

---

**STANOVENÍ PŘÍČIN ROZTRŽENÍ HYDROPNEUMATICKÉHO AKUMULÁTORU  
HYDRAULICKÉHO LISU LISOVACÍ LINKY**

**CAUSE EXPLOSION DETERMINATION OF HYDROPNEUMATIC  
ACCUMULATOR OF COACHWORK PRESS MACHINE OF MOLDING LINE**

**Radek Knoflíček<sup>45</sup>**

**ABSTRAKT:**

*Obsahem tohoto příspěvku je zjištění příčiny exploze hydropneumatického akumulátoru u hydraulického lisu, určeného pro výrobu karosářských dílů v automobilovém průmyslu.*

**ABSTRACT:**

*Paper contains of cause explosion determination of hydropneumatic accumulator of coachwork press machine in automotive industry.*

**KLÍČOVÁ SLOVA:**

*Hydraulický lis, hydropneumatický akumulátor, mezní stav konstrukce, porucha stroje.*

**KEYWORDS:**

*Hydraulic press, hydropneumatic accumulator, weaving loom of construction, machine breakdown.*

## **1 ÚVOD**

Tento článek vychází z dlouholeté znalecké praxe autora tohoto příspěvku, kdy v nedávné minulosti byl vypracován řádný znalecký posudek [1], ve kterém byla definována jedna z položených otázek takto: **ověřte, co bylo příčinou exploze hydropneumatického akumulátoru.**

Na základě řádné objednávky byl výrobcí hydraulického lisu dodán předmětný hydropneumatický pístový akumulátor, jako subdodávka. Svislý hydraulický lis byl součástí lisovací linky, která byla určena pro výrobu dílců tvářením pro automobilový průmysl. Na lisovací lince došlo během pracovní směny k explozi (roztržení) hydropneumatického akumulátoru. Roztržený HPA, který se rozlétl po nejbližším okolí, poškodil jak lisovací linku, tak i další vybavení výrobní haly. Celková hmotná škoda se pohybovala řádu miliónů Kč.

Podstatou vysoce odborného díla tedy bylo hodnocení technického stavu předmětného hydropneumatického akumulátoru (v textu dále i jako zkratka HPA) před jeho poškozením explozí (roztržením za chodu tvářecího stroje) a po jeho poškození. HPA byl konstrukčně-provozní částí (komponentou) svislého hydraulického lisu. Nezbytnou součástí znalecké práce bylo, mimo jiné náležitosti, i šetření na místě instalace a provozování svislého hydraulického lisu (až po mimořádné události v provozu).

---

<sup>45)</sup> Knoflíček, Radek, Doc. Dr. Ing. – Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, Technická 2, 616 69 Brno, telefon: 5 4114 2474, e-mail: [knoflicek@fme.vutbr.cz](mailto:knoflicek@fme.vutbr.cz)

## 2 NÁZVOSLOVÍ [2]

**Hydraulický lis** – je typ tvářecího stroje, který pro vyvinutí potřebné tvářecí síly využívá účinku stlačeného oleje, působící na píst hydromotoru, který přes pístnici pohání beran. Beran koná zdvih mezi horní a dolní polohou a je na něm upnuta horní část nástroje. Na desce nepohyblivého stolu je upnuta dolní část nástroje. Na jeden zdvih beranu se přetvoří polotovar do požadovaného tvaru polovýrobku nebo hotového výrobku. Hydraulické lisy se obvykle používají jako tažné nebo kovací, nejčastěji pro tváření kovových plechů nebo předkovek za tepla nebo za studena především v automobilovém průmyslu.

**Hydropneumatický akumulátor** – je prvek hydraulických obvodů v pohonné technice, kdy nosnou energii je stlačený olej, který odevzdává práci. Účelem hydraulického akumulátoru je akumulovat přebytky stlačeného oleje a vyrovnávat krátkodobé tlakové špičky nebo krátkodobé ztráty a tento během pracovního cyklu dodávat do hydraulického pohonu příslušného stroje s tekutinovými pohony tak, aby byla zajištěna bezchybná funkce hydraulického pohonu stroje. HPA je tlaková nádoba válcového tvaru, která je na obou koncích opatřena zatěsněnými víky. Uvnitř se pohybuje plovoucí píst. Z jedné strany pístu je v poloprostoru obsažen stlačený olej, z druhé strany je protitlak vytvářen technickým plynem.

