



OPONENTNÍ POSUDEK

disertační práce

Ing. Jaromíra Kašpara

VÝZKUM SIMULAČNÍCH TECHNIK URČENÝCH
K NAVRHOVÁNÍ ZA STUDENA LISOVANÝCH
KOMPONENTŮ S OHLEDEM NA JEJICH ÚNAVOVOU ŽIVOTNOST

V Praze dne 13. 10. 2023

Vypracoval: **Prof. Ing. Milan Růžička, CSc.**

Úvod

K posouzení byla předložena disertační práce Ing. Jaromíra Kašpara, vypracovaná v rámci doktorského studia na Strojní fakultě Západočeské univerzity v Plzni ve studijním programu Teorie a stavba strojů. Práce se zabývá postupy navrhování na únavovou životnost strojních součástí zhotovených technologií tváření za studena s cílem navržení takových postupů a metod, které umožňují zohlednění výrobního procesu a jeho dopadu na únavový život. Práce obsahuje 97 stran a přílohy a je rozčleněna do šesti hlavních kapitol.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Predikce únavové pevnosti a životnosti dílů je jedním z hlavních témat řešení při navrhování dílů strojních konstrukcí. Za studena lisované díly jsou vzhledem ke složitému výrobnímu procesu zatíženy složitým technologickým procesem vytvářejícím v různých místech součástí různá plastická přetvoření s důsledkem vzniku zbytkových napětí. Oba faktory predikci životnosti významně ovlivňují. Ve fázi projektování, kdy není finalizována technologie z hlediska např. počtu tvářecích operací a nejsou navrženy výrobní nástroje, nelze podrobně numericky simulovat výrobní proces, aby se dala stanovit intenzita plastické deformace v různých částech výrobku. Již v 90. letech min. století tak začaly vznikat inverzní numerické metody pro simulaci procesu hlubokého tažení z finálního tvaru výlisku. Autor přejímá jednu z MKP metod, bez českého kontextu ji označuje jako „inverzní stamping“. Pro jednoznačnost posudku zůstanu u tohoto pojmenování, i když podobným hybridním pojmům v češtině nefandím. V disertační práci navržený postup predikování intenzity plastické deformace, lokálních napětí i výsledné životnosti pomocí autorem modifikované metody „inverzního stampingu“ však významně přispívá k prvotním odhadům životnosti strojních součástí produkovaných zejména technologií lisováním rovinných plechů. Proto lze toto téma hodnotit jako velmi přínosné pro rozvoj numerických simulačních metod i pro výrobní technickou praxi.

Zhodnocení použitých metod, postupu řešení a dosažení cílů práce

Autorovým hlavním cílem disertační práce bylo navrhnout výpočetní postup, který umožní dimenzování za studena tvářených dílů především v raných fázích jejich návrhu, kdy nejsou známy ani navrženy výrobní operace a tvary výrobních nástrojů, z hlediska vysokocyklové únavy. Autor se zaměřil na následující body řešení (cíle dis. práce):

- Existující inverzní výpočetní metodu pro analýzu dopadů lisování upravit tak, aby byla dostatečně robustní, a přitom zachovat některá její pozitiva, zejména krátký výpočetní čas.
- Tuto metodu rozšířit tak, aby byla použitelná jak pro součásti vyrobené z plechu o konstantní tloušťce, tak z plechů o proměnné tloušťce.
- Všechny kroky nutné k analýze únavové životnosti zahrnout do jednoho celku tak, aby celý postup byl dostatečně rychlý a snadno použitelný. Umožnit tak výpočetní optimalizaci navrhovaných součástí.
- Výsledky dosažené navržený postupem ověřit na základě zkoušek.

Pro splnění cílů autor použil klasické i nové numerické a experimentální přístupy a metody. Nejprve v teoreticko-metodologické části (Kap. 2) uvedl přehled a rešerši dosavadních metod pro simulaci a užívané diagramy mezních deformací. Dále komentoval a zhodnotil únavové aspekty, zejména vliv efektivní deformace na křivku životnosti. Popsal dosavadní metody numerických simulací výrobního procesu a zejména metodu inverzního stampingu, kterou dále zdokonaloval. Blíže zde analyzoval možné geometrické a numerické problémy MKP řešení. Dopady výrobního procesu na stav napjatosti uvažováním zbytkových napětí komentoval v podkapitole 2.4.

