

Name of the project: (2002-2004)

The influence of a random multiaxial nonproportional stress on the fatigue life of machine parts

Ing. HEJMAN Marek, PhD. SKODA RESEARCH, Tylova 36, Plzeň , Czech Republic

Doc. Ing. RŮŽIČKA Milan, CSc, Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Technická 4, 166 07 Prague 6, Czech Republic

Characteristic of the project

When projecting and dimensioning machine parts and structures it is necessary to take into account the damage caused by the fatigue of material. Welding is a common technology of producing individual joints. The processes of their dimensioning on an unlimited strength are derived from the traditional methods of the uniaxial fatigue evaluation. But in the areas of welded joints and their neighbourhood more complicated stresses occur very often. The application of the classical method of uniaxial fatigue to the FEM calculations' results may lead to inaccurate life assessments. The tensile and torsional tests of the fatigue properties of selected technological and structural notches on welded specimens will be realized in the Dynamic Testing Laboratory of the ŠKODA VÝZKUM s.r.o. Then the combined test of tensile and torsional stress of the proportional and nonproportional character will be performed by means of free cylinders. Residual stresses in welded joints and the change in the basic material properties in the vicinity of a welded joint affected by heat will be investigated. The aim of the grant is to join the results of partial fatigue tests of notches, FEM calculations and consequential qualified assessment of the real part damage. In order to evaluate the damaging effects of multiaxial state of stress well-known methods described in the literature will be critically tested and own methods for damage evaluation will be developed which will enlarge the fatigue processor at ČVUT. All the methodology will be demonstrated on the selected types of structural welded joints and verified by the test on real structural nodes.

Shrnutí současného stavu poznání

Bývá odhadováno [1], že pokud dojde k poruše strojních částí při běžných provozních podmínkách, potom až 90% těchto poškození je způsobeno únavou materiálu. Navíc 90% případů z tohoto počtu tvoří poruchy zaviněné nedostatečně provedeným návrhem nebo podceněním technologie výroby. Tento fakt nabývá významu zejména u svařovaných konstrukcí, kdy výpočtové zohlednění svarů zejména v numerických metodách je velmi obtížné a kdy technologické faktory mnohdy zastiňují faktory konstrukční. Proto kvalifikovaný a optimalizovaný návrh, jenž bude směřován k maximálnímu využití materiálu svařovaných konstrukcí a k predikování bezpečné doby provozu, by měl být v moderní době nezbytnou součástí každého komplexního konstrukčního návrhu. Analýza životnosti je vždy velmi obtížnou úlohou, protože musí stanovit dobu, po kterou je konstrukce (a tím i stovky dílčích strojních součástí) bezpečná. Přitom se případný nevhodný konstrukční návrh neprojeví okamžitě, ale až s odstupem času (za běžného provozu), což může způsobit nehody a ohrožení životů. V konečném důsledku to má za následek mnohonásobně vyšší výdaje na opravy, rekonstrukce a doplňkové výpočty a experimentální zkoušky, než by byly věnovány ve fázi komplexního návrhu.

Pro návrhy vozidel, jejich konstrukci i pevnostní výpočty se již i u nás běžně využívají prostředky univerzálního (obvykle komerčního) programového software (SW). Systémy metody modelování (MBS) umožňují určovat odezvu konstrukce a působící dynamické síly, programy metody konečných prvků (MKP) určují stavy přetvoření a napětí v jejich kritických uzlech pro dané zatěžovací stavy [2]. To platí i u návazných softwarových programů umožňujících např. hodnotit odolnost vůči únavovým poruchám nebo stanovovat únavový život [40] až [46]. Spolehlivost výsledků

těchto SW však závisí na použitých metodikách a na přesnosti i rozsahu dostupných materiálových dat. Metody a způsoby hodnocení nejsou v řadě těchto SW i z konkurenčních důvodů dostatečně popsány. Přehled dostupných a nejčastěji používaných komerčních SW ukazuje tab.1.

tab. 1 Srovnávací tabulka vybavenosti komerčních programových produktů

Program	SKALA	I-DEAS	COSMOS/M	SYSLIFE	MSC/FATIGUE	FATIMAS	FEMFAT
Napětí a deformace MKP	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Elasto plastická korekce	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano
Dekompozice zatížení zátěžného procesu	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano
S-N křivky	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
ϵ -N křivky	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano
Cyklické deformační křivky	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano
Metodika lokálních napětí (LESA)	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano
Metodika lokálních napětí a deformací (LPSA)	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano	Ne
Kumulace poškození	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
ASME (tlak. nádoby)	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne
Svary	Ne	Ano	Ne	Ne	Ano	Ne	Ano
Víceosá únava	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ano	Ano
Mapy poškození	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne	Ano