**Mezní stav** – je stav napjatosti konstrukce, po jehož překročení dojde například k nepřijatelnému růstu deformace, k porušení, vzniku trhlin apod. Definice dle ČSN 01 0102 zní: **Mezní stav** je takový stav objektu, ve kterém musí být další využití objektu přerušeno pro:

- neodstranitelné porušení bezpečnostních požadavků, nebo
- neodstranitelné překročení předepsaných krajních mezí stanovených parametrů, nebo
- neodstranitelné snížení efektivnosti provozu pod přípustnou hodnotu, nebo
- nutnost provedení generální opravy

**Mezní stav konstrukce** – je stav provozované konstrukce, který je nepřijatelný z hlediska předepsané funkce. Při splnění kritéria tohoto lomu dojde k **vyřazení konstrukce z provozu** (buď zásahem provozovatele nebo samovolně – poruchou, destrukcí, havárií, zřícením a pod.)

Na základě řádné objednávky byl výrobcí hydraulického lisu dodán předmětný hydropneumatický pístový akumulátor, jako subdodávka. Svislý hydraulický lis byl součástí lisovací linky, která byla určena pro výrobu dílců tváření pro automobilový průmysl. Na lisovací lince došlo během pracovní směny k explozi (roztržení) hydropneumatického akumulátoru. Roztržený HPA, který se rozlétl po nejbližším okolí, poškodil jak lisovací linku, tak i další vybavení výrobní haly. Celková hmotná škoda se pohybovala řádu milionů Kč.

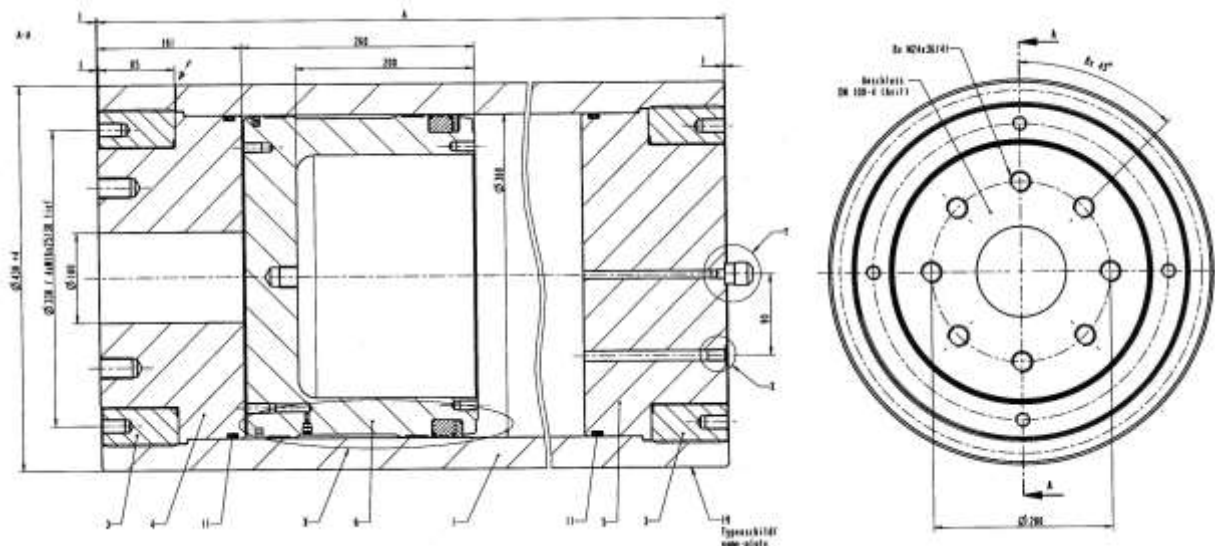
## 3 POPIS STROJE A HPM

### 2.1 Stručný popis a základní technické údaje Hydropneumatického pístového akumulátoru

Popis: pístový rovnotlaký hydraulicko-pneumatický akumulátor s náplní dusík/olej a s plovoucím pístem. Základní technické údaje:

- Celkový objem: 150 litrů
- Max. pracovní tlak: 350 bar
- Přípoj pro olej: příruba AVIT DN 100

- Plnicí ventil: Olaer
- Přípoj pro manometr: G 1/4"
- Vnější rozměry: průměr 430 mm, délka 2095 mm

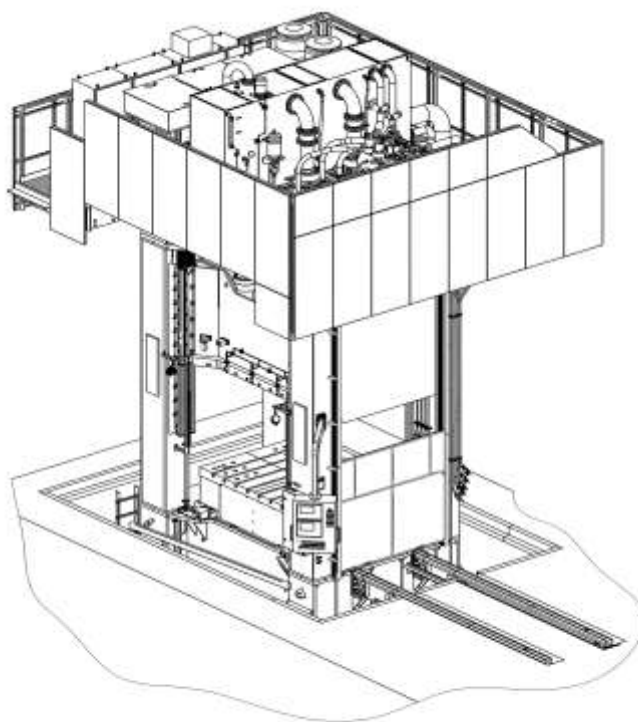


Obr. 1 – Dílenský sestavní výkres hydropneumatického akumulátoru

Fig. 1 – Detail draw of hydropneumatic accumulator

## 2.2 Základní technické údaje svislého hydraulického lisu

- Jmenovitá dopředná síla (F) na beranu: 10 000 kN
- Zpětná síla na beranu: 1 000 kN
- Rychlosti pohybu beranu:
  - Přibližovací: 700 mm/sec.
  - Pracovní při F = 5 000 kN: 200 mm/sec.
  - Pracovní při F = 10 000 kN: 30 mm/sec.
  - Zpětná: 700 mm/sec.
- Zdvih beranu: 1 100 mm
- Výška sevření (mezi deskou stolu a beranu): 800 mm
- Upínací plocha desky beranu: (2 000 x 2 800) mm
- Upínací plocha desky stolu: (2 000 x 2 800) mm
- Největší nosnost vyjíždějícího stolu: 30 tun
- Příkon hlavního elektromotoru: 110 kVA
- Celkový příkon: 430 kVA



