

# ROZVOJ VIRTUÁLNÍ SIMULACE V KONSTRUKCI MECHANICKÝCH LISŮ THE DEVELOPMENT OF VIRTUAL SIMULATION IN DESIGN OF MECHANICAL PRESSES

Hlaváč, J., Čechura, M., Kubec, V., Círek, M.

Centrum výzkumu konstrukce tvářecích strojů, KKS, FST, ZČU v Plzni, Česká Republika

## Abstrakt

An article discusses the development of virtual simulation methods used for the construction of mechanical presses frames. Article describes specific for virtual simulation made in the past. There is a sample of current virtual simulations performed on an identical mechanical press. Comparison consists not only of comparison of results of each simulation, but also of their potential.

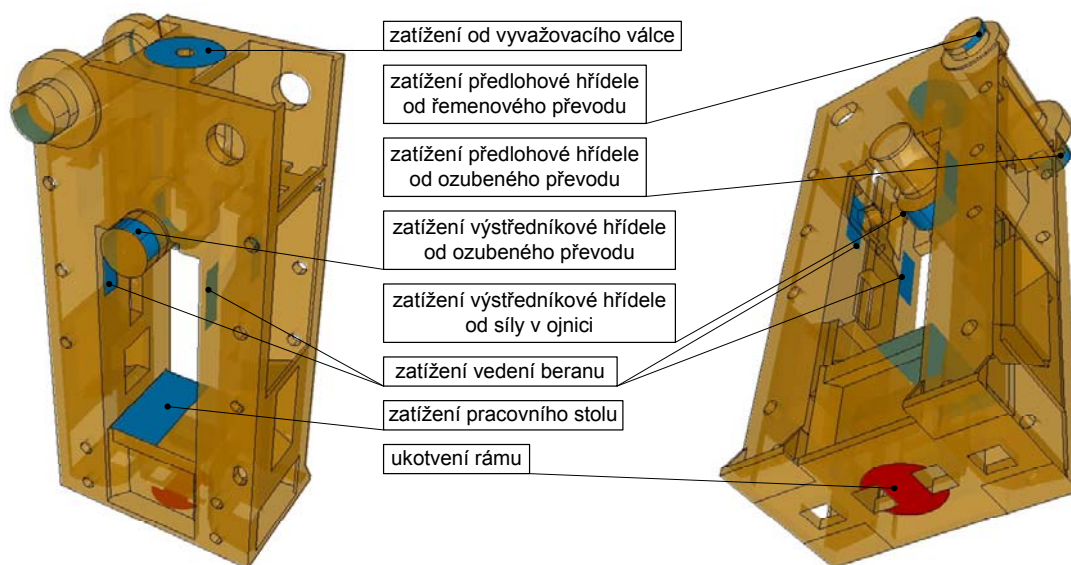
## 1. Úvod

V rámci námi prováděných odborných a poradenských činností jsme byli požádáni o provedení podrobné napěťové analýzy virtuálního modelu stojanu mechanického lisu s aktuálními okrajovými podmínkami, se zpřesněním detailů modelu, a to v současné době dostupnými moderními výpočtovými prostředky. Protože stejný stojan byl již námi, v době počátků virtuálního modelování a výpočtů MKP řešen, provedli jsme tedy přepočít totožného stojanu mechanického lisu a vzájemně porovnání nových a starých výsledků. Porovnání nebylo samovolným aktem, účel spočíval v potvrzení, nebo vyvrácení vlivu provedených nutných úprav virtuálního modelu pro výpočet dnes a v minulosti. Je třeba podotknout, že v minulosti prováděné simulace byly prezentovány jako věrohodné. Z následující práce je zřejmé, s jakými výsledky jsme mohli disponovat dříve a k jakým výsledkům docházíme dnes.

## 2. Podmínky původního výpočtu

Původní výpočet byl proveden na sklonku roku 2007. V té době byl skupinou konstrukce tvářecích strojů používán software I-DEAS a výpočetní technika byla úměrná době (jedno-jádrové procesory Intel P4 o pracovní frekvenci do 2 GHz, operační paměť do 1 GB, neexistence SSD disků, ...). Výpočetní výkonnost tedy byla v porovnání se současností značně omezená.