Je odtud zřejmé, že problematikou hodnocení svarových spojů se zabývají pouze některé SW. Obvykle se však omezují pouze na přístupy podle norem (ASME - tlakové nádoby, Eurocode 2 - stavební konstrukce). Řada dalších SW hodnotících životnost se proto rodí ve formě specializovaných SW, vytvářených ad hoc na základě nejnovějších vědeckých poznatků a umožňujících získávat firmám technologický a konkurenční náskok a nejsou proto obvykle dostupnými prostředky v komerční oblasti [4][5][6]. Navrhovatel i spolunavrhovatel se již v minulosti zabývali efektivním nasazením a využitím stávajících SW a vývojem vlastních programových postprocesorových SW pro hodnocení životnosti dílů, viz grant GAČR 101/99/1668 [56], [47]. Umožnilo to navázat na současný stav poznatků ve světě v oblasti uniaxiální a multiaxiální únavy materiálu a udržovat vlastní výzkum včetně výzkumu experimentálního na světové úrovni. K těmto záměrům má přispět i předkládaný návrh grantu, který se zaměřuje na rozšíření poznatků o chování svarových spojů v podmínkách vícesložkového namáhání

Cíl projektu a časový plán

Cílem navrhovaného projektu je vyšetření zákonitostí únavového porušování vybraných konstrukčních svarových uzlů používaných na rámech karoserií dopravních vozidel (zejména autobusů a trolejbusů) při vícesložkovém namáhání a návrh metodiky pro predikci životnosti. Za tímto účelem bude projekt řešen jak teoreticky tak i experimentálně. Cílem experimentálních prací bude zajištění věrohodných dat o vzniku a šíření únavové poruchy naměřených za definovaných podmínek na konkrétních typech svarových uzlů vystavených různým proporcionálním i neproporcionálním

kombinacím namáhání. Tyto výsledky budou sloužit jako podklad pro teoretické práce. Cílem těchto teoretických prací bude návrh, vývoj a testování metod výpočtu životnosti svarových spojů vystavených kombinovanému namáhání. Kromě vlastních experimentálních výsledků se využijí i dostupné výsledky experimentů z literatury [14][38][50][49][48] aj. Výpočtový postup bude algoritmizován a naprogramován jako samostatný modul. Rozšíří tak možnosti programu pro predikce životnosti, jehož základ který byl vytvořen v rámci výše citovaného grantu 101/99/1668.

Koncepční a metodické přístupy

Z formulace cílů je zřejmé, že se jedná o projekt orientovaný na základní výzkum, který však nalézá rychlé a aktuální průmyslové aplikace a to nejen v dopravní technice. Řešení je rozděleno na část experimentální a výpočetní.

Experimentální část:

Zkoušky budou rozděleny do čtyřech etap:

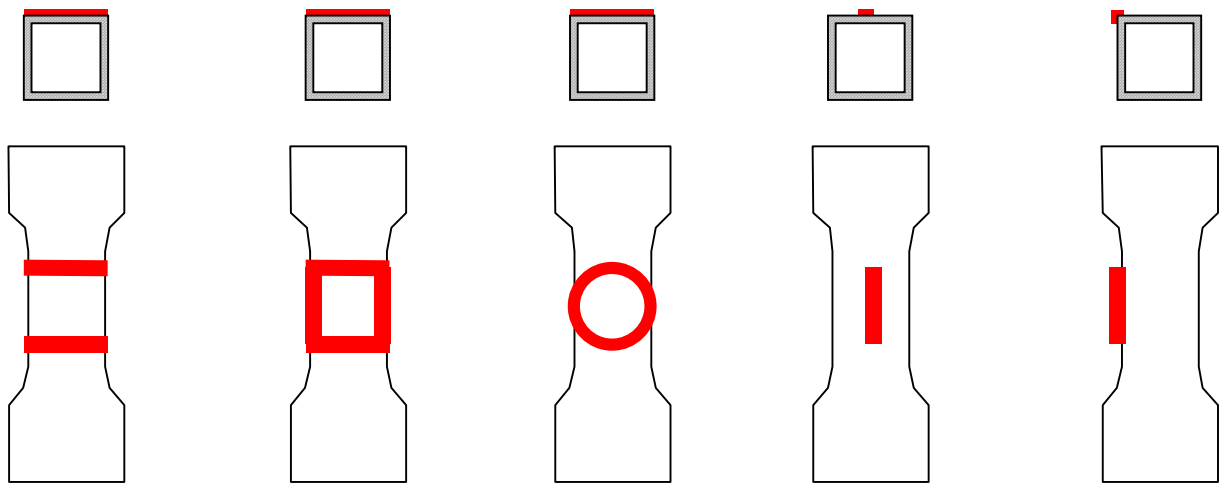
Etapa č. 1 - Stanovení únavových vlastností základního vybraného materiálu (bez vlivu svaru). Pokud pro zvolený základní materiál budou k dispozici únavové křivky v tahu a v krutu z literatury, bude tato etapa vypuštěna.