*Obr. 2 – Svislý hydraulický lis*

*Fig. 2 – Vertical hydraulic press*

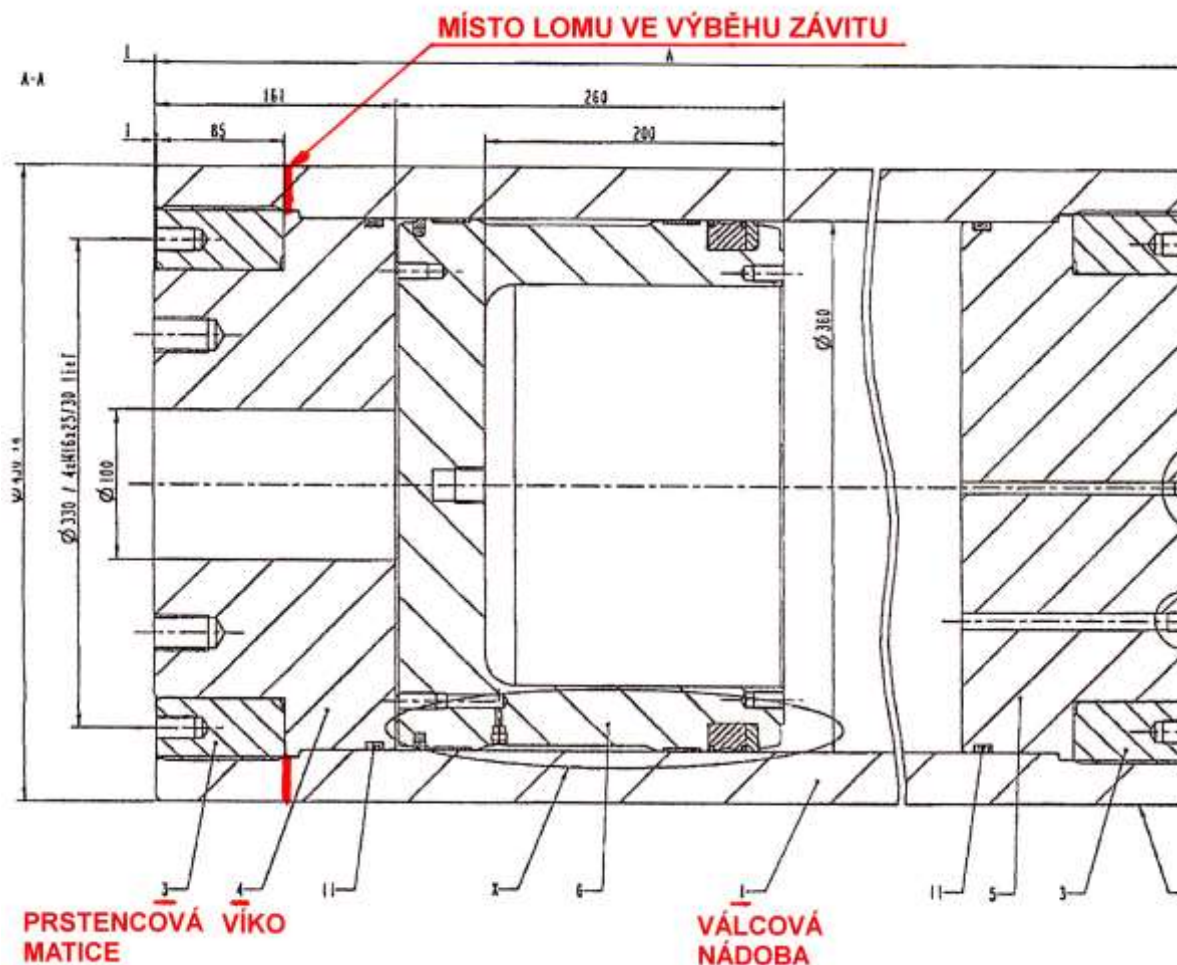
## **4 NÁLEZ A POSUDEK**

### **4.1 Posouzení správnosti návrhových výpočtů HPA**

Znalci byla předložena podrobná výpočtová zpráva, která se týkala návrhu vhodného typorozměru hydropneumatického akumulátoru, který by měl být do budoucna zabudován do hydraulického obvodu pohonu beranu hydraulického lisu u výrobce. V předloženém návrhovém výpočtu nebyly shledány žádné chyby z hlediska metodického a matematického, provedeném ze strany výpočtáře výrobce lisu a podstoupeném k verifikačnímu výpočtu na simulačním SW u společnosti, která HPA dodala. **Díličí závěr:** bez obsahových a formálních nedostatků.

### **4.2 Posouzení dodržení podmínek pro provozování HPA a lisu**

Z předložených spisových podkladů k mimořádné události vyplynulo, že bezprostředně po nastalé havárii v provozu provedli pracovníci zainteresovaných stran prvotní šetření. Z prvotního šetření a následně také dle osobně provedeného šetření znalce na místě samém (posouzením předmětného HPA) vyplývá, že k roztržení HPA došlo tak, že došlo k porušení soudržnosti válcové nádoby utržením části jeho stěny i se zašroubovaným víkem na straně tlakového oleje. Místem iniciace lomu kovové součástky se stal přechod vnitřního závitů válcové nádoby do její hladké části – viz obrázek číslo 3 níže.



