due to these modifications, the weight of the frame could be reduced by using profiles with lower wall thickness while maintaining the required strength. The design of the appropriate direction of welds and inspection tests could increase the weld joint factor in the given area and thus the maximum allowable stress.

Keywords weldment, Finite Element Method (FEM), mechanical stress concentration, optimization, weld joint factor

1 ÚVOD

Příspěvek se zabývá optimalizací rámu z hlediska umístění svarů a stanovení hodnoty maximálního dovoleného napětí. Každý přidaný materiál na zařízení způsobuje nárůst jeho hmotnosti. Tento přírůstek hmotnosti je nežádoucí, a to zejména při provozování dopravních prostředků. V příspěvku je řešena problematika pomocného rámu, který se dodatečně montuje k automobilu. Účelem tohoto rámu je umožnit snížení adhezní síly přenášené mezi koly vozidla a vozovkou. Pro zajištění co největší autenticity chování vozidla s namontovaným rámem a minimalizaci vlivu hmotnosti rámu na ovládání vozidla je

¹ Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Výukové a výzkumné centrum v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika

² Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika

*korespondenční autor, tel.: +420 466 038510, e-mail: petr.jilek@upce.cz

potřeba zajistit, aby tento rám měl co nejnižší hmotnost při zachování požadované pevnosti. Z tohoto důvodu jsou kladeny vysoké požadavky na konstrukční zpracování rámu, které může zajistit co nejpříznivější poměr mezi pevností rámu a jeho hmotností. Při řešení optimalizace rámu není tento uvažován jako jeden celek, ale jako jednotlivé profily, které jsou navzájem svařeny. Tyto svařky jsou nehomogenními přechody mezi jednotlivými díly a tvoří vruby, které nepříznivě ovlivňují pevnost konstrukce (Kurtuluş a Doğan, 2021). Díky určení oblastí koncentrace napětí je tedy možné navrhnout směr vedení svarů tak, aby co nejméně zasahovaly do těchto oblastí, tím byla svařky co nejméně ovlivněna pevnost konstrukce a v co nejvyšší možné míře snížena její hmotnost.

2 VSTUPNÍ A REFERENČNÍ PARAMETRY

Pro účely provedení analýzy pevnosti pomocí metody konečných prvků (MKP) a následné vyhodnocení pevnosti rámu z hlediska maximálního dovoleného napětí bylo nezbytné stanovit vstupní parametry materiálu, ze kterého je rám vyroben. Jedná se o konstrukční nelegovanou ocel S235JR, jejíž parametry jsou uvedeny v tabulce č. 1 (Vojtěch, 2010).

Aby bylo možné vyhodnotit pevnost rámu, bylo nutné definovat limitní napětí, jehož hodnota bude představovat maximální přijatelnou hodnotu napětí, které je pro rám bezpečné. Pro jeho stanovení byla použita norma ČSN 69 0010. Jedná se o normu stanovující maximální dovolené napětí poměrně konzervativně, jelikož se zabývá primárně tlakovými nádobami. V našem případě je její použití díky její konzervativnosti vhodné, jelikož při stanovování zatížení rámu byly zanedbány dynamické účinky během jízdy a také vytvořený 3D model zahrnuje určitá zjednodušení. Maximální dovolené napětí je dle této normy stanoveno jako:

$$\sigma_{DOV} = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_T}; \frac{R_m}{n_B} \right\} \cdot \varphi \quad [MPa] \quad (1)$$

Následuje tabulka č. 1 vysvětlující a definující zmíněné veličiny a parametry:

Tab. 1 Parametry použité konstrukční oceli S235JR (ČSN 69 0010)

Parametr	Označení	Jednotka	Hodnota
Hustota	ρ	kg·m ⁻³	7 850
Tažnost	A	%	26
Youngův modul pružnosti v tahu	E	MPa	210 000
Poissonovo číslo	μ	—	0,3
Maximální dovolené napětí	σ_{DOV}	MPa	
Opravný součinitel k dovolenému namáhání	τ	—	1
Mez kluzu	$R_{p0,2}$	MPa	235
Mez pevnosti	R_m	MPa	360
Součinitel bezpečnosti k mezi kluzu	n_T	—	1,5
Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti	n_B	—	2,4
Součinitel hodnoty svarového spoje	φ	—	0,7

Z výpočtu maximálního dovoleného napětí dle vztahu (1) vychází, že maximální napětí v materiálu rámu nesmí přesáhnout hodnotu 105 MPa.

