

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF CONTACT STRESSES AND CONTACT FATIGUE

P. Macura*, A. Fiala*, R. Halama*

***Summary:** The paper is devoted to the analysis of the contact stresses and contact fatigue, especially at the rolls of rolling mills and railway wheels. The experimental and analytical solving of contact stresses between rolls and rolling stocks were performed. The method of photoelasticity was used for experimental analysis, the finite element method was used for numerical analysis of railway wheels. New testing device is made for the experimental analysis of contact fatigue.*

1. Úvod

Kontaktní únava může být příčinou porušení některých strojních součástí. Typickým příkladem jsou porušení válců válcovacích stolic anebo železničních kol. U válců válcovacích stolic jsou jednou z příčin porušení velká kontaktní napětí jednak mezi válci a tvářeným materiálem, jednak mezi válci navzájem u víceválcových stolic. U železničních kol dochází ke kontaktní únavě následkem velkých kontaktních napětí mezi kolem a kolejnicí. Dalším důsledkem kontaktní únavy je porušení ozubených kol převodovek. Problematika kontaktní únavy se zaměřením na výše uvedené součásti je řešena na našem pracovišti a některé dílčí výsledky jsou náplní předloženého článku.

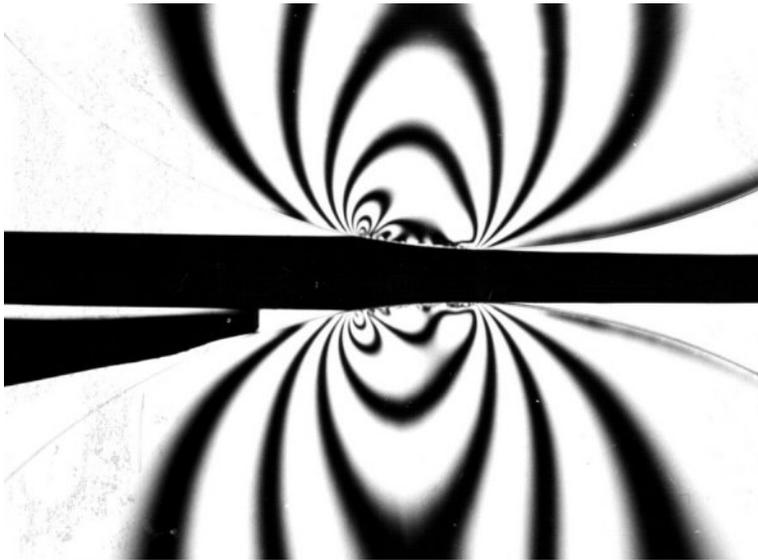
2. Experimentální analýza kontaktních napětí

V první části příspěvku je ukázán postup při experimentální analýze kontaktních napětí mezi válcem a tvářeným materiálem pomocí fotoelasticimetrické a fotoplastimimetrické metody. Tyto metody umožňují experimentálně určit napětí nejen na kontaktní ploše válců a válcovaného materiálu, ale i v celém objemu válců a tvářeného materiálu.