V Kapitole 3 autor popisuje a hodnotí výsledky svých vlastních simulací tvářecího procesu adaptací metody inverzního stampingu pro účely predikce životnosti. Musel přitom navrhnout řešení řady problémů, jako např. projekci MKP sítě dílu do roviny lisovaného plechu při zachování důležitých koncentrátorů napjatosti, které významně ovlivňují životnost, dále adaptaci metody použitelnou i pro objemové síť pro díly s proměnnou tloušťkou plechu. Navrhl vlastní post-procesingové algoritmy vyhodnocující veličiny výsledkových souborů, které jsou důležité pro hodnocení únavové životnosti. Separuje membránové, ohybové a smykové deformace a vyhodnocuje jejich elastickou i plastickou část. Při určování napětí v elasto-plastické oblasti používá metodu „prediktor-korektor“. Podstatnou část práce věnuje výběru metod a návrhu řešení robustní metody pro redukci dimenze MKP sítě při její projekci do roviny. V grafickém srovnání ukazuje porovnání efektivity vybraných metod redukce z hlediska počtu otočených elementů, počtu zpřesňujících iterací, nebo celkového času výpočtu. Zajímavé je, že do svého navrženého algoritmu nevolí jedinou metodu, nýbrž hodnotí efektivitu dvourozměrné projekce alespoň čtyřmi metodami, z nichž poté volí v každém kroku tu nejvhodnější. Úspěšnost algoritmu ještě vylepšuje zařazením kroku elastického předvýpočtu, který umožní lépe posoudit úspěšnost konvergence stanovení plastických deformací s navrženým iteračním krokem. Neméně tvůrčí je taktéž adaptace inverzního stampingu pro objemové síť, tj. pro plechy s proměnnou tloušťkou. Zde se autor excelentně vypořádává s problematikou určení geometrie střednicové roviny a rovin povrchových i lokalizaci odečítání tloušťky. V důsledku lokální změny tloušťky autor navrhl i modifikaci MKP sítě právě s tímto zohledněním.

Pro hodnocení únavy výrobku při provozním namáhání by mělo být v autorově práci klíčové určení plastické deformace a napjatosti po inverzním stampingu, což popisuje v podkap. 3.1.5.1. Vychází přitom ze znalosti finálního tvaru výrobku a inverzním stampingem získaného

rozvinu součásti do roviny lisovaného plechu. Jedná se o úlohu komplikovanou, možná i nejednoznačnou, neboť nejsou známy žádné mezikroky a hledané rozložení deformací/napětí musí být určeno z počáteční a konečné polohy a tvaru každého elementu. Autor nabízí v literatuře užívané řešení promítnutí původního a deformovaného elementu do stejné roviny a z posuvů uzlů elementů určuje membránovou složku napjatosti. Ohybové složky deformace/napětí poté určuje z rozdílů směrů uzlových normál, z nichž lze spočítat rotace a poté i složky deformací. Standardním postupem poté již rozdělí tenzor deformace na elastickou a plastickou část a porovnáním s podmínkou plasticity dopočítá elastická a elasto-plastická napětí. Problém výsledných deformací se ještě komplikuje, že mezi výsledným tvarem součásti a tvarem lisovací formy je rozdíl, který je způsoben „odpružení“ výlisku při vyjmutí z formy. Uvažování/neuvažování tohoto efektu může do jisté míry ovlivnit zbytkové deformace a napětí v díle. Autor odkazuje, že tuto korekci je možno provést nebo ji vynechat a výpočet tím urychlit. **V tomto kontextu mám otázku: Testoval autor možný efekt tohoto jevu na výsledky z hlediska výsledné napjatosti nebo i životnosti?**

Vyhodnocení únavové životnosti disertant provádí za použití komerčního softwaru FEMFAT. Pro využití tohoto programu ovšem musí exportovat výsledkové soubory předchozích MKP simulací inverzního stampingu do vhodného formátu *.erfh5, což mu jeho vlastní program vytvořený v jazyce Python umožňuje. Výsledky a přesnost predikce životnosti jsou z hlediska mezních materiálových hodnot determinovány únavovými křivkami, resp. mezní plochou *mezních rozkmitů napětí/deformaci – počtu cyklů do poruchy a – efektivní plastickou deformací*, která vznikla v posuzovaném místě výlisku. Autor zohledňuje v navržené mezní ploše příznivý vliv efektivní plastické deformace, avšak jen do míry tažnosti A_g , poté efekt zvýšení únavové pevnosti stagnuje a od tažnosti $2A_g$ se snižuje na původní únavovou křivku. Únavové křivky dvou typů materiálů doktorand přebral z literatury. **V této souvislosti bych se chtěl optat, zda autorova konstrukce této mezní plochy má nějakou oporu v publikovaných zkouškách, případně jak finálně konstruoval a do programu interpretoval mezní únavovou plochu a zda v ní uvažoval/korigoval vliv středních hodnot složek kmitavých napětí?**