Tento příspěvek se zabývá, jak pomocí návrhu vhodného směru vedení svarů a kontroly svarů lze hodnotu φ zvýšit a tím i hodnotu maximálního dovoleného napětí.

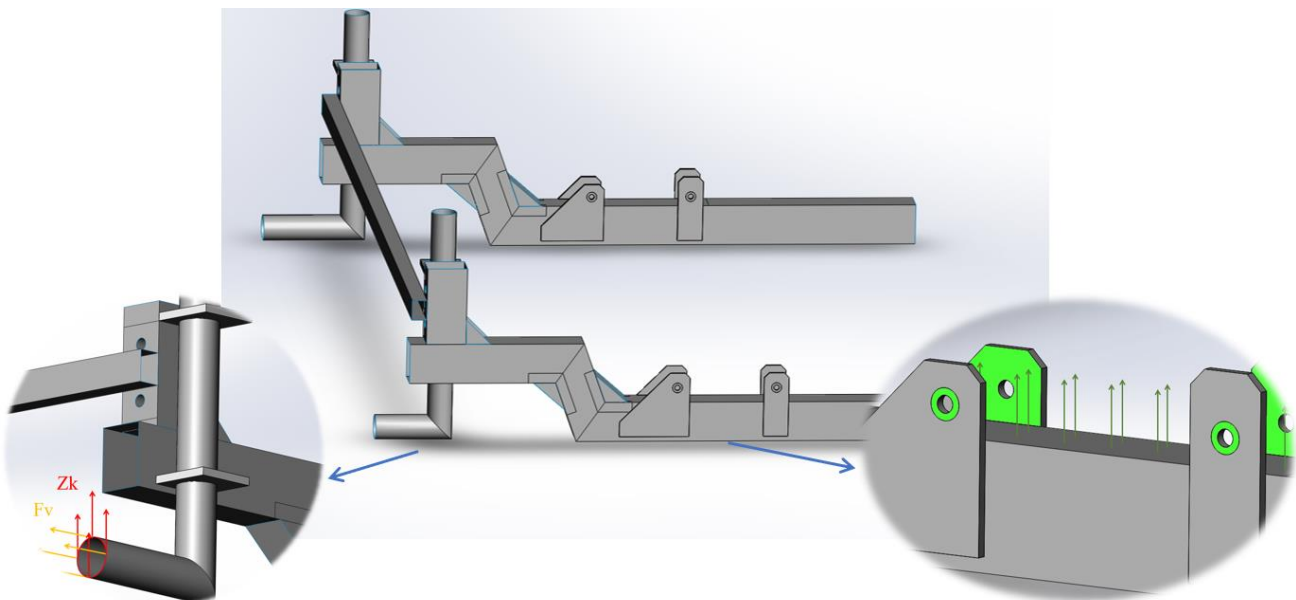
3 TROJROZMĚRNÝ MODEL RÁMU A ANALÝZA METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

Tvorba 3D modelu, zasítování a analýza metodou konečných prvků (Brdečko) byly provedeny v programu SolidWorks 2014. Bylo možné modelovat pouze polovinu rámu, protože rám je symetrický podle podélné středové roviny. V místech průniku profilů se středovou dělicí rovinou byla použita podmínka symetrie, která znamená nulové normálové posuvy do této roviny a rotace v této rovině (Kurowski, 2014 and Caban, 2021, and Brožovský et al., 2012). Jednotlivé profily byly modelovány jako skořepinové prvky s definovanou tloušťkou materiálu, pouze úchyty a svěrné spoje bylo vzhledem k výpočtu a charakteru uchycení vhodnější modelovat jako objemové. Hlavní část příčníků, kterou se tento příspěvek zabývá, je tvořena jekly obdélníkového průřezu 80 mm x 60 mm o tloušťce stěny 4 mm.