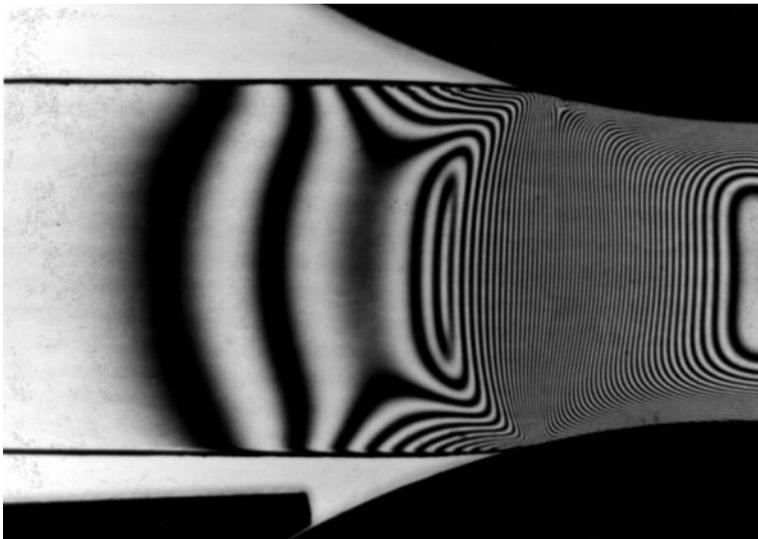
2.1. Způsob provedení experimentu

Podle způsobu provedení experimentu lze získat současně s průběhy napětí na kontaktní ploše buď napětí ve válcích, nebo napětí ve válcovaném materiálu anebo současně i ve válcích a tvářeném materiálu. Aby experiment odpovídal skutečnému válcovacímu procesu, použila se v polariskopu místo běžného zatěžovacího zařízení laboratorní válcovací stolice. V prvním

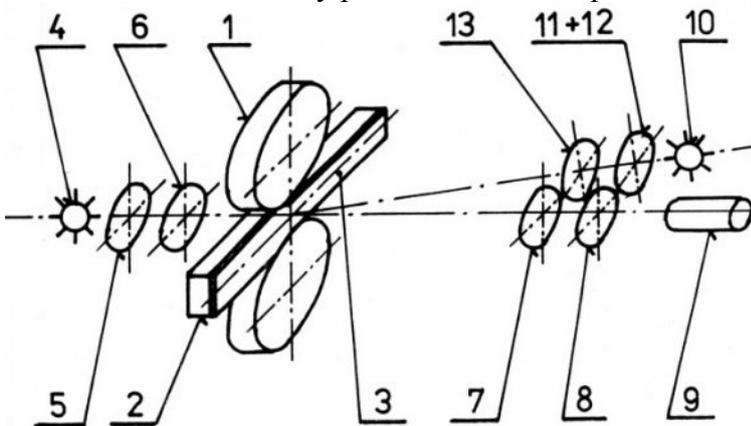
* Prof. Ing. Pavel Macura, DrSc., Ing. Antonín Fiala, Ing. Radim Halama: Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15; 708 33 Ostrava – Poruba; tel. +420.596 993 598; fax: +420.596 916 490; e-mail: pavel.macura@vsb.cz