Etapa č. 2 - Stanovení únavových vlastností vybraných typů technologických vrubů. Tyto zkoušky stanovují únavové vlastnosti technologických vrubů s minimálním vlivem koncentrace napětí (konstrukčního vrubu). Při svařování bude sledována nejen technologie provedení svarů, ale i směr tvorby svaru, zápalný bod a bod ukončení svaru. Pro jednoduchá, plochá zkušební tělesa, s příčným svarem, jsou výsledné únavové vlastnosti výrazně ovlivněny geometrií a svarem. Místo porušení je pak logicky na okraji zkušebního vzorku. Navržený tvar zkušebních těles viz obr. 1 proto respektuje reálný tvar profilu, ze kterého se tenkostěnné svařované konstrukce vyrábějí.

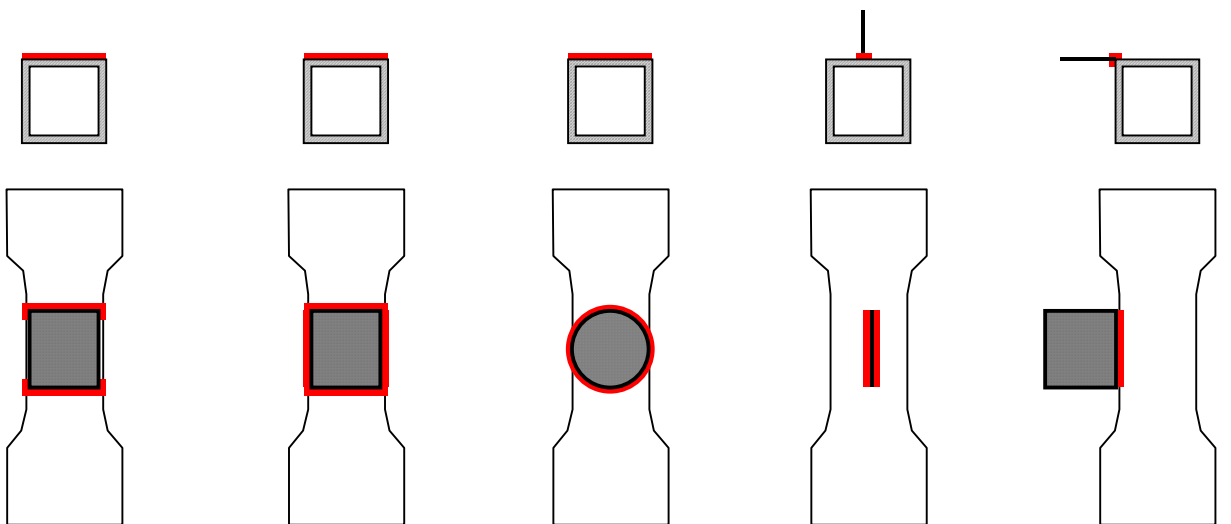
Etapa č. 3 - Stanovení únavových vlastností vybraných typů konstrukčních a technologických vrubů. Cílem těchto zkoušek je nalézt únavové vlastnosti pro konstrukční vrub s maximálním gradientem napětí. Únavové vlastnosti „příbuzných“ konstrukčních vrubů, například žeber s různým úhlem ukončení do základního profilu, pak leží mezi těmito extrémy. Navržené tvary zkušebních těles viz obr. 2.

Etapa č. 4 - Ověřovací zkoušky životnosti na vybraných reálných konstrukčních uzlech namáhaných proporcionálním i neproporcionálním zatěžováním. Celá metodika odhadu životnosti, pak bude ověřena na konkrétních svařovaných konstrukčních uzlech. Vliv neproporcionálního zatěžování bude porovnán s experimentálně stanovenou nebo predikovanou životností součásti zatěžované proporcionálně. Předpokládaná zkušební tělesa viz obr. 3.