Obr. 3 – Znárodnění místa lomu na detailu výkresu HPA

Fig. 3 – Crash place in detail draw of HPA

V okamžiku roztržení HPA byl beran lisu s horním tvářecím nástrojem v dolní úvratí zdvihu, tedy na konci doby držení tahu zpracovávaného materiálu ve spodní poloze. Odečtem z řídicího systému svislého hydraulického lisu bylo zjištěno, že beran lisu do data nehody vykonal celkem 314 233 zdvihů, což je zanedbatelný počet vzhledem k celkové době živostnosti tohoto typu výrobního stroje, kdy se uvažuje se zdvihy beranu v řádu desítek milionů!

Bylo provedeno měření koncových tlaků na HPA u vedlejšího, typově identického hydraulického lisu, umístěného v téže lisovací lince, kdy naměřené hodnoty tlaku oleje (150 a 310 barů) a technického plynu – dusíku (135 a 310 barů) nepřekročily hodnoty tlaků oleje a dusíku dle technických podmínek od výrobce HPA, kdy nejvyšší pracovní tlak je dovolen v hodnotě 350 barů.

Rovněž bylo možno konstatovat, že byly splněny i legislativní náležitosti k provozu HPA a to platné výchozí revize a prohlídky tlakové nádoby s příslušnými osvědčeními (certifikáty od autorizovaných osob).

Tvářená součástka – díl karoserie automobilu – byla z hlediska vyvození potřebné tvářecí síly na beranu bez závad, a to z hlediska technologického postupu výroby.

**Dílčí závěr:** na základě studia předložené dokumentace bylo možno konstatovat, že na místě provozování svislého hydraulického lisu, začleněného do výrobní linky na lisování součástek, jakož i na technologii výroby karosářského dílce nebyly shledány provozně-technologické nedostatky, které by vedly k tomu, že by byl tvářecí stroj přetěžován, resp. byl přetěžován hydropneumatický akumulátor, zabudovaný do hydraulického obvodu lisu, což by vedlo k jeho havárii.

#### **4.2 Posouzení roztrženého HPA z hlediska fraktografie a lomové mechaniky**

Na základě hodnocení lomové plochy – viz obrázek č. 4, 5 a 6 – předmětného HPA bylo možno konstatovat, že k porušení válcové nádoby HPA (což je vnější plášť) došlo únavovým mechanismem. K iniciaci únavového lomu došlo v místě výběhu vnitřního závitů. K vlastní iniciaci došlo z vícero míst, rovnoměrně rozložených po obvodu vnitřního průměru závitů, což nepřímo ukazuje na vrubový účinek závitů z hlediska koncentrace napětí. Vlastní únavová část lomové plochy vykazuje pravidelnou kresbu tzv. odpočinkových (postupových) čar, která svědčí o rovnoměrném zatěžování předmětné součásti, náhodné přetěžování lze téměř vyloučit, a která ukazuje na relativně homogenní mikrostrukturu. Malá plocha náhlého dolomení nepřímo ukazuje na relativně malou amplitudu napětí (vzhledem k únavové pevnosti dané součásti).



*Obr. 4 a 5 – Vzhled lomové plochy na odtržené části válcové nádoby HPA i s vnitřní prstencovou maticí (foto znalec)*

*Fig 4 and 5 – View of fracture surface on separated part with internal nut cylindre part of HPA (picture take off by expert)*



*Obr. 6 - Vzhled lomové plochy na odtržené části válcové nádoby HPA i s vnitřní prstencovou maticí (foto znalec)*

*Fig 6 – View of fracture surface on separated part with internal nut cylindre part of HPA (picture take off by expert)*

**Dílčí závěr vzniklý za konzultativního přispění experta na fraktografii:** na základě studia předložené dokumentace, jakož i osobně provedené prohlídky pozůstatků roztrženého HPA lze konstatovat, že došlo k porušení HPA únavovým mechanismem, přičemž na iniciaci a šíření tohoto lomu se podílel vrubový účinek závitů a patrně i nerovnoměrné přenášení sil v závitovém spoji. Přetěžování hodnocené komponenty hydraulického lisu lze s vysokou pravděpodobností vyloučit.