Obdobné porovnání lze sledovat i při porovnání virtuálních modelů. Původní model, vzhledem k malým výpočtovým kapacitám, obsahuje částečně zjednodušenou geometrii (malá sražení a zaoblení modelována jako ostré rohy, malá vybrání a otvory nemodelovány, ...). Podstatným zjednodušením původního modelu bylo modelování stojanu s hřídelemi (předlohová a výstředníková) jako jeden celek – bez použití, dnes běžné, kontaktní úlohy. Kompletní model byl tvořen 3D elementy typu tetrahedron s maximální velikostí elementu 80÷100 mm.



Obrázek 1 Místa okrajových podmínek

Okrajové podmínky výpočtu (viz. Obrázek 1) jsou pro všechny výpočty zachovány. Jedná se o uchycení sto-

janu v prostoru a o umístění, směry a velikosti sil.

### 3. Výpočetní modely

Výpočetní modely reprezentují mechanický lis, který je pro výpočet zjednodušený na stojan, předlohou a výstředníkovou hřídel, které jsou ke stojanu přidány z důvodu reálnějšího zadávání okrajových podmínek.

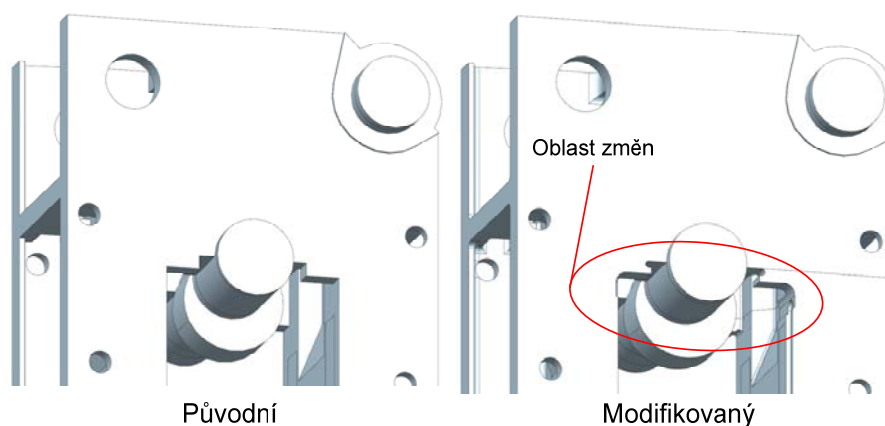
#### 3.1 Model A – původní výpočet

Aby byl původní výpočet porovnatelný s nově prováděnými byl původní model s původními okrajovými podmínkami přepočítán v aktuálním software.

Geometrie modelu byla převedena z původního software. Okrajové podmínky byly zadány shodně s původními.

#### 3.2 Model B - modifikovaný stojan

Modifikovaný stojan se od původního modelu liší přesnějším namodelování přechodu mezi stojinou a horní příčkou. Původní model měl tento přechod řešen zjednodušeně – ostrým rohem s pravým úhlem. K původnímu zjednodušení bylo přistoupeno z důvodu snížení počtu elementů – snížení výpočetní náročnosti. Horní přechod byl namodelován v souladu s výrobním výkresem. Navíc byl model doplněn i o přechodové rádiusy.