obr. 1: Izochromaty polovičních řádů ve válcích

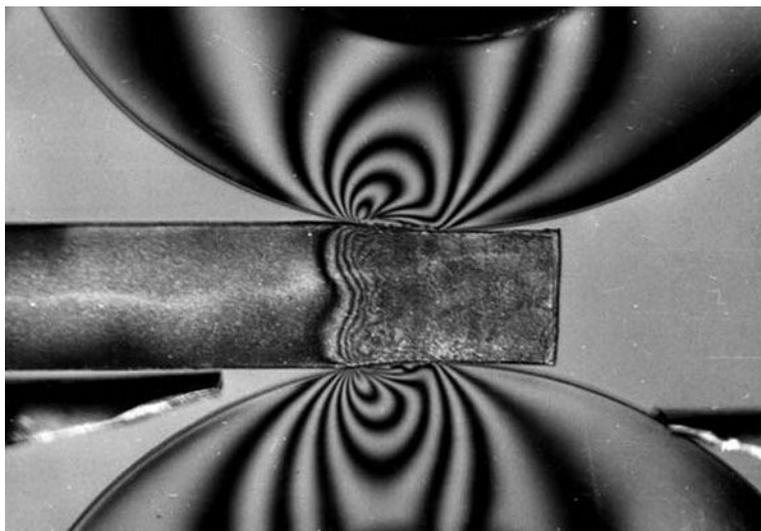


obr. 2: Izochromaty polovičních řádů v provalku



obr. 3: Transmisně reflexní polariskop

případě, kdy chceme zjistit napětí na kontaktní ploše a ve válcích, válcoval se mezi válci z opticky aktivního materiálu kovový materiál, pro simulaci válcování za tepla olovo. Zjištěný průběh izochromatických čar polovičních řádů je uveden na obr. 1. Ve druhém případě, kdy nás zajímá kromě kontaktních napětí i napjatost ve tvářeném materiálu, tak se válcoval opticky citlivý materiál mezi kovovými válci, zjištěný průběh izochromat polovičního řádů pro tento případ ukazuje obr. 2. Z něho je vidět, že napětí a deformace ve válcovaném materiálu vznikají již velmi daleko před vstupní rovinou válcování. Oba tyto experimenty lze provést v transmisním polariskopu s průchozím světlem. Pro současnou analýzu napjatosti ve válcích i tvářeném materiálu se navrhlo a zhotovilo speciální zařízení, tzv. transmisně reflexní polariskop, obr. 3. Mezi válci laboratorní válcovací stolice z opticky citlivého materiálu se válcuje kovový materiál, na jehož boční ploše je nalepena tenká vrstva opticky citlivého materiálu. Vzniklé interferenční čáry se pozorují a registrují současně u válců v průchozím a u provalku v odraženém světle, obr. 4. V případě řešení problematiky kontaktní únavy je vhodné provést experiment dle prvního uvedeného případu, tj. válcování kovového materiálu mezi opticky citlivými válci.

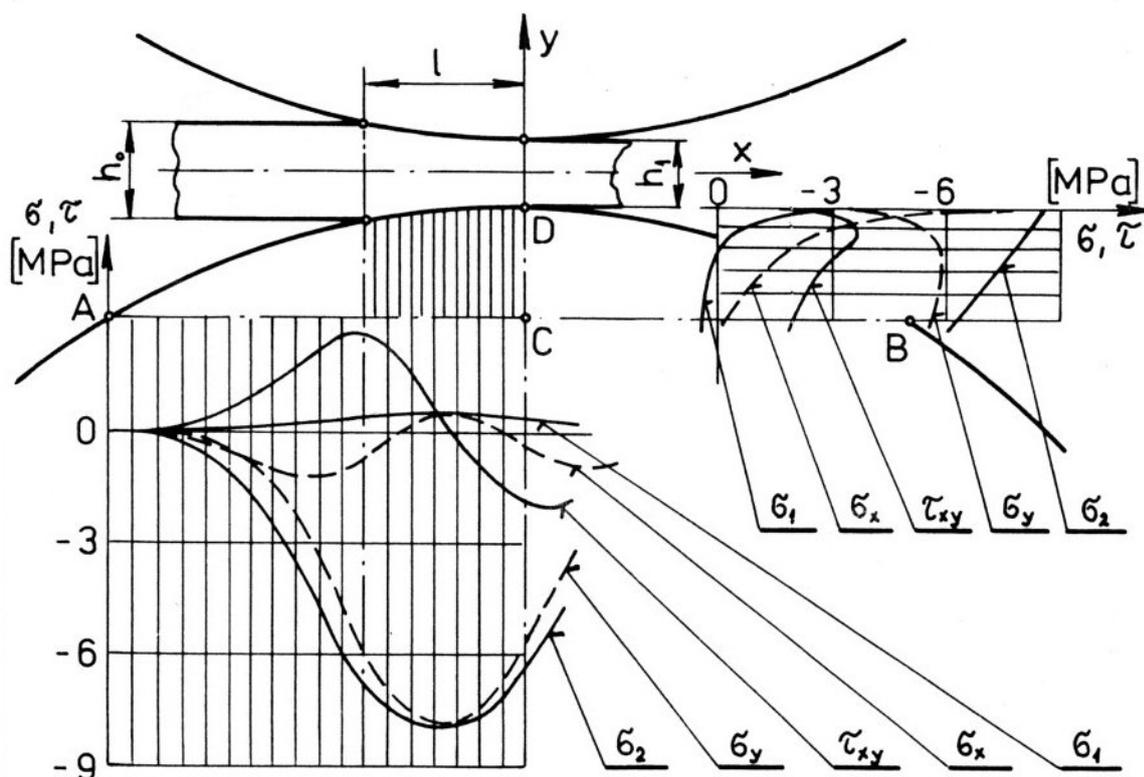


obr. 4: Izochromaty ve válcích i provalku

2.2. Postup vyhodnocení a výsledky měření

Podkladem pro vyhodnocení napjatosti válce v blízkém okolí kontaktní plochy s tvářeným materiálem jsou zjištěné průběhy izoklinných a izochromatických čar. Ty udávají základní informace o směrech a rozdílech hlavních napětí a deformací ve vyšetřovaných bodech válce. Separaci hlavních napětí pak lze provést několika metodami (Milbauer & Perla, 1959), zde se použila metoda rozdílu smykových napětí, založená na