3.1 Definice okrajových podmínek

Když je rám připevněn na experimentální vozidlo, tak horní část příčníků v místě přivařených úchyťů, dosedá na rám experimentálního vozidla a rám je zafixován pomocí šroubových spojů s podložkami přes úchyty. Uchycení rámu je znázorněno pomocí zelených šipek na obrázku č. 1. Charakter uchycení byl na horní straně profilů mezi úchyty zvolen zakázáním posuvů ve svislém směru, což charakterizuje pevné dosednutí na rám experimentálního automobilu. Uchycení na úchytech bylo realizováno jako fixní, na jedné straně v místech podložky šroubu a na straně druhé po celé ploše úchyty, kde dosedá na rám experimentálního automobilu, což odpovídá podmínkám dotažení šroubů.

Zatížení rámu vychází ze zatížení kolových jednotek, které nesou část hmotnosti automobilu a jsou volně otočné okolo svislé osy. Bylo aplikováno na konce zahnutých trubek uchycených ve svěrných spojích na koncích příčníků, které reprezentují kolové jednotky včetně jejich závleku. Toto zatížení má dvě složky – svislé (radiální reakce) a vodorovné (valivý odpor). Svislé zatížení, které má největší vliv na namáhání rámu, bylo zjištěno pomocí analytických výpočtů a simulací v programu MSC Adams, kde byly kromě nadlehčení automobilu uvažovány také dynamické účinky při jízdě do zatáčky.



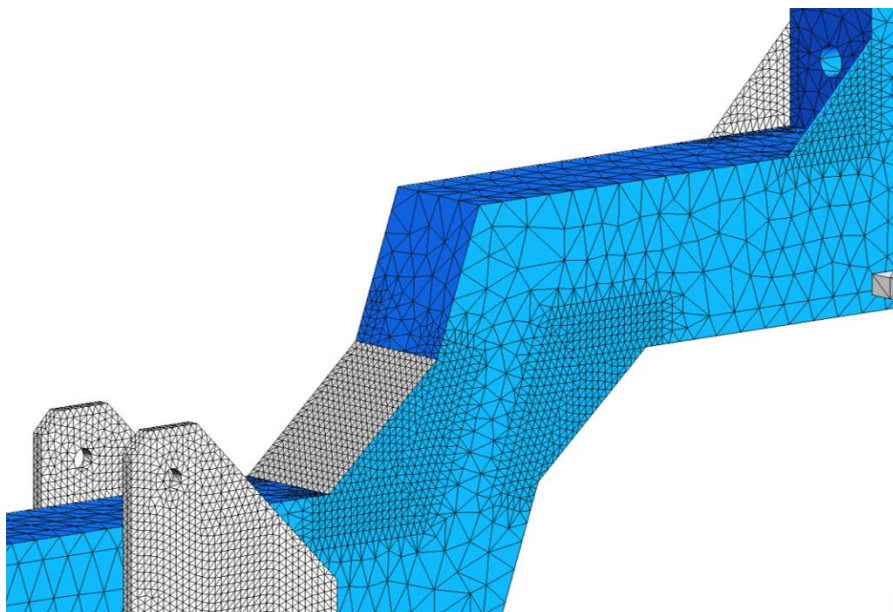
Obr. 1 Trojrozměrný model rámu; aplikace uchycení a zatížení; zdroj: autoři

Nejvyšší zatížení bylo zjištěno při vytočení kolových jednotek ven od automobilu při 100% nadlehčení automobilu. Průjezd zatáčkou a výpočet radiálních reakcí na sklopné plošině nebylo možné pro 100% nadlehčení realizovat, protože na kolech hnací nápravy v tomto případě není žádná adheze, která by umožňovala změnu rychlosti nebo směru automobilu.

Na obrázku č. 1 je znázorněno uchycení rámu (zelené šipky a oblasti), radiální reakce (červené šipky) a valivý odpor (oranžové šipky) a to jako vstupní hodnoty pro realizaci simulace zatížení a analýzu rozložení napětí.

3.2 Tvorba sítě 3D modelu

Následně jsme vytvořili síť celého modelu, aby bylo možné provést analýzu napětí pomocí metody konečných prvků (Akin, 2019 and Dižo et al., 2021 and Meng et al., 2016). Velikost elementů sítě (Napierała, 2019 and Planchard 2014) byla optimalizována pro co nejpřesnější výsledky při přijatelné době výpočtu a výpočetní náročnosti (Shigley et al., 2010). Střídatavě jsme nastavovali stále nižší velikost elementu sítě a prováděli lineární pevnostní studii a sledovali, jak se změní napětí rámu po zmenšení elementů sítě. Takto jsme došli k vhodné velikosti elementu sítě 15 mm a vytipovali oblasti, kde dochází ke koncentraci napětí. V těchto místech jsme lokálně zjemnili síť až na velikost elementu 4 mm pro přesnější výsledky analýzy. Obrázek č. 2 znázorňuje oblasti koncentrace napětí, kde došlo ke zjemnění sítě a které byly také předmětem dalšího zkoumání, neboť se v nich nachází zkoumané svary.