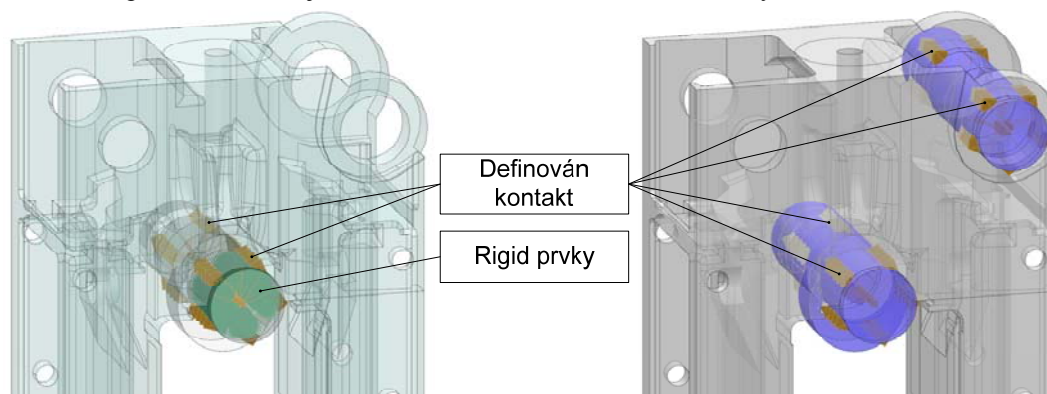


Obrázek 2 Změny provedené v přechodu mezi horní příčkou a stojinami

#### 3.3 Model C - modifikovaný stojan a aktuální okrajové podmínky

Změna okrajových podmínek posledního modelu C spočívá v použití kontaktní úlohy – hřídele jsou do modelu vloženy jako samostatné objemy a se stojanem jsou spojeny kontakty.

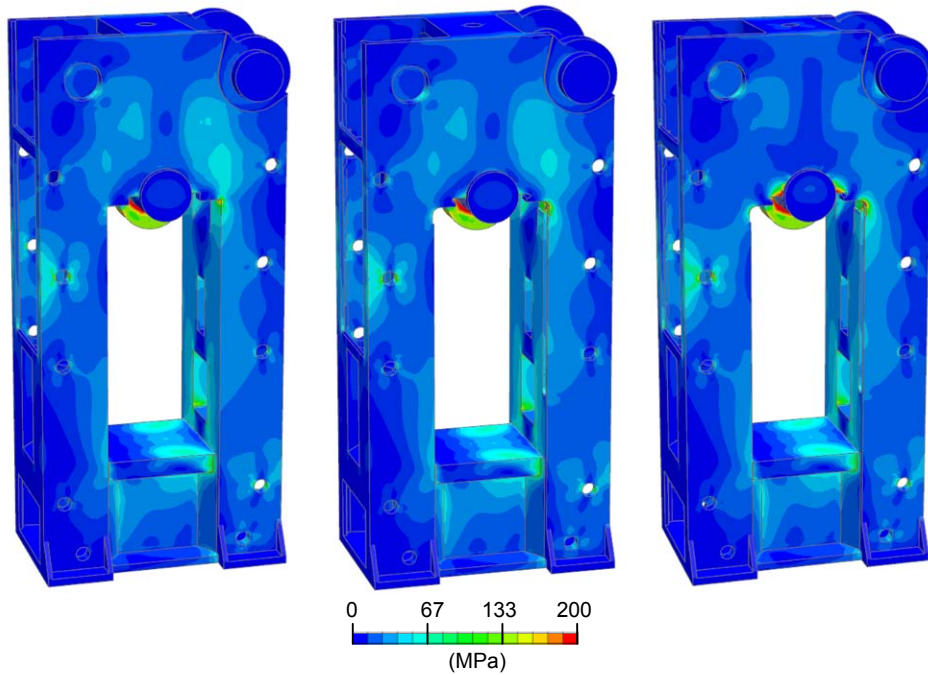
S vložením výstředníkové hřídele pomocí kontaktu vzniká nutnost na úpravu okrajových podmínek. Síla z ojnice působící na výstředník působí na hřídel momentem, který je u předchozích modelů přenesen do celého stojanu. Síla z ojnice by u takového uložení způsobila otočení výstředníkové hřídele – nestabilitu výpočtu. Pro potřeby výpočtu je tedy nutné hřídeli rotaci zakázat, což je realizováno umístěním rigidové růžice (viz. Obrázek 3) do jednoho z čepů hřídele, které jsou následně rotace v ose hřídele zakázány.



Obrázek 3 Detail kontaktně vložených hřídelí

### 4. Porovnání a analýza výsledků

První porovnání je provedeno pro modely A a B s cílem odhalit vliv přidání detailu do přechodu mezi stojinou a horní příčkou. Druhé porovnání bylo provedeno pro modely B a C s cílem odhalit vliv změny uložení hřídelí ve stojanu.