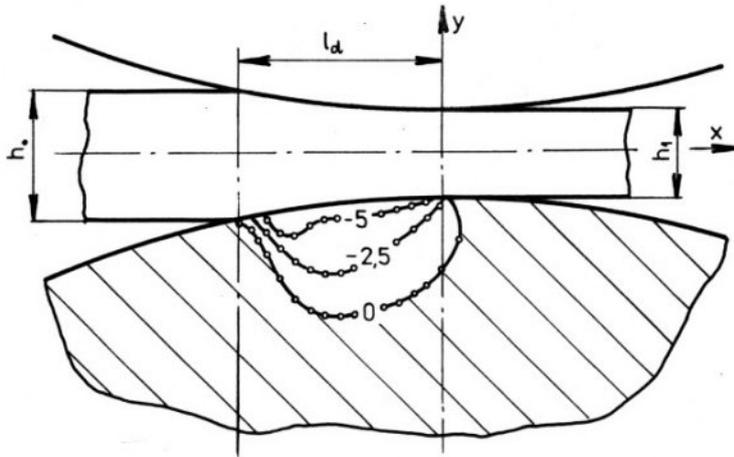
numerickém řešení statických podmínek rovnováhy integrací podél vhodně zvolených přímkových řezů, obr. 5. Nejdříve se provedla integrace podél úsečky AC a pak podél patnácti rovnoběžných úseček s úsečkou CD. Tak se získaly hodnoty složek tenzoru napjatosti v patnácti bodech kontaktní plochy válce s materiálem a v množině bodů válce v blízkém okolí této plochy.



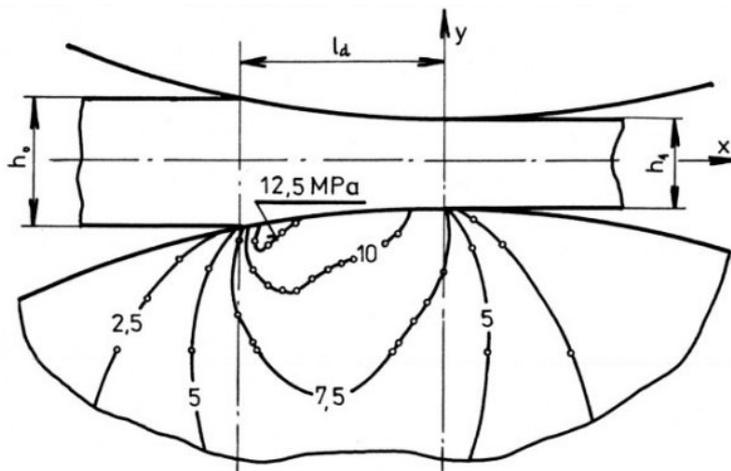
obr. 5: Separace hlavních napětí metodou rozdílu smykových napětí

Při válcování vznikne ve válci tenzorové napětíové pole, které se dá znázornit kupříkladu pomocí ekvivalenčních hladin jednotlivých složek tenzoru napjatosti, případně intenzity

napětí. Ekviskalární hladiny hlavního napětí σ_1 jsou vykresleny na obr. 6 a intenzity napětí na obr. 7. Ve vyšrafované oblasti na obr. 6 je jedno hlavní napětí σ_1 tahové, druhé σ_2 tlakové, v nevyšrafované oblasti pod kontaktní plochou jsou obě hlavní napětí tlaková. Nejvíce



obr. 6: Ekviskalární hladiny hlavního napětí σ_1



obr. 7: Ekviskalární hladiny intenzity napětí

simulující kontakt mezi kolem a kolejnicí.