#### **4.3 Posouzení materiálového složení HPA**

Vlastními prostředky a náklady provedl výrobce lisu metalografické šetření tak, že z obou konců (čel) válcové tlakové nádoby byl odebrán vzorek materiálu, tedy jak z explozí porušeného konce nádoby HPA, tak i z neporušeného konce, kde byla kapilárními zkouškami zjištěna trhlinka na dně závitů. Z odebraného materiálu s trhlinkou byly provedeny zkoušky pro stanovení pevnostně – plastických charakteristik a nárazové práce a dále byl posouzen chemický rozbor a metalografie.

**Dílčí závěr za konzultativního přispění experta na materiálovou analýzu** vyplývá, že:

- chemické složení oceli, ze které byla vyrobena válcová tlaková nádoba předmětného HPA odpovídá oceli St52-3 a také oceli St52-4, což je obvyklá předepsaná jakost pro konstrukční materiály tlakových nádob.
- Z hlediska čistoty (obsah doprovodných prvků, množství a typ vměstků) lze konstatovat, že použitá ocel je velice čistá a že nebyly pozorovány vměstky, ovlivňující pevnost oceli, ze které byl vyroben plášť HPA.
- Pozorovaná ferito-perlitická mikrostruktura odpovídá patrně stavu po řízeném ochlazení z doválcovací teploty. Výrazná řádkovitost této struktury však může vést k nežádoucí anizotropii mechanických vlastností (zejména charakteristik plasticity a houževnatosti).

- Mechanické zkoušky provedené v podélném směru odpovídají pozorovanému strukturnímu stavu. Naměřené vysoké hodnoty nárazové energie potvrzují vysokou úroveň metalurgického zpracování.
- Z posouzení lomové plochy je zřejmé, že se jedná o únavový lom, který se šířil ze dna posledního závitu, vyrobeného na vnitřní straně válcové nádoby.

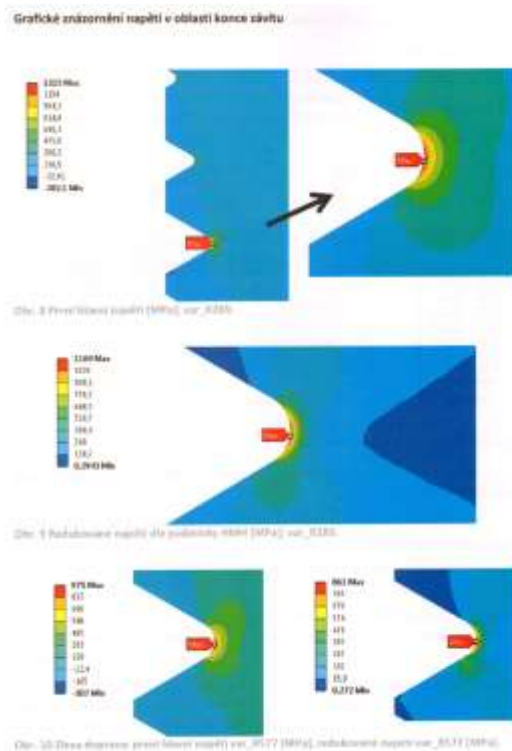
#### **4.4 Posouzení tvaru, rozměru a provedení konstrukce vnějšího pláště HPA moderními výpočetními metodami**

##### **4.4.1 Výpočty válcového pláště HPA pomocí metody konečných prvků (MKP) programovým systémem ANSYS**

Na vlastní náklady výrobce hydraulického lisu bylo zadáno posouzení mezního stavu závitového spoje válcové nádoby HPA a to vzhledem k meznímu stavu únavové pevnosti konstrukčního materiálu, ze kterého byl plášť, jako tlaková nádoba, zhotoven. Analýzu metodou konečných prvků provedlo renomované specializované pracoviště technické univerzity v Brně.