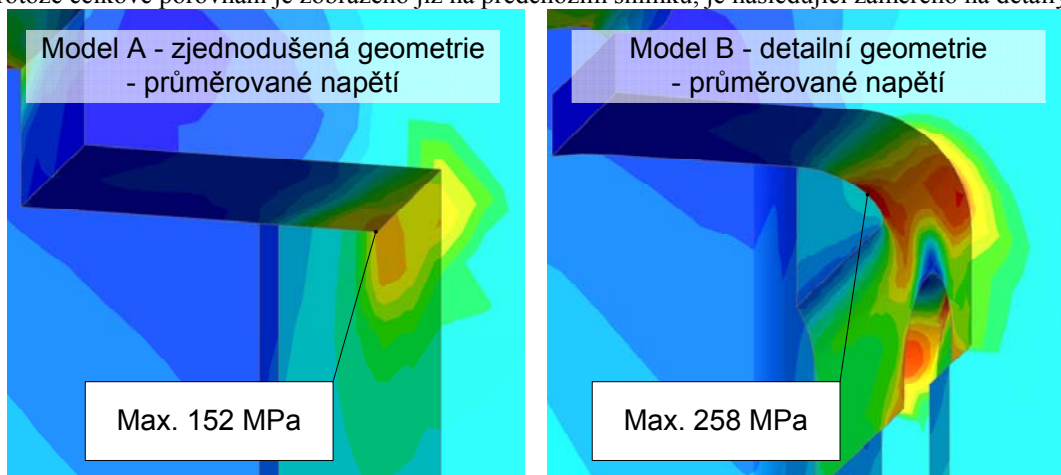
Obrázek 4 Porovnání výsledků napětí von Mises (zleva: model A, B a C)

Obrázek 4 zobrazuje celkové porovnání průběhů redukovaného napětí okolo stojanů jednotlivých modelů. Z výsledků je na první pohled zřejmé, že ve spodní části stojanů k rozdílům nedošlo. Rozdíly lze vypořádat mezi modely A a B v místě přechodu, ale ovlivnění horní příčky je také nevýznamné. Model C je jiným rozložením napětí v horní příčce liší nejvíce. Je zřejmé, že napjatostní pole v horní příčce modelu C jsou o značně menších napětích, tedy dříve provedené výpočty zde vedly k dimenzování s menší bezpečností. Dle modelu C lze ušetřit na hmotnosti např. zmenšením tloušťky stěn.

#### 4.1 Vliv zjednodušení modelu

Porovnání vlivu přidání detailu na přechod mezi stojinou a horní příčka je provedeno s cílem popsání případné chyby, které se dopouští zjednodušený model A v porovnání s modelem složitějším. Složitější model B svým detailnějším modelováním přechodu, který přesně popisuje tvary a přechodové rádiusy, slibuje přesnější výpočet. Jednodušší model A má přechod mezi stojinou a příčkou řešen rohem s pravým úhlem bez rádiusu. Výpočetně je tedy podstatně jednodušší. Výhodou zjednodušení modelu A je, že lze předpokládat, že se v něm bude vyskytovat nepříznivější napětí, než tomu bude u dobře řešeného přechodu, proto se takovýto model zdá být dostatečný.

Protože celkové porovnání je zobrazeno již na předchozím snímku, je následující zaměřeno na detaily.



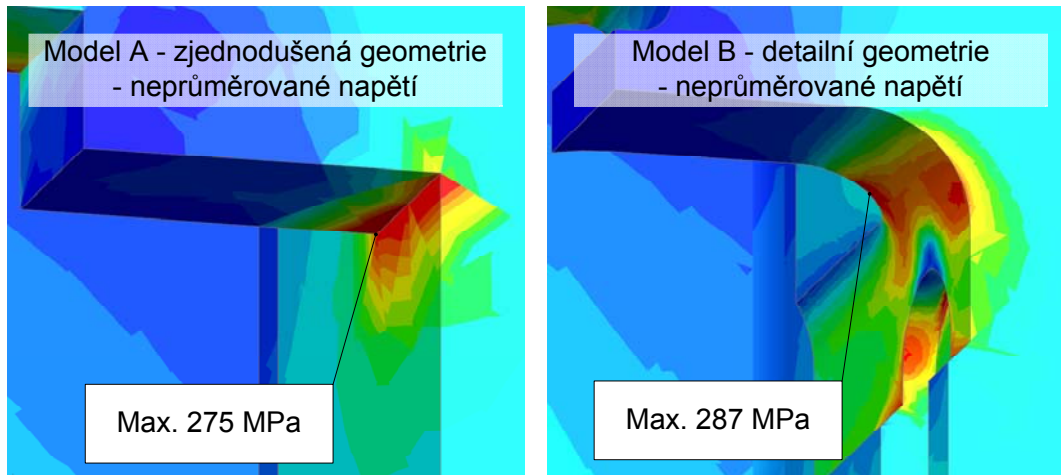
Obrázek 5 Detail rozložení napětí v přechodu mezi stojinou a příčkou