Vlastní navrženou metodu inverzního stampingu v kap. 3 autor validuje na výsledcích kvazistatických mechanických zkoušek plochých vzorků dvou typů materiálů. V podkap. 3.4 následně autor ukazuje a komentuje srovnání výsledků výpočtů a únavových zkoušek ohýbaných nebo tahových vzorků jednoduchých výlisků, celkem sedmi typů (A, B, C, D, E, F, G). Ukazuje se, že navržený postup dobře predikuje místo potencionálního vzniku únavové trhliny. Autor uvádí, že u dílů s nižším plastickým přetvořením v kritickém místě poruchy se výsledky simulací poměrně dobře shodují s experimenty, u dílů s vyšším přetvořením jsou výsledky již více diskutabilní a metoda je v některých případech velmi konzervativní. S tímto hodnocením lze souhlasit. Otázkou zůstává, kde může být příčina např. výrazné konzervativnosti výpočtu u vzorku typu A, G nebo D? **Nastoluji v této souvislosti diskutovat o pojmu „exponovaného objemu“ tj. objemu materiálu, který se nachází v oblasti vysokých hodnot cyklického namáhání. Právě u vzorků s lepší shodou predikce a experimentu je tento objem patrně vyšší, tj. vzorky typu B, C, E, F, než u typů A, D, G. Co si o možném vlivu exponovaného objemu autor myslí?**

Závěrem tohoto komentáře lze konstatovat, že všechny cíle práce byly beze zbytku naplněny.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a původní přínosy disertační práce

Disertační práce ing. Jaromíra Kašpara přináší řadu původních postupů i algoritmů, které přinesl k původní metodě „inverzního stampingu“. Jeho přepracovaný algoritmus lze např. aplikovat i pro tvarově složitější díly s tvarovými koncentrátory napětí, což je zejména pro predikci důležité zohlednit. Algoritmus dále adaptoval i pro konečněprvkovou objemovou síť, což umožňuje např. řešení lisování dílů s proměnnou tloušťkou. Autor uvádí, že použití metody inverzního stampingu nebylo dosud aplikováno pro účely predikce životnosti. Potvrzují, že jsem nenašel v dostupné literatuře publikaci, která by se tomuto problému přímo věnovala. Autor navrhl modifikaci mezní únavové plochy životnosti podle stupně překročení rovnoměrné tažnosti v daném místě. Metodu verifikoval s experimenty a ukázal použitelnost metody v rámci obvyklých odchylek teoretických a experimentální predikčních metod životnosti. Nové a původní výsledky i přínosy práce jsou tak prokazatelné.

Formální úroveň práce a publikační činnost doktoranda

Formální úroveň práce hodnotím jako velmi dobrou. Pisatel užívá srozumitelný technický jazyk bez významových i stylistických nepřesností. Definiuje a vysvětluje všechny potřebné pojmy a veličiny. V práci jsem nenalezl nadbytek překlepů a obecně nese známky pečlivosti. Tabulky, grafy i obrázky jsou čitelné a vypovídající, v textu komentované.

Za formální nedostatek však považuji absenci citací vlastních prací autora přímo v textu disertační práce. V soupisu literatury autor cituje 5 svých prací (2 konferenční příspěvky, 2 časopisové publikace indexované ve Scopus a jednu publikaci v přípravě). Protože autor má dle zákona č. 111/1998 Sb. prokázat, že výsledky disertace byly publikovány, je uvádění odkazů v příslušných kapitolách práce velmi žádoucí, neboť jinak nemusí být zřejmé, které publikace s tématem disertační práce souvisejí a zda jsou splněny podmínky citovaného zákona.

Nad rámec hodnocení (jako jeden z porotců) potvrzují, že jeden za článku publikovaný v časopise MM Science Journal [72], byl v r. 2021/22 oceněn cenou Inženýrské akademie za nejlepší článek publikovaný v uvedeném období v tomto časopise, což samo o sobě svědčí o odborné erudovanosti autorského kolektivu.