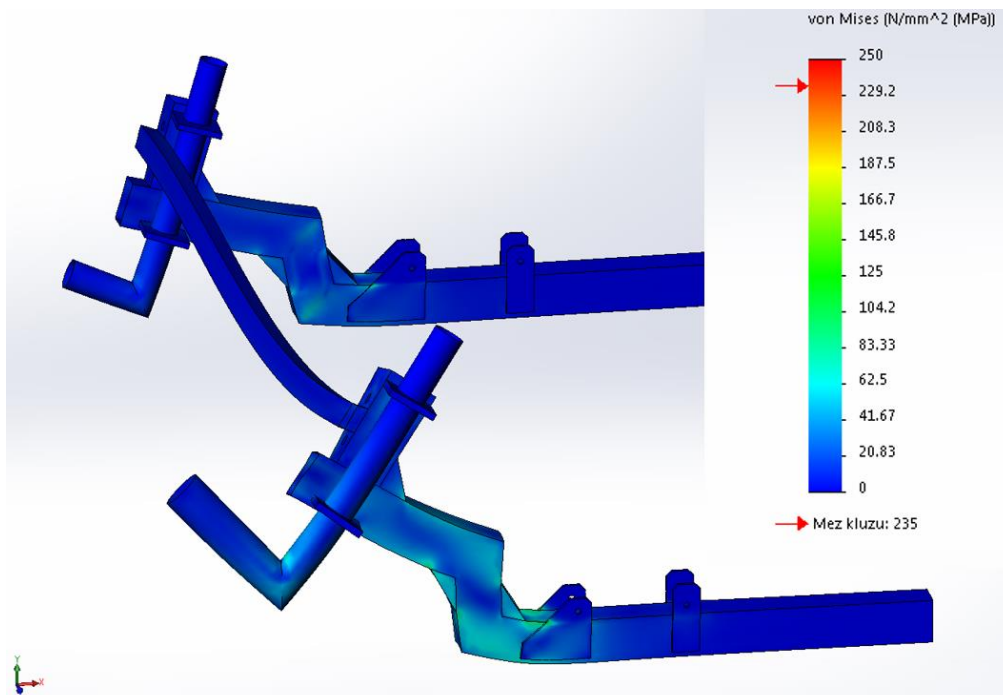
Obr. 2 Detail sítě 3D modelu s oblastmi se zjemněnou sítí; zdroj: autoři