#### Analýza výsledků

Výsledky (viz. Obrázek 5) jsou v rozporu se vstupním předpokladem, podle kterého mělo být napětí v přechodu modelu B nižší než v modelu A. Přestože je v modelu B na přechodu umístěn velký rádius, je výsledkem simulace o více než 100 MPa vyšší redukované napětí.

Jedná se o selhání výpočtové metody a způsobu jejího použití pro uvedené místo. Vysvětlením může být samotné průměrování výsledků, které počítá hodnotu zobrazenou v nodu s ohledem na průměrnou hodnotu nodů okolních. Průměrování hodnot se provádí z důvodu potlačení nepřesnosti výpočtní metody. Právě v takovémto ostrém přechodu se střetávají extrémní hodnoty, takže zobrazená průměrná hodnota je výrazně nižší, než výsledek výpočtu. Vysoký rozdíl mezi hodnotami sousedních nodů naznačuje nedostatečnou hustotu sítě – provádí se kontrola na tzv. Energy norm error. V době provádění prvních výpočtů byla hodnota chyby na hraně dostatečností (5,33 %), ale vzhledem k použitému hardware již nešla dále snížit. Díky dnešní výpočtní technice by již byla považována za nedostatečnou, proto by došlo k zahuštění sítě v místě rohu.

Zhuštěním sítě se ale u konečno-prvkového modelu ostrého rohu dopočítáme extrémně vysokého napětí – limitně se blížícímu nekonečnu. Na skutečném stroji se takto přesný roh nikdy vyskytovat nemůže, vždy bude v rohu rádius nebo sražení o konečném rozměru. Takto ostrý roh by také zkušený konstruktér do místa přechodu nenavrhl, virtuálně však musel být namodelován jen pro zjednodušení geometrie.



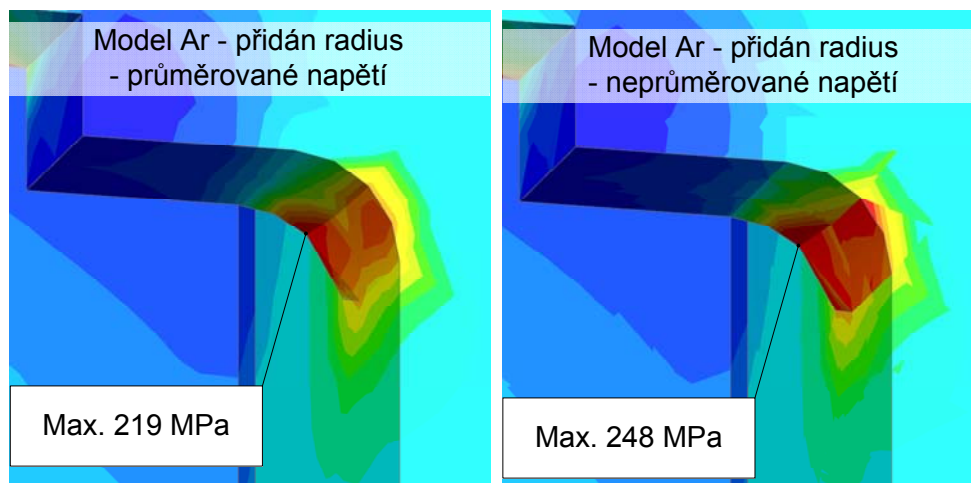
**Obrázek 6** Detail rozložení napětí v přechodu mezi stojinou a příčkou – zobrazeny neprůměrované hodnoty napětí

Z obrázku (Obrázek 6) je zřejmý vliv neprůměrování výsledků napětí především na modelu se zjednodušenou geometrií, kde maximální hodnota dosahuje prakticky dvounásobné hodnoty napětí průměrovaného. Naopak u detailního modelu došlo jen k nepatrnému navýšení hodnoty napětí, což potvrzuje vysokou kvalitu modelu a sítě.