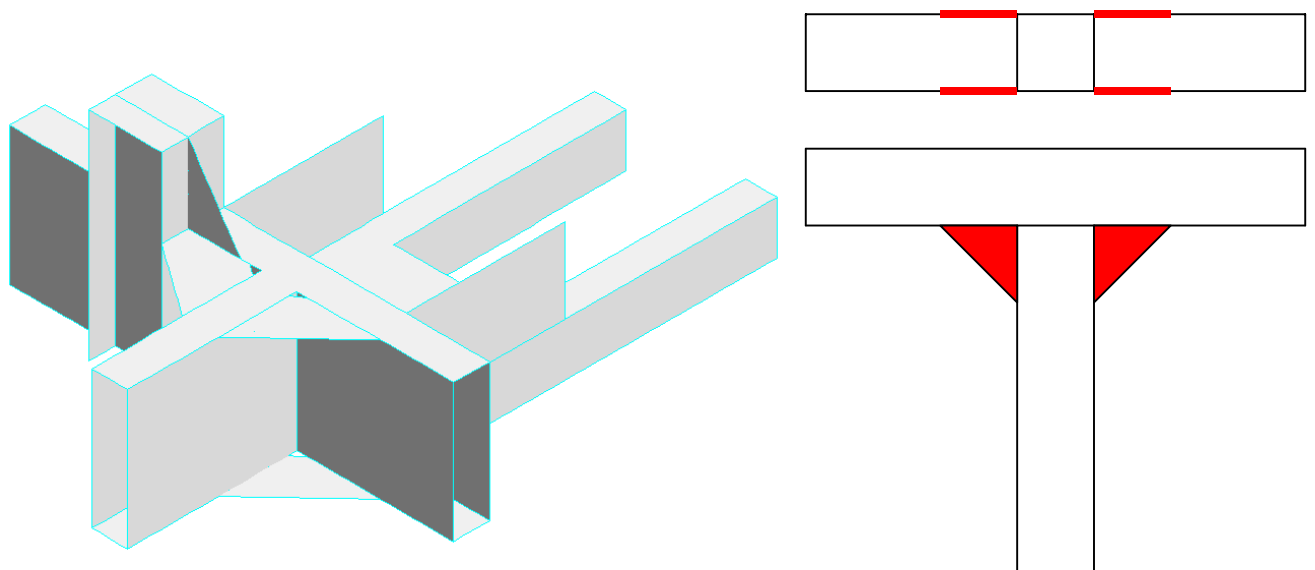
Zkoušky etapy 1, 2 a 3 budou provedeny vždy pro namáhání v tahem a krutem. Zkoušky na elementárních vzorcích budou sloužit pro získání uceleného souboru únavových dat pro různé typy technologických a konstrukčních vrubů. Při výběru vzorků technologických a konstrukčních vrubů bude zohledněn předpokládaný reálný konstrukční uzel. Při zkouškách bude podrobně sledováno místo předpokládaného vzniku trhliny a měřena úroveň napjatosti v okolí paty svaru, metodou tenzometrickou a metodou SPATE, (smluvní měření VZLÚ Praha), bude sledována rychlost a směr šíření únavové trhliny závislosti na parametrech zatěžování. Všechny tyto zkoušky s jednoduchým i kombinovaným namáháním proběhnou na počítačově řízených elektrohydraulických zatěžovacích strojích zkušebny ŠKODA VÝZKUM s.r.o. Pomocné zkoušky k výpočtům pro určení potřebných materiálových parametrů při základních typech namáhání budou realizovány společně s FS ČVUT v Praze.



Obr. 1 Tvary několika zkušebních vzorků s technologickým vrubem



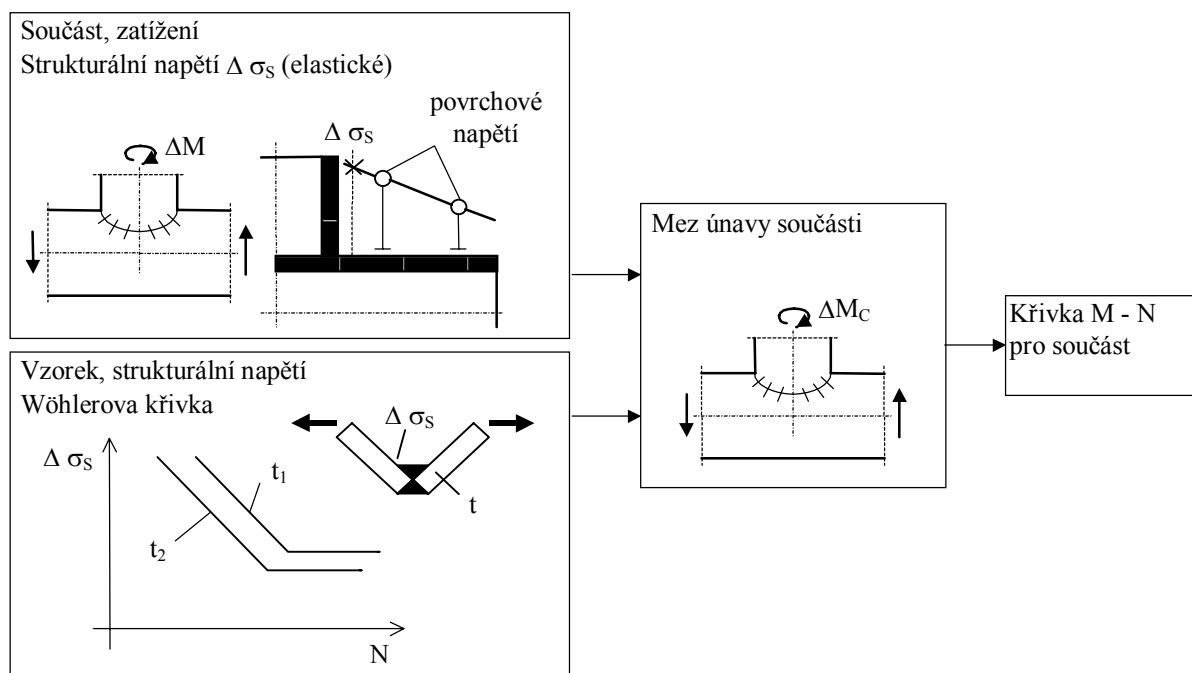
Obr. 2 Tvary několika zkušebních vzorků s konstrukčním a technologickým vrubem



Obr. 3 Tvary reálných konstrukčních uzlů

Výpočetní část:

Paralelně s experimentálními pracemi bude probíhat analýza a srovnávání metod odhadů životnosti metodami LESA a LPSA s modifikací na svarové spoje. Schéma metody LESA je uvedeno na obr. 4. Postup vychází z prací Haibacha [52] a Dijkstry a Gurneye [53]. Je založen na určení lokálního strukturálního napětí (local structural stress) ve stěně profilu v místě předpokládaného vzniku trhliny a na jeho porovnání s napětím ve zkušební vzorku svarového spoje stejného typu. Mez únavy vzorku svarového spoje představuje mezní hodnotu lokálního strukturálního napětí ve svarovém spoji trubek, pokud má být zaručena neomezená životnost. Lokální strukturální napětí je napětí v konstrukci, ve kterém se neuplatní vliv vrubů. U tenkostěnných profilů se může skládat, kromě nominálního tahu (tlaku) a ohybu, také z lokálního ohybu stěny trubky. Použití lokálního strukturálního napětí pro porovnání pevnostních charakteristik vzorku a spoje trubek se připouští i při malých rozdílech v geometrii a druhu zatížení.



Obr.2 Schéma metod LESA pro svarové spoje

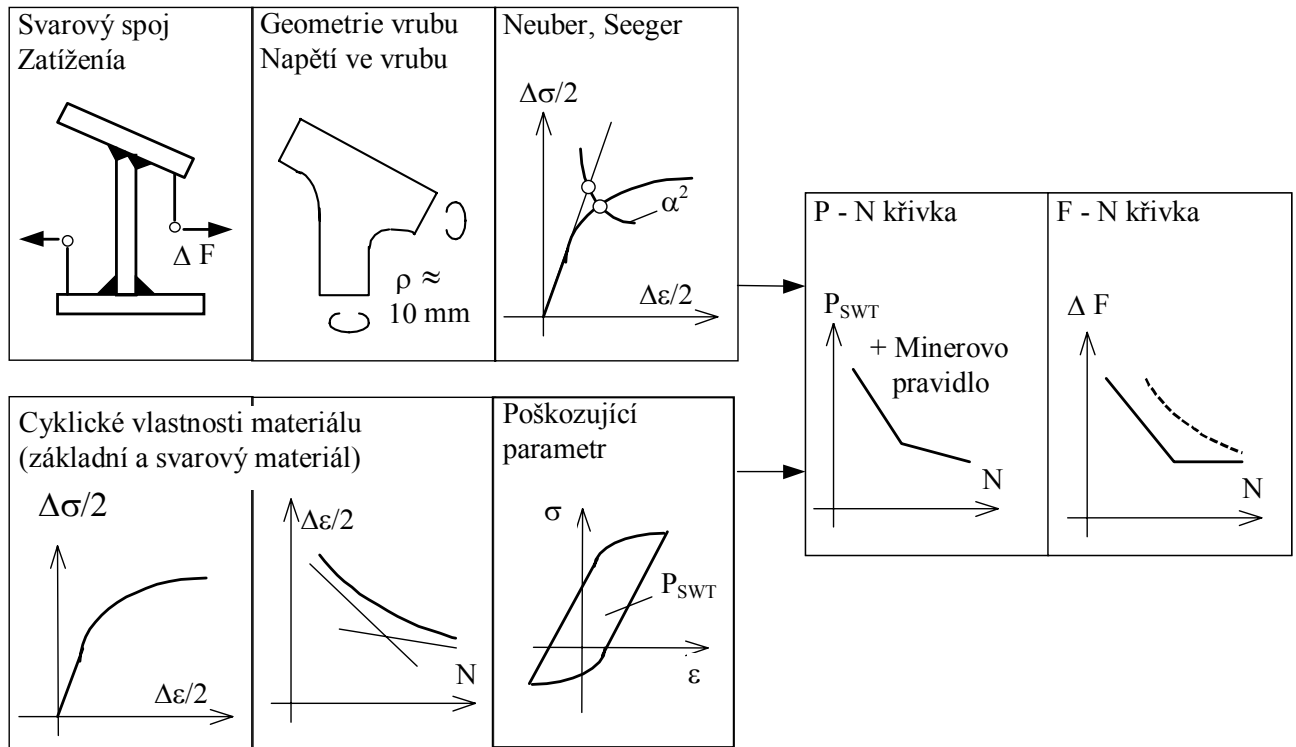
Pozornost výzkumu bude zaměřena na řešení následujících otázek této metodiky:

- Určení napěťového pole ve svarovém uzlu pomocí normalizované sítě MKP pro zadané zatěžovací stavy, určení amplitudové a střední složky dynamických napětí (σ_m , σ_a)
- Určení způsobu určení strukturálního napětí σ_s a způsobu extrapolace zjištěných napětí do místa přechodu svaru
- Definování Wöhlerovy křivky svarového spoje vzorku ze stejného materiálu, se stejnou geometrií spoje, kvalitou svaru, typem zatěžování a stejným vlivem vrubu.
- Přizpůsobení a ztotožnění Wöhlerovy křivky z předchozího bodu s Wöhlerovou křivkou posuzovaného svarového spoje.
- Výpočet poškození svarového spoje pro dané podmínky kombinovaného zatěžování $\sigma_s = f(\sigma_m, \sigma_a)$ vůči přizpůsobené únavové křivce.
- Porovnání s experimenty