3.3 Napět'ově-deformační studie

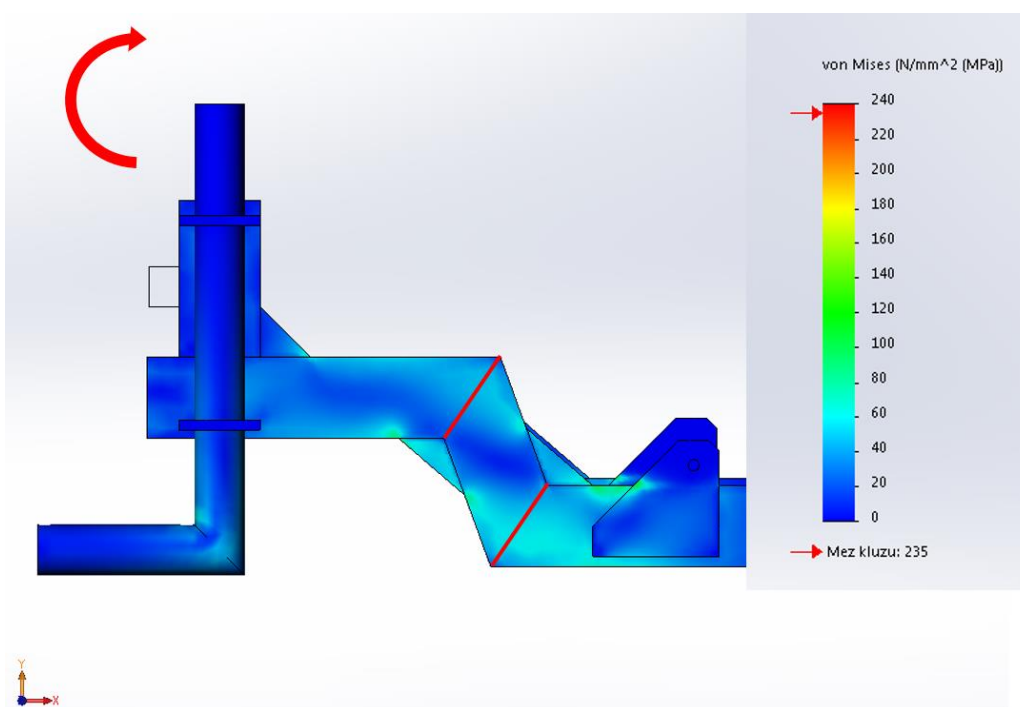
Pro vyhodnocení mechanického napětí a způsobu deformace rámu jsme provedli několik pevnostních studií (Narayan, 2021, and Pagáč, 2014, and Zienkiewicz et al., 2020). Lineární pevnostní studie byly provedeny pro různé polohy pomocných kol a jako nejméně příznivá se jevila poloha kol vytočených ven od automobilu. Tato situace by mohla nastat například při jízdě smykem zatáčkou a stala se předmětem dalšího zkoumání. Pro polohu pomocných kol směrem ven od automobilu byly dále provedeny přesnější nelineární pevnostní studie.

V tomto příspěvku budou uvedeny výsledky GMNA pevnostní studie (Zhang et al., 2014), která je materiálově i geometricky nelineární. Nelineární řešení je přesnější než lineární, ale je výpočetně náročnější. Opouští chování materiálu pouze v rámci Hookova zákona, kdy je deformace přímo úměrná napětí, a uvažuje tuhnutí, popř. měknutí konstrukce vlivem deformace. Toto je umožněno použitím iterativního řešiče, který přidává zatížení v jednotlivých krocích a současně aktualizuje tuhost konstrukce. V nelineární studii je také po překročení meze kluzu uvažována plasticita materiálu, což může mít velký vliv na tuhost konstrukce, pokud dojde k vytvoření plastického kloubu (Walport et al., 2021).

Výsledkem GMNA analýzy po aplikaci nejméně příznivého zatížení na pomocná kola vytočená ven od automobilu je znázornění nejvíce namáhaných oblastí rámu. Obrázek č. 3 znázorňuje napětí působící v rámu a je naznačen způsob deformování rámu (pro názornost ve zvětšeném měřítku).



Obr. 3 Napětí a deformace rámu (ve zvětšeném měřítku); zdroj: autoři



Obr. 4 Znázornění polohy svarů mezi profily a způsobu deformace rámu při zatížení; zdroj: autoři

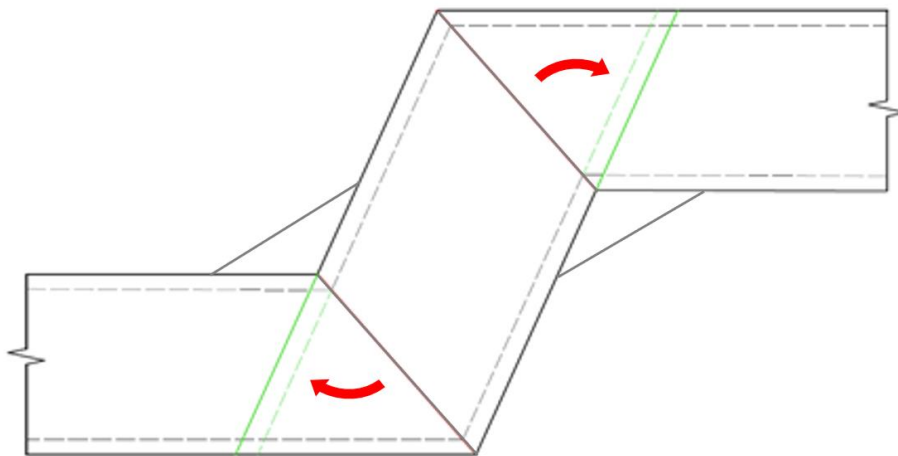
Jak je z obrázku č. 3 patrné, v rámu nedochází k překročení maximálního dovoleného napětí 105 MPa. Nicméně bylo vhodné zaměřit pozornost do oblasti, kde se koncentruje mechanické napětí. Jedná se o oblast mezi spodním, spojovacím a horním profilem rámu. V této oblasti se rovněž nacházejí svary, které jednotlivé profily spojují.