U detailnějšího modelu B je chyba modelu jen 4,22 %, což je již přijatelná hodnota.

#### Úprava modelu A na model Ar

Protože výsledky modelu A byly nepřesné a model B vychází napětově hůře, přistoupili jsme k úpravě modelu A. V modelu Ar je přidán rádius o velikosti R100 na místo přechodu mezi stojinou a horní příčkou. Tato úprava je skutečnému modelu bližší s tím, že detailní úpravy stojanu jsou dále zanedbány. Je nutné konstatovat, že takto upravený model by byl v době řešení prvotního modelu A již na hraně řešitelnosti, nebo zcela neřešitelný! Nově přidávaný rádius nebyl v síťovém modelu zpřesněn, byla zachována původní velikost elementu. V rádiu jsou tedy jen 4 elementy, což z dnešního pohledu je velmi málo.



**Obrázek 7** Detail rozložení napětí v přechodu mezi stojinou a příčkou

### Analýza výsledků

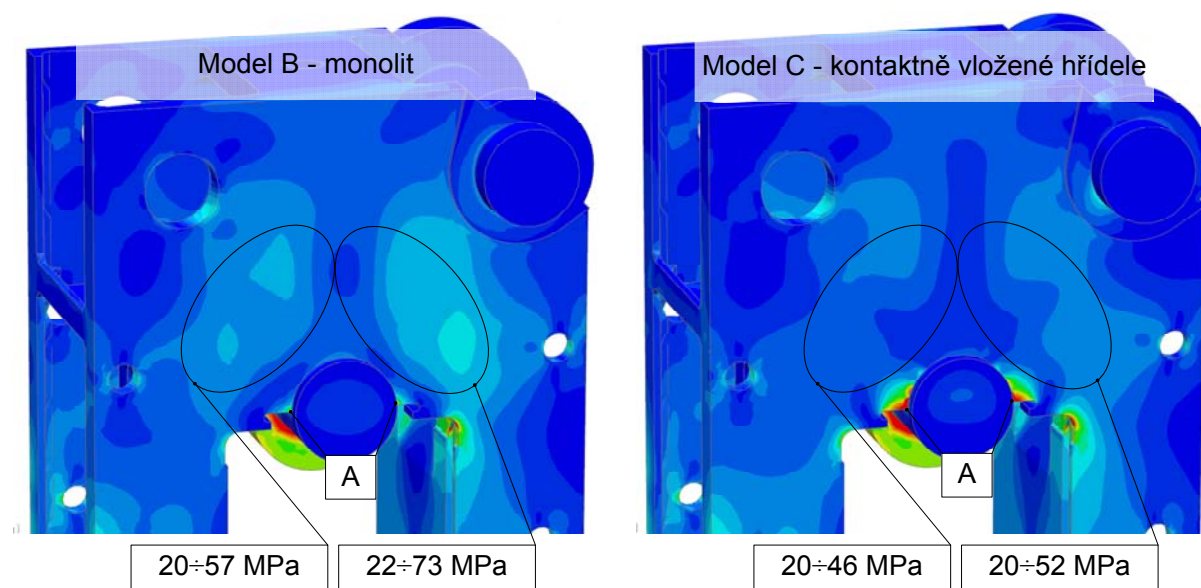
Výsledky (viz. Obrázek 7) vykazují lepší shodu mezi výsledky průměrovaného a neprůměrovaného napětí než tomu bylo u modelu A. V porovnání s modelem A jsou maximální hodnoty napětí v přechodu u neprůměrovaného napětí nižší, což potvrzuje předpoklad, že přechodový rádius je vhodnou konstrukční úpravou.