Metoda LPSA pracuje s lokálními hodnotami napětí σ_{loc} a deformací ϵ_{loc} , ve kterých jsou zohledněny vrubové účinky způsobené tvarem případně i technologickým provedením svarového spoje. Postup navržený Heulerem a Seegerem [54] se shoduje s přístupem určování cyklických deformací ve vrubu (postupy local approach). Schéma výpočtu ukazuje obr. 5. Základ pro určení

únavové křivky součásti, zahrnující napěťové a deformační cykly ve vrubu, tvoří (P–N) křivka s parametrem P dle Smithe, Watsona a Toppera (tzv. SWT-parametr). Tento parametr uvažuje korekci na vliv středního napětí S_m a je definován vztahem

$$P_{SWT} = \beta \sqrt{(S_a + S_m) \cdot \varepsilon_a \cdot E} = \sqrt{\sigma_{a,loc} \cdot \varepsilon_{a,loc} \cdot E}$$



Obr. 5 Schéma metody LPSA navržené Eulerem Seegerem [13]

Modifikaci lokálního postupu uvádí Radaj [55]. Postup je založen na určení součinitele vrubu β v ostrém přechodu ze součásti do kořene svaru. Na základě četných zkušeností a porovnání se skutečným provedením svarů, navrhuje autor modelovat kořen svaru s neprůvarem o poloměru cca 1 mm. Součinitel vrubu může být odhadnut pomocí technických vzorců nebo numericky metodami hraničních nebo konečných prvků. Úměrně stanovenému vrubovému účinku jsou korekce uzpůsobeny únavové křivky napětí (Wöhlerovy křivky). Při výpočtu únavového poškození se korekce pomocí Haighova diagramu zohledňují střední napětí kmitů a zbytková napětí ve svaru.

Pozornost výzkumu bude zaměřena na řešení následujících otázek této metodiky:

- Jaký vliv má hustota sítě MKP na výsledky napětí v kořeni svaru
- Jak modelovat kořen svaru a eventuálního neprůvaru, aplikovat využití nové metody spoluřešitele [47] pro určení součinitelů vrubu z výpočtů MKP
- Jak lze modifikovat pro svar Neuberovo pravidlo přepočtu nominálních účinků do vrubu
- Který z dalších uniaxiálních poškozujících parametrů P lze ve fázi iniciace trhliny pro svary aplikovat [10][11][25][26][27]
- Jak konstruovat poškozující parametry pro vícesložková namáhání.[34][35][36]

Předpokládaný výsledek a jeho využití

Předpokládá se, že řešení projektu přinese rozšíření současného poznání o následující informace:

- zpřesnění poznatků o mechanizmech únavového porušování strojních částí vystavených kombinovanému zatěžování,
- nová únavová data (křivky) o chování svařovaných styčnicků při vícesložkovém proporcionálním i neproporcionálním zatěžování
- upřesnění a rozšíření poznatků o únavovém mechanismu nukleace a šíření trhlin ve svarových spojích
- rozvoj stávajících metod predikce životnosti svařovaných uzlů případně vyvinutí nové metody při vícesložkovém proporcionálním i neproporcionálním zatěžování
- vývoj algoritmu a vytvoření programového modulu pro výše uvedené metody predikce.

Výsledkem bude tvorba mapy poškození svařovaného konstrukčního uzlu v návaznosti na MKP výpočty. Na základě stanovené metodiky a dílčích experimentů bude možné provádět predikci mapy poškození na zvoleném konstrukčním uzlu již ve stádiu návrhu. Ověření celé metodiky proběhne na zkoušce reálného konstrukčního uzlu viz odstavec c) Etapa č. 4. Takovýto odhad umožňuje identifikovat a následně eliminovat potenciální kritická místa posuzované svařované konstrukce.

Využití výsledků řešení tohoto projektu bude zejména v dopravní technice, avšak i ve všeobecném strojírenství při dimenzování dynamicky namáhaných svařovaných konstrukcí a při experimentálních průkazech životnosti svařovaných částí. Počítá se rovněž s využitím výsledků řešení v pedagogickém procesu na FS ČVUT v magisterském i doktorském studijním programu.