Obrázek č. 4 znázorňuje kritickou oblast rámu, kde dochází k nejintenzivnějším deformacím a ke koncentracím napětí. Jsou zde znázorněny svary spojující jednotlivé profily, které touto oblastí prochází, a charakter deformace dané oblasti.

4 NÁVRH OPTIMALIZACE POLOHY SVARŮ A JEJICH KONTROL

Přestože se pevnost přídavného materiálu svaru volí obvykle vyšší, než je pevnost základního materiálu, ovlivňují svary negativně pevnost celé konstrukce. Tvoří nehomogenitu v konstrukci a v důsledku procesu svařování, kdy je do konstrukce lokálně vneseno velké množství tepla, dochází v materiálu k tepelným pnutím. Svar je tedy možné vnímat jako vrub, který negativně ovlivňuje pevnost a únavovou odolnost dané konstrukce (Gill a Singh, 2012).

Svary profilů zkoumaného rámu byly provedeny jako „V“ svary, aby bylo dosaženo co nejvyšší pevnosti svarového spoje. Profily byly svařovány jednostranně netavicí se wolframovou elektrodou s příměsí ceru v ochranné atmosféře inertního plynu metodou TIG.



Obr. 5 Navržený směr svarů profilů příčníků; zdroj: autoři

Za účelem zvýšení pevnosti rámu a zlepšení únavových vlastností jsme navrhli směr svarů mezi profily příčníků ve směru podélné osy prostředního členu, jak ukazuje obrázek č. 5. Z horní a spodní strany prostředního členu by byly dále navařeny záslepky svarem typu „V“ z plechu stejné tloušťky (4 mm), které by vyztužily profil prostředního členu příčniku proti zborcení.

4.1 Přínosy navrženého řešení

Nově navržené směry svarů jsou odlišné od směru koncentrace napětí. Svary začínají na stejné hraně jako původní, ale pokračují ve směru podélné osy prostředního členu příčniku, díky čemuž většina délky těchto svarů leží v oblastech s nižším mechanickým napětím.

Dle normy ČSN 69 0010 je pro jednostranné tupé svary svařované metodou TIG v ochranné atmosféře možné použít součinitel hodnoty svarového spoje 0,7. Nicméně při navržení vhodné nedestructivní kontroly svaru lze tento součinitel zvýšit až na hodnotu 0,95. Metodu nedestructivní kontroly svarů je nutné volit s ohledem na použitou technologii svařování, základní a přídavný materiál, typ spoje a konstrukční uspořádání. Dle normy ČSN EN ISO 17635, která se zabývá nedestructivním zkoušením svarů, je vhodné pro feritické materiály použít kombinaci vizuální a buď magnetické práškové, nebo kapilární metody pro zjišťování povrchových vad svarů. Pro kontrolu vnitřních vad materiálu pro feritický materiál o tloušťce nižší nebo rovné 8 mm se doporučuje užít radiografickou metodu.

V tomto případě při zvýšení součinitele svarového spoje na 0,95 by mohlo maximální dovolené napětí v materiálu v této oblasti vzrůst ze 105 až na 142,5 MPa, tj. o 35,7 %. Norma, podle které jsme posuzovali pevnost zkoumaného rámu, se zabývá primárně tlakovými nádobami, a proto ji lze považovat za konzervativní a je možné maximální dovolené napětí v této oblasti při dodržení uvedených podmínek bezpečně zvýšit.

Díky zvýšení maximálního dovoleného napětí ve zkoumané oblasti je možné použít materiál o nižší tloušťce stěny, což má za důsledek žádané snížené hmotnosti rámu při zachování vyhovující pevnosti.

5 ZÁVĚR

U zkoumaného rámu bylo nutné stanovit co nejvýhodnější kompromis mezi jeho hmotností a pevností. Z hlediska bezpečnosti provozu je nutné zajistit, aby rám byl dostatečně tuhý a pevný a odpovídal příslušným normám, které upravují jeho pevnost. Zároveň bylo potřeba minimalizovat jeho hmotnost, aby co nejméně ovlivňoval, jako přidaná hmotnost, chování experimentálního automobilu, na kterém bude provozován.