Porovnáme-li výsledky modelu Ar s výsledky modelu B, zjistíme, že hodnoty napětí jsou u modelu B vyšší, což je v rozporu s předpokladem, že přechodový rádius napětí snižuje. Takovéto zjištění podporuje zjištění z porovnání modelů A a B, kde napětí vycházelo vyšší právě u modelu B, což není zcela logické. Rozpor je tedy skryt jinde.

Z modelu B vycházející vyšší napětí v přechodu, je jistě způsobeno vlivem detailního modelování. Především v porovnání modelů A a B (Obrázek 5 a Obrázek 6), jsou zřetelné detailní úpravy.

### 4.2 Vliv uložení hřídelí

Zhodnocení vlivu vložení hřídelí do modelu pomocí kontaktní úlohy je provedeno pro modely B a C, jelikož výsledky pevnostní analýzy jsou pro modely A a B v okolí uložení hřídelí, kde je vliv vložení nejvýznamnější, jsou prakticky shodné. Porovnání proto bude zaměřeno na horní příčku, ve které se nacházejí největší rozdíly.



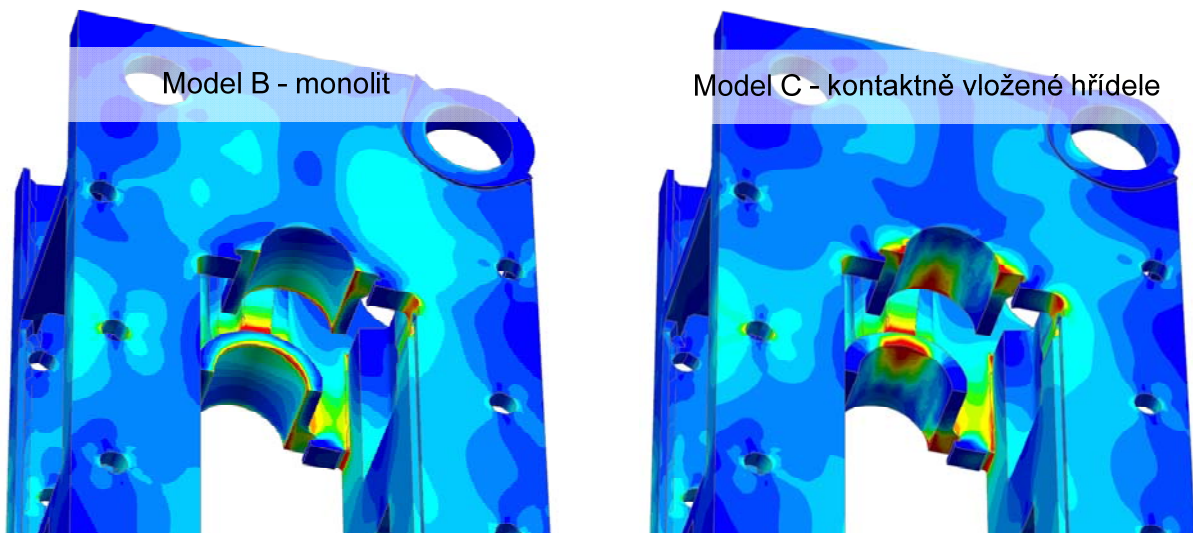
Obrázek 8 Průběhy napětí na horní příčce

### Analýza výsledků

Obrázek 8 zobrazuje průběhy napětí na horní příčce modelu B (monolit – pevně spojené hřídele se stojanem lisu) a modelu C (kontaktně vložené hřídele). Celkově lze pozorovat, že model B vykazuje vyšší hodnoty napětí než model C, což je jistě způsobeno rozdílným spojením hřídele se stojanem. Hřídel je zatížena kroutícím momentem, který je u modelu B kompletně přenesen do stojanu – okolí uložení hřídele stojanu je tedy zatíženo smykovým napětím. U modelu C se do stojanu přenáší jen taková část kroutícího momentu, jaký je vlivem tření přenesen do stojanu. Takovémuto předpokladu odpovídá i nerovnoměrnost mezi levou a pravou stranou horní příčky, která je znatelně rozdílnější u modelu C.