Další dotazy a připomínky k zodpovězení při obhajobě práce

1. Vracím se k otázce jednoznačnosti/víceznačnosti výsledků inverzního stampingu. Např. součásti typu B na obr. 3.3.2-3 a typu C na obr. 3.3.2-5 se odlišují počtem zakřivených částí. První součást by mohla být např. vyrobena ve formě s daným rádiusem zakřivení střední části během jedné operace, právě tak jako pomocí dvou operací, jak autor uvádí v tab. 3 (2 operace). Druhá součást může být vyrobena podobným způsobem ve složitější formě různým počtem operací (podle složitosti formy). Je ovšem zřejmé, že plastická přetvoření různých částí plochého polotovaru budou závislá na počtu operací a dosažené „lokální“ tažnosti v dané části polotovaru. Jak na finálním tvaru součásti, např. s lokálními plastickými ohyby, může metoda inverzního stampingu rozlišit: např. co je jen kinematický přemístování - zde ohýbáno a co je plastizováno - zde taženo?
2. Predikci životnosti každého místa součásti (MKP uzlu) determinuje velikost rozkmitů lokálních deformací/napětí při kmitavém zatěžování a únavové křivky (deformace/napětí). Autor k tomuto vyhodnocení užívá komerčního softwaru (FEMFAT). Z uváděného popisu algoritmu postupu vyhodnocení životnosti jsem zcela nepochopil operace zobrazené ve schématu na obr. 3.2-1:
 - a. Usuzuji, že metoda inverzního stampingu poskytuje do této predikce pouze rozložení intenzity plastické deformace v uvažované součásti pomocí které je

„navržena“ mezní únavová plocha v každém uzlu? Nebo metoda také poskytuje i další údaje o napjatosti v díle, které jsou do predikce uvažovány? (Opomím zde v práci diskutované možnosti využití zbytkových napětí a zohlednění jejich relaxaci při cyklování).

- b. Zda MKP analýza napjatosti při cyklickém únavovém namáhání, kdy jsou určeny rozkmity deformací/napětí v každém uzlu, je nějak ovlivněna předvýpočtem a výsledky inverzního stampingu?
3. Diagram na obr. 2.1.-2 má zobrazovat mezní deformace v omezení zatěžujícími případy: v prvním kvadrantu dvouosý tah, kdy $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$. Ve druhém kvadrantu potom jednoosý tah, kdy $\varepsilon_2 = -\nu \varepsilon_1$? Jak by měla potom správně vypadat mezní čára (její směrnice) v tomto kvadrantu?
4. Algoritmus a princip lineárního inverzního stampingu popsany body 1 až 7 na str. 29 není dostatečně názorný, chybí mi zde důležitá vysvětlení základních termínů spojených s technologickým procesem a metodou inverzního stampingu: definice vztažné roviny, původní polotovar a na něm vytvořená síť, finální výrobek a jeho síť, projekce elementu do vztažné roviny atp. Lze toto doplnit obrázkem a vysvětlením při obhajobě?
5. Autor v kap. 3.4 provádí porovnání výsledků únavových zkoušek a výpočtových simulací v softwaru FEMFAT. To mu umožňuje aplikovat multiaxiální únavové metody, i když pro jednoduché případy experimentu to není zcela nezbytné. Bohužel nejsou v práci uvedeny (ani v příloze) výsledné „mapy poškození“, odkud by byly zřejmé lokality s nejvyšším únavovým poškozením. Lze u obhajoby alespoň pro jeden ze vzorků ukázat, např. vzorek typu A nebo D?

Závěrečné hodnocení

V disertační práci doktorand Ing. Jaromír Kašpar prokázal schopnost nalézt nová řešení v oblasti náročných numerických simulací technologických procesů, velmi dobrou orientaci v problematice teorie MKP i teorie plasticity, taktéž v oblasti zkoušení, zpracování a vyhodnocení experimentálních výsledků. Disertant vytvořil původní modifikované algoritmy inverzního stampingu a jejich využití pro predikce životnosti v oblasti vysokocyklové únavy. Autor v práci prokázal schopnosti samostatné vědecké práce a systematického výzkumu i kritického hodnocení získaných výsledků.

Domnívám se, že cíle práce byly v plné míře dosaženy. Konstatuji, že předložená disertační práce splňuje kritéria, jak je vymezuje zákon č. 111/1998 Sb. paragraf 47 odst. 4, tj. že obsahuje původní výsledky, které byly uveřejněné nebo jsou přijaté k uveřejnění.

Doporučuji práci k obhajobě.



Milan Růžička