Tímto ústavem, bylo na základě definovaného úkolu, provedeno vytvoření výpočtového modelu, proveden vlastní výpočet na programovém systému ANSYS, dále byly prezentovány a analyzovány zjištěné výsledky.

Expertiza byla zaměřena na místo porušení válcové nádoby po jejím roztržení explozí, tj. v místě výběhu vnitřního závitu do hladké části – viz také obrázek 7 níže.



**Obr. 7 – Analýza MKP pomocí ANSYS**

**Fig. 7 – FEM Analysis by ANSYS programme**



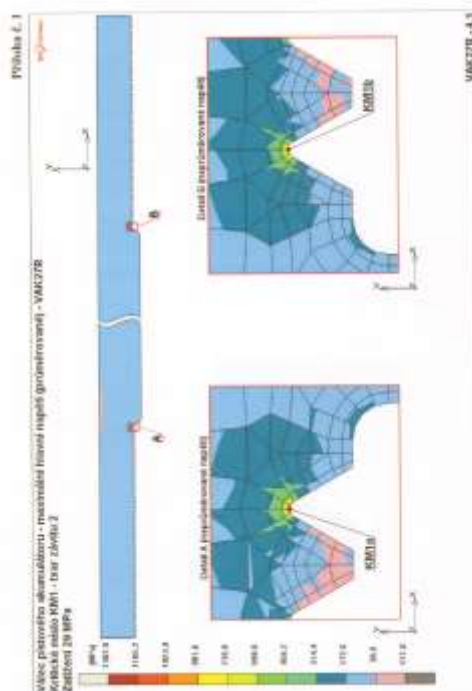
Pohledy dle obrázku 7 na koncentrované napětí v místě posledního závitu na konci vnitřního závitu v přechodu do válcové části tlakové nádoby bez závitu, kdy je patrné překročení mezních hodnot pevnosti pro konstrukční materiál (ocel ze kterého byla nádoba vyrobena) po cyklickém únavovém zatěžování HPA, což vedlo k porušení soudržnosti vlastní tlakové nádoby lomem.

Závěr z této expertizy zní (výňatek z podstatného obsahu sdělení pro tento případ): všechna horní napětí cyklu překračují mez kluzu, takže dochází ke vzniku pružně plastických deformací (doplněno znalcem: daného konstrukčního materiálu).

**Dílčí závěr:** vzhledem k cyklickému namáhání válcové části pláště HPA došlo k překročení mezního stavu konstrukce HPA a tím tedy k lomu. Je zřejmé, že k lomu došlo v místě, kde vnitřní závit z hlediska napětíového se chová jako koncentrátor napětí. Z hlediska konstrukčního je tento způsob zatěsnění válcové nádoby pro daný způsob činnosti HPA na stroji nevhodný.

#### *4.4.2 Výpočty válcového pláště HPA pomocí MKP programovým systémem MARC*

Na vlastní náklady výrobce lisu byl proveden výpočet obdobného typu HPA pro obdobný hydraulický lis, který byl vyroben a dodán do jiné provozovny. Cílem bylo zjištění, zdali analýzou válcové nádoby HPA metodou konečných prvků, avšak provedenou v programovém systému MARC, budou obdrženy výsledky obdobné či rozdílné jako získané v ANSYS-u v předchozím případě. V tomto případě bylo rovněž (na základě definovaného úkolu) provedeno vytvoření výpočtového modelu, proveden vlastní výpočet, dále prezentovány a analyzovány zjištěné výsledky.



***Obr. 8 – Analýza MKP pomocí MARC***

***Fig. 8 – FEM Analysis by MARC programme***

Expertiza byla zaměřena na EVENTUELNÍ místo porušení válcové nádoby typově obdobného HPA na jiném tvářecím stroji jiné lisovací linky u shodného uživatele PŘED jejím EVENTUELNÍM roztržením explozí, tj. v místě výběhu vnitřního závitu do hladké části – viz také obrázek 8 výše.