Protože je uložení hřídelí v modelu C realističtější, než v modelu B, lze předpokládat, že i průběh napětí v modelu C bude blíže realitě. Protože je napětí ve starším modelu B vyšší, tak tato rozdílnost nemohla způsobit nebezpečí nedostatečného dimenzování stojanu, mohlo dojít pouze k předdimenzování oproti skutečné potřebě.

Obrázek 8 v místech A zobrazuje hranu ložiskové pánve, kde napětí v modelu C (max. 330 MPa) dosahuje vyšších hodnot než v modelu B (max. 153 MPa). Tato napětíová špička je správně vyšší u modelu C, protože tam dochází vlivem kontaktního spojení ke svírání hřídele ložiskem – model má nulovou toleranci uložení. Ve skutečnosti k takovémuto svírání v takové míře nedochází, protože ložisková pánve má příslušné vůle v uložení.



**Obrázek 9 Průběhy napětí na horní příčce v okolí ložisek výstředníkové hřídele**

Obrázek 9 zobrazuje spodní pohled na horní příčku stojanu lisu. Na obrázku jsou odstraněny hřídele, nabízí se tedy detailní pohled na vliv uložení na průběhy napětí v místě jejich uložení. U modelu C je názorně vidět rozložení napětí v ložisku, které je takto skutečně namáhán prohýbající se hřídelí. Vlivem pevného spojení hřídelí se stojanem v modelu B je vyztužená celá horní příčka, což je pozorovatelné na nepatrně vyšších napětích v modelu C.

## 5. Zhodnocení vlivu nových simulací na výsledky původních výpočtů

Část věnovaná vlivu detailu přechodu prokazuje, že zjednodušením složitého přechodu do ostrého rohu, které bylo v době řešení jediným řešitelným (výkon výpočetní techniky), jsme získali nesprávné výsledky. Vstupní předpoklad, že zjednodušením přechodu do ostrého rohu získáme méně příznivé výsledky a tedy následné dimenzování bude proto nadsazené, se ne zcela potvrdil. Jako problém se ukázalo samotné zobrazování výsledků v ostrém přechodu. Metoda konečných prvků v ostrém rohu dochází k chybným, extrémním hodnotám napětí, proto se správně zobrazují hodnoty průměrovaného napětí. Právě zobrazení průměrovaného napětí vedlo k nepřesnosti.

Detailně modelovaný přechod modelu B vykazuje větší špičky napětí kvůli vrubovému účinku zeslabení, což nebylo dopředu odhadnutelné. Detailní modelování bylo také v době vzniku původních simulací neproveditelné.

Část věnovaná vlivu uložení hřídelí potvrdila vstupní předpoklady, kterými bylo rozlišené zatížení horní příčky stojanu. Hlavní rozdíl je způsoben přenosem kroutícího momentu přenášeného výstředníkovou hřídelí. Tento kroutící moment je bezzbytku přenesen do horní příčky u modelu s pevně spojenými hřídeli se stojanem, kdežto u modelu s kontaktním uložením je kroutícím momentem stojan zatížen jen do té míry, kolik se přenese vlivem tření.

### Závěrečná doporučení:

- vytvářet modely s maximem detailů, zanedbávat jen drobnosti
- využívat kontaktní úlohu (nebo obdobné metody) místo pevného spojení samostatných dílů
- vytvářet „rozumně“ náročné modely dle schopností a možností výpočetní techniky
- správně definovat okrajové podmínky tak, aby co nejlépe odpovídaly realitě

Tento příspěvek vznikl v rámci prací Centra výzkumu konstrukce tvářecích strojů na ZČU v Plzni.

### Použitá literatura

- [1] Čechura, M., Círek, M., Hlaváč, J., Kubec, V. - LIS LZK 4000 - Návrh konstrukčních variantních řešení svařovaného stojanu s výpočty jeho deformací a rozložení napětí, výzkumná zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2007
- [2] Čechura, M., Staněk, J. - Tvářecí stroje: Hydraulické lisy, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 1999, ISBN 80-7082-480-8
- [3] Staněk, J. - Základy stavby výrobních strojů: Tvářecí stroje, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2001, ISBN 80-7082-738-6