Literatura

- [1] HEULER, P.; SCHÜTZ, W.: Lebensdauervorhersage für schwingbelastete Bauteile – Grundprobleme und Ansätze (Teile I, II, III). Aluminium, 67: 1991. Nr. 4-6. S. 371, 459, 582 .
- [2] POLACH, P. - HEJMAN, M. - KOTAS, M. - KEPKA, M.: Identifikace budících sil ve vypružení autobusu a jejich další využití. Sborník 38. mezinárodní konference Experimentální analýza napětí 2000, ÚMT FS VUT v Brně, Třešť, str. 253-261, 2000.
- [3] BUCH, A: Approximation Fatigue Strength Calculation Methods. Materialprüfung, 32, 1990, Nr. 3. S. 58-64.
- [4] SOCIE, D.F.: Fatigue-life Prediction Using Local Stress-Strain Concept. Experimental Mechanics, 17, 1977, No 2., pp. 50-56.
- [5] HÜCK, M.: Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguß und Grauguß. Stahl und Eisen, Heft 24/81, S. 57-60.
- [6] TUCKER, L.E.; LANDGRAF, R.W.; BROSE, W.R.: Proposed Technical Report on Fatigue Properties for the SAE Handbook. SAE Congress, Feb. 25, Detroit, 1974.
- [7] POLÁK, J.: Cyclic Plasticity and Low Cycle Fatigue Life of Metals. 2nd edition, Academia, Prague, 1991, 316 p, ISBN 80-200-0008-9.
- [8] HENNEL, B; WIRTGEN, G.: Zum DDR Standard TGL 19340. IFL Mitteilungen, 1983. Nr.1, S. 2-35.
- [9] NEUBER, H.: Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatical Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress-Strain Law. Am. Soc. Mech. Eng., Journal of App. Mechanics, Vol. 8, Dec. 1961, pp. 544-550.
- [10] GLINKA, G.: Energy density approach to calculation of inelastic strain-stress near notches and cracks. Eng. Fracture Mechanics, Vol. 22, No 3, pp. 485-508, 1985.
- [11] POSPÍŠIL, B.: Využití zobecněného Neuberova principu pro výpočty deformací při creepu. Strojírenství 27, 1977, č. 10, str.624-627.
- [12] ZHENG, X.-L.: Modelling fatigue crack initiation life. Int. Journal of Fatigue, 15, 1993, No. 6, pp. 461-466.
- [13] TOPPER, T.H.; WETZEL, R.M.; MORROW, J.: Neubers Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens. Journal of Materials, Vol. 4, No 1., March 1969, pp. 200-209.
- [14] BAUMEL, J.R.A; SEEGER, T: Material data for cyclic loading. Supplement 1., Amsterdam, Elsevier, 1987.
- [15] MORROW, J.: Fatigue Properties of Metall. In: Fatigue. Design Handbook, (Ed. Graham, J.A.), Society of Automotive Engineers, 1968, pp. 21-29.
- [16] RŮŽIČKA, M.; HANKE, M.; ROST, M.: Dynamická pevnost a životnost. Skripta ČVUT, Praha 1992.
- [17] HEYWOOD, R. B: Design Against Fatigue. Pergamon Press, New York, 1969.
- [18] MURAKAMI, Y. ed: Stress Intensity Factors Handbook. Pergamon Press, 1987.
- [19] COLINS, J., A.: Failure of Materials in Mechanical Design. John Wiley&Sons. New York, 1981.