Pohledy dle obrázku 8 na koncentrované napětí v místě posledního závitu na konci vnitřního závitu v přechodu do válcové části tlakové nádoby bez závitu, kdy je patrné překročení mezních hodnot pevnosti pro konstrukční materiál (ocel ze kterého byla nádoba vyrobena) po cyklickém únavovém zatěžování HPA, což BY EVENTUELNĚ vedlo k porušení soudržnosti vlastní tlakové nádoby lomem.

Závěr z této výpočtové zprávy zní (výňatek z podstatného obsahu sdělení pro tento MODELOVÝ případ):

- Pro zadané maximální provozní zatížení a rozsah pracovních teplot pístový akumulátor vyhovuje z hlediska obvykle požadovaných bezpečností meznímu stavu tvárného lomu.
- Pro zadané stacionární maximální střídavé provozní zatížení, pro materiál (doplněno znalcem: daný konstrukční materiál válcového pláště) a rozsah pracovních teplot pístový akumulátor nevyhovuje v kritických místech KM1, KM1a, KM1b (viz obrázek 8 výše) z hlediska obvykle požadovaných bezpečností meznímu stavu únavy.

**Dílčí závěr:** tento modelový případ ověřil – verifikoval správnost závěrů, získaných v předchozím případě výpočty pomocí metody MKP, provedené na reálném HPA pomocí SW ANSYS.

Poznámka znalce: Výpočty by byly ještě průkaznější, pokud by se pracovalo se skutečnou hodnotou  $R_m = 560$  MPa a ne s předpokládanými hodnotami 825 a 1000 MPa, což však na správnost obdržených výsledků nemá výrazný vliv.

## **5 ZÁVĚR**

Předmětem tohoto článku bylo zjištění příčiny exploze hydropneumatického akumulátoru. Na základě předem stanovené otázky znalci bylo na ni možné odpovědět takto:

Příčinou roztržení (exploze) hydropneumatického akumulátoru, zabudovaného do hydraulického obvodu pohonu beranu Svislého hydraulického lisu lisovací linky na výrobu dílů tvářením, bylo nevhodné provedení výběhu prvního závitu na vnitřní straně tlakové nádoby válcového tvaru, v místě působení tlakového oleje.

Vzhledem k počtu zdvihů přestavení pístu HPA přesunutím mezi krajními polohami uvnitř jeho válcové nádoby, se stal výběh prvního vnitřního závitu na straně tlakového oleje HPA místem koncentrace napětí při cyklickém zatěžování. Po určitém počtu zdvihů přesunutí pístu HPA, přímo úměrnému počtu zdvihů beranu lisu, došlo zákonitě k poruše soudržnosti HPA a to vlivem překročení meze pevnosti konstrukčního materiálu jeho válcové nádoby. Tím došlo k překročení mezního stavu konstrukce HPA za jeho chodu pod tlakem a k jeho roztržení explozí.

Poznámka znalce: Vnitřní zavit slouží k tomu, aby do díry válcové nádoby HPA opatřené právě tímto závitem, byla montáží našroubována těsnící víka, jak z levé, tak z pravé strany. Utěsněním válce dvěma víky z obou stran se tak HPA stává tlakovou nádobou, kdy v jednom utěsněném prostoru, odděleném plovoucím pístem, působí stlačený olej a ve druhém prostoru

působí stlačený technický plyn. K definici a popisu konstrukce a funkce HPA, hydraulického lisu a k meznímu stavu konstrukce – viz Názvosloví tohoto příspěvku.

## **6 LITERATURA**

- [1] KNOFLÍČEK, Radek: *Znalecký posudek číslo 1453-51/13 ze dne 26. 8. 2013*
- [2] KOLÍBAL, Zdeněk; KNOFLÍČEK, Radek; BLECHA Petr; VAVŘÍK, Ivan: *Technologičnost konstrukce a retrofiting výrobních strojů*, Nakladatelství VUTIM, 2010, Brno, 335 stran. ISBN 978-80-214-3765-4