Za tímto účelem byl vytvořen 3D model rámu a byl podroben pevnostní studii metodou konečných prvků. Na základě výsledků této analýzy byla zjištěna oblast koncentrace mechanického napětí a navržena nová vhodnější poloha svarů, které touto oblastí prochází. Svary nyní prochází oblastí nižšího napětí, což příznivě ovlivní pevnost a únavovou odolnost celé konstrukce. Rovněž po navržení kontrol těchto svarů jako kombinace vizuální a ultrazvukové nebo kapilární metody bylo možné uvažovat vyšší součinitel hodnoty svarového spoje a tím zvýšit hodnotu maximálního dovoleného napětí v této kritické oblasti až o 35,7 %. Jelikož v ostatních oblastech je napětí výrazně nižší než maximální dovolené, je možné zvážit použití profilů o nižší tloušťce stěny a tím ještě více snížit hmotnost rámu, což může být předmětem dalšího výzkumu.

Literatura

Akin, J. E. **2009**. *Finite Element Analysis Concepts via SolidWorks*. Houston, Texas: Rice University.

Brdečko, L. *Pružnost a plasticita II*. Učební text. VUT Brno.

Brožovský, J. a Materna A. **2012**. *Metoda konečných prvků ve stavební mechanice*. Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, Západočeská univerzita Plzeň.

Caban, J., Nieoczym, A., & Gardyński, L. **2021**. Strength analysis of a container semi-truck frame. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105487. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.10

Česká agentura pro standardizaci. **2018**. *ČSN EN ISO 17635 (051170): Nedestruktivní zkoušení svarů – Obecná pravidla pro kovové materiály*.

Dižo, J., Blatnický, M., Drozdziel, P., Semenov, S., Mikhailov, E., Kurtulík, J. **2021**. Strength analysis of an off-road lorry frame. *Scientific Journal of Silesian University of Technology*, 110, 23-33. ISSN: 0209-3324. doi: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.110.2>

Gill, J. a Singh, J. **2012**. Effect of welding speed and heat input rate on stress concentration factor of butt welded joint of IS 2062 E 250 A steel. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 1(3), 98-100.

Kurowski, P. **2014**. *Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2014*. SDC Publications.

Kurtulmuş, M., Doğan, E. **2021**. The effects of undercut geometry on the static stress concentration factor of welds, *Emerging Materials Research*, 10(3), 272-277.

- Meng, X., Qin, G., Bai, X. a Zou, Z. **2016**. Numerical analysis of undercut defect mechanism in high speed gas tungsten arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 236. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2016.05.020](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.05.020)
- Napierała, R. **2019**. Numerical-experimental static analysis of the effort of the crossbar-longeron in the semi-trailer frame. *AIP Conference Proceedings 2078*.
- Narayan, Pathak, K.K. **2022**. Numerical Analysis of Multilevel Eccentric Chevron Braced Frame for Improved Inelastic Behavior. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 27.
- Pagáč, M. **2014**. *Pevnostní analýza svařované konstrukce*. <http://www.mujsolidworks.cz> <http://www.mujsolidworks.cz/pevnostni-analyza-svarovane-konstrukce-2/> [cit. 2021-10-08].
- Planchard, D.C. **2014**. *SolidWorks 2015 Reference Guide*. SDC Publications.
- Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G. a Vlk, M., ed. **2010**. *Konstruování strojních součástí*. Překlady vysokoškolských učebnic. Brno: VUTIUM.
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. **2011**. *ČSN EN 1993-1-1: Navrhování ocelových konstrukcí*.
- Vojtěch, D. **2010**. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: Vydavatelství VŠCHT.
- Walport, F., Arrayago, I., Gardner, L. a Nethercot, D.A. **2021**. Influence of geometric and material nonlinearities on the behaviour and design of stainless steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 187.
- Zhang, P.M., Wang, W. a Zhang, W.C., **2014**. Finite Element Modal Analysis of a Semi-Trailer Frame. *AMM* 685, 199–203.
- Zienkiewicz, O. C. a Taylor R. L. **2000**. *The finite element method. 5th ed.* Boston: Butterworth-Heinemann.