- [20] KOGAEV, V. P.: Rasčety detalej mašin i konstrukcij na pročnosť i dolgovečnosť. Mašinostrojenie, Moskva, 1985.
- [21] LINHART, J; JELÍNEK, E.: Některé závěry vyplývající z dosavadního výzkumu únavové životnosti konstrukčních materiálů. In: Nové poznatky o únavové životnosti konst. materiálů, Sborník, SVÚM Praha, 1971.
- [22] WEIBULL, W.: A Statistical Theory of the Strength of Materials. Ing. Vet. Acad. Proc., 151, 1939.
- [23] VOROBEV, A. Z.: Soprotivlenie ustalosti elementov konstrukcii, Moskva, Mašinostrojenie, 1990.
- [24] RŮŽIČKA, M. Predikce životnosti strojních částí na základě lokální deformační odezvy materiálu. In: Kolokvium dynamiky strojů '94. Praha : AV ČR ÚT. 1994. s 77-80.
- [25] WETZEL, R.M.: A Method of Fatigue Damage Analysis. Rep. No.SR 71-107, Scientific Research Staff, Ford Motor C., Dearborn, Michigan, Sept. 1971.
- [26] LANDGRAF, R.W.; LAPOINE, N.R.: Cyclic Stress-Strain Concepts Applied to Component Fatigue Life Prediction. Society of Automotive Engineering No. 740280, Feb. 25-March 1, 1974, Detroit, Michigan 1974.
- [27] BERGMANN, J.W; SEEGER, T.: On the influence of cyclic stress-strain curves, damage parameters, and various evaluation concepts on the life prediction by the local approach. VDI- Rep. of Progress 18, No 6, 1979.
- [28] ROBERTS, R.; ERDOGAN, F.: The effect of mean stress on fatigue crack propagation in plates under extension and bending. Trans. ASME, J. Basic. Engineering 89 (1967, pp. 885-892.
- [29] HAIBACH, E.: The influence of cyclic material properties on fatigue life prediction by amplitude transformation. Proc. of SEE-Conf. (Ed. by Sheratt, F.): Appl. of Computers in Fatigue, Warwick, 1978.
- [30] POSPÍŠIL, B.; SKALA.. Programový komplex pro hodnocení pevnosti a životnosti. Příručka pro uživatele, Brno 1993.
- [31] BROEK, D.: Elementary Engineering Fracture Mechanics. Martimes Nijhoff Publ., Haag, 1982.
- [32] RŮŽIČKA, M.; HAVLÍČEK, V.: Výpočet strojních částí na únavu za normálních a zvýšených teplot. Díl 1. Praha : DT ČSVTS,1988 - 88 s.
- [33] RŮŽIČKA, M.; HAVLÍČEK, V.: Výpočet strojních částí na únavu za normálních a zvýšených teplot. Díl 2. Praha : DT ČSVTS,1989 - 84 s.
- [34] BANNANTINE, J. A; SOCIE, D. F.: A Multiaxial Fatigue Life Estimation Technique. In: Advances in Fatigue Lifetime Predictive Technigues, ASTM STP 1122, Ed.: M. R. Michell. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992, pp. 249-275.
- [35] PALIN-LUC, T.; LASSERRE, S.; BERNARD, J-Y: A Volumic approach in high cycle fatigue to predict the fatigue strength of notched components. In: Fatigue Design 1998. Ed.: Marquis G., Vol. I. Espoo, 26-29 May, 1998. Technical Research Centre of Finland, Espoo 1998. ISBN 951-38-4574-5.
- [36] VIDAL-SALLE, E; KENMEUGNE, J. L.; BAHUAUD, R. J.: Multiaxial Fatigue under Variable Amplitude Loading. In:Fatigue '96. Proc. of the sixth int. fatigue congress. Vol. II. Ed.: Lütjering, G., Pergamon, Berlin, 1996. ISBN 0-08-042683.
- [37] BOLLER, Ch.; BUDERATH, M.; HEULER, P.; VORMWALD, M.: Notch Fatigue Assessment of Aircraft Components Using a Fracture Mechanics Based Parameter. In: AGARD Report 797: An Assessment of Fatigue Damage and Crack Growth Prediction Techniques. 77th Meeting of the AGARD Structures and Materials Panel. . Bordeaux, Sept. 1993, pp. 9-1 ..9-11.
- [38] BUCH, A.: Prediction of constant-amplitude fatigue life to failure under pulsating tension bz use of the local-strain approach. International Journal of Fatigue, 12, No. 6, 1990, pp. 505-512.
- [39] DUPRAT, D.; DAVY, R.; BOETCH, R.; BOUDET, R.: Fatigue damage calculation in stress concentration fields under variable uniaxial stress. International Journal of Fatigue, 18, No. 4, 1996, pp. 245-253.
- [40] SDRC : Manuály k programu I-DEAS
- [41] S.R.A.C : Manuály k programu COSMOS/M
- [42] Framasoft : Manuály k programu SYSLIFE
- [43] MSC : Manuály k programu MSC/FATIGUE
- [44] nCode : Manuály k programu FATIMAS
- [45] SAT : Manuály k programu FEMFAT
- [46] Španiel, M. a kol: Analýza motorového lože letounu AE-270, Část I: Analýza napjatosti a deformací metodou konečných prvků.
- [47] Papuga, J. - Růžička, M. - Španiel, M.: Software Solution of Fatigue Damaging Based on the FE Analysis Results Utilization. In: Abstracts of 8th Inter. Conference on Numerical Methods in Continuum Mechanics. Žilina: University of Žilina, Mechanical Engineering Faculty. 2000. p. 138-140. - ISBN 80-968368-1-1.
- [48] Malěr, Z.: Podklady pro výpočtový odhad bezpečného života nosné konstrukce malých letounů. Kandidátská disertační práce, Voj. Akademie, Brno 1990.

- [49] Cais, O., Nekoksa, P.: Životnost při působení zatížení se superponovanou složkou. Zpráva VZLÚ Praha č. V 886/67, Praha 1996.
- [50] Military Standardisation Handbook. Metallic materials and elements for aerospace vehicle structure, MIL-HDBK-5D, June 1987
- [51] Radaj, D.: Assessment of the fatigue strength of welded structures based on local parameter.
- [52] Haibach, E.: Die Schwingfestigkeit von Schweissverbindungen aus der Sicht einer örtlichen Beanspruchungsmessung. LBF-Bericht No. FB-77. Lab. f. Betriebsfestigkeit, Darmstadt 1968.
- [53] Gurney, T. R.: Fatigue of welded structures. Cambridge Univ. Press, Cambridge 1979.
- [54] Heuler, P.; Seeger, T.: Rechnerische und experimentelle Lebensdauervorhersage am Beispiel eines geschweissten Bauteils. Konstruktion 35 (1983), No. 1, pp. 21-26.
- [55] Radaj, D.: Berechnung der Dauerfestigkeit von Schweissverbindungen ausgehend von den Kerbspannungen. VDI-Berichte 661 (1988), pp. 67-98.
- [56] Růžička, M – Papuga, J. – Španiel, M.: Application of the Local Elastic Stress Approach for Fatigue Life Calculation. In: Ed. Menguid, S.A.- Silva Gomez, J. F. Integrity Reliability Failure. July 19 – 22, 1999. Poto Portugal. ISBN 0-7727-4802-0, pp. 278-280.