3.1 Výpočet napětí na kontaktní ploše při válcování

Při výpočtech napětí na kontaktní ploše mezi válcem a tvářeným materiálem se vychází z řešení diferenciální rovnice rovnováhy napětí při válcování (Počta, 1966), která je však odvozena za použití zjednodušujících předpokladů:

$$\frac{d\sigma_r}{dx} - \frac{k}{y} \frac{dy}{dx} \pm \frac{\tau_r}{y} = 0 \quad (1)$$

σ_r normálové napětí na kontaktní ploše

τ_r smykové napětí na kontaktní ploše

namáhané místo je zřejmě těsně pod povrchem válce blízko za vstupní rovinou válcování a maximální hlavní napětí tam dosahuje hodnoty -15 MPa. Mez kluzu použitého opticky citlivého materiálu CT 200 válců je 21 MPa, modul pružnosti v tahu 2824 MPa. Přepočtem na základě modelové podobnosti vychází maximální napětí v ocelových válcích rovno -1050 MPa. Je tedy válec z opticky citlivého materiálu v oblasti pružných deformací, v ocelových válcích však už budou vznikat v blízkosti povrchu deformace plastické. Proto při následných numerických řešeních napjatosti se předpokládala i nelineární závislost mezi deformacemi a napětími.

3. Výpočetní řešení kontaktních napětí

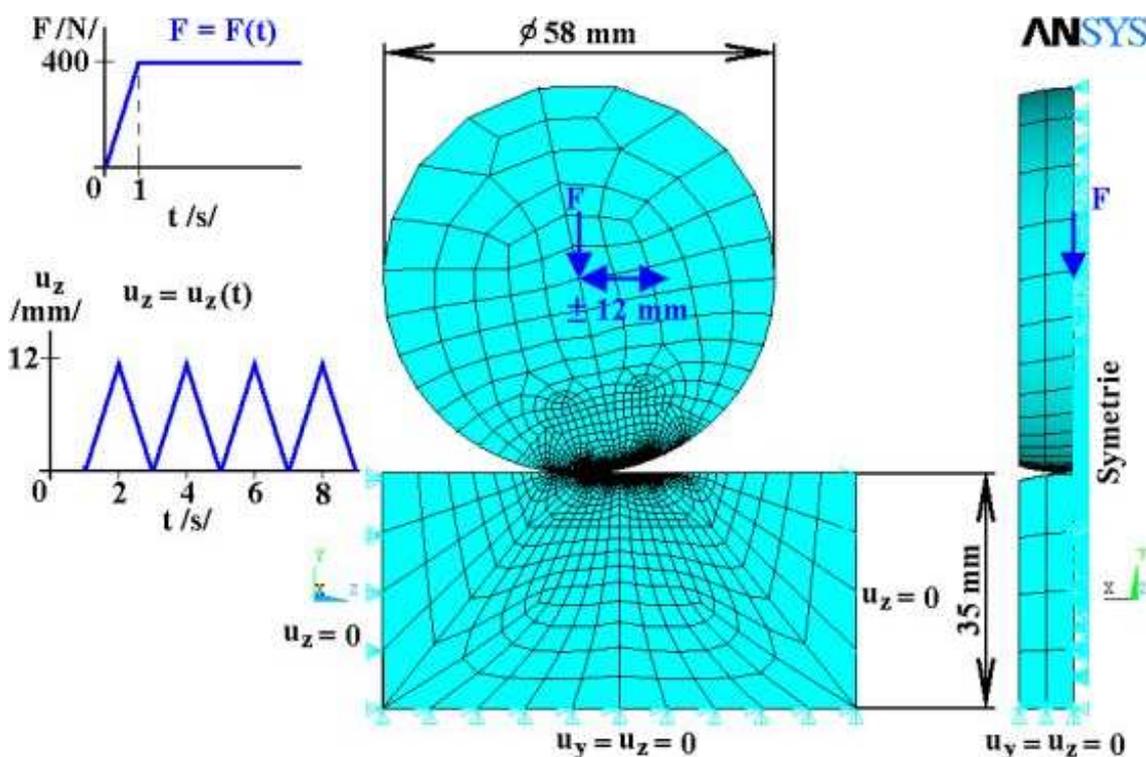
Z výpočetních řešení kontaktních napětí jsou v příspěvku uvedeny výpočty kontaktních napětí na kontaktní ploše mezi válcem a válcovaným materiálem a mezi válcem a rovinnou plochou,

k deformační pevnost válcovaného materiálu

x, y . . . souřadnicový systém jako na obr. 5

K řešení rovnice (1) je nutno znát funkční závislost mezi napětími σ_r a τ_r , ovlivněnou řadou faktorů jako materiál provalku a válců, teplota, mazání aj. Pro některé základní předpoklady této funkční závislosti se pak provedla následující řešení:

- Řešení Celikovovo – použil se předpoklad suchého tření při platnosti Coulombova zákona $\tau_r = f \cdot \sigma_r$.
- Řešení Korolevovo – předpokládá se pásmo přilnutí s lineárním průběhem τ_r v tomto pásmu.
- Řešení Siebelovo – za předpokladu vzniku částečného pokluzu a konstantní hodnoty smykového napětí τ_r podél celého oblouku záběru.
- Řešení Nadaiovo – předpokládá se kapalinné tření mezi válcem a tvářeným materiálem a smykové napětí podél oblouku záběru je dáno vztahem:



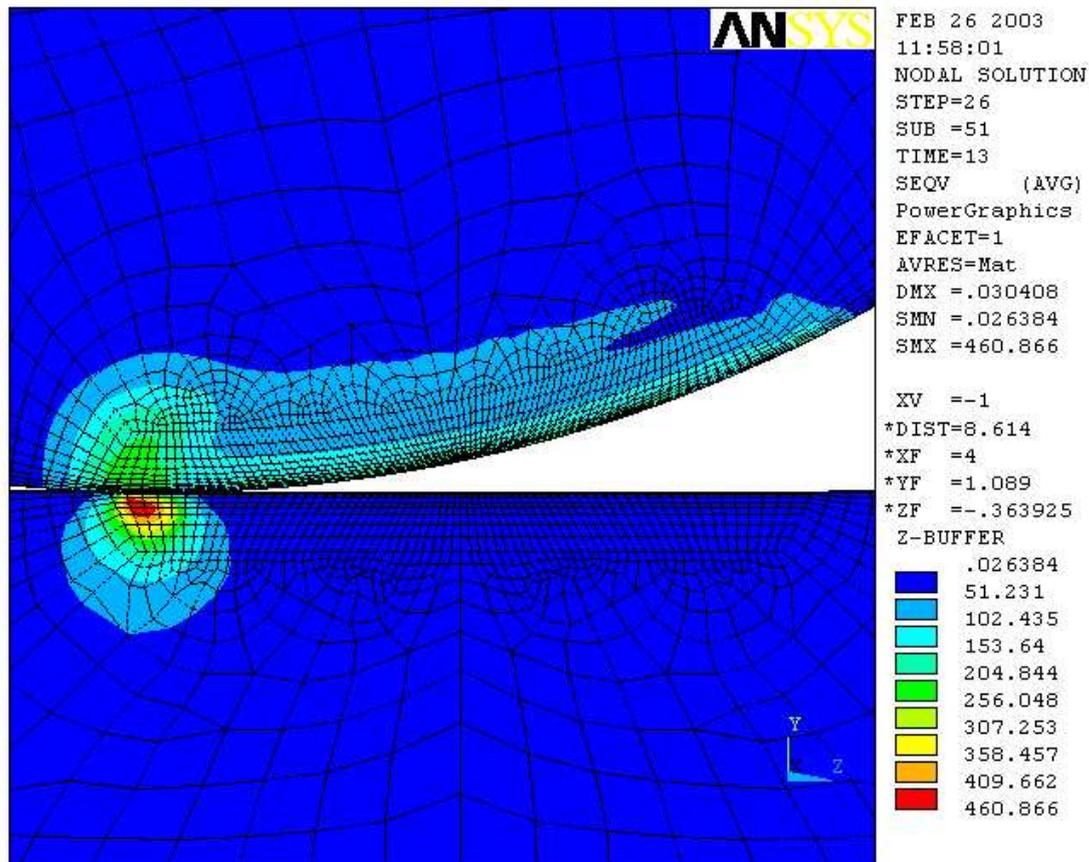
obr. 8: Výpočetní model kontaktu válce s plochou

$$\tau_r = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

η viskozita tenké vrstvičky, vzniklé mezi válcem a provalkem

$\frac{dv}{dy}$. . . gradient relativní rychlosti mezi stykovými body povrchu válce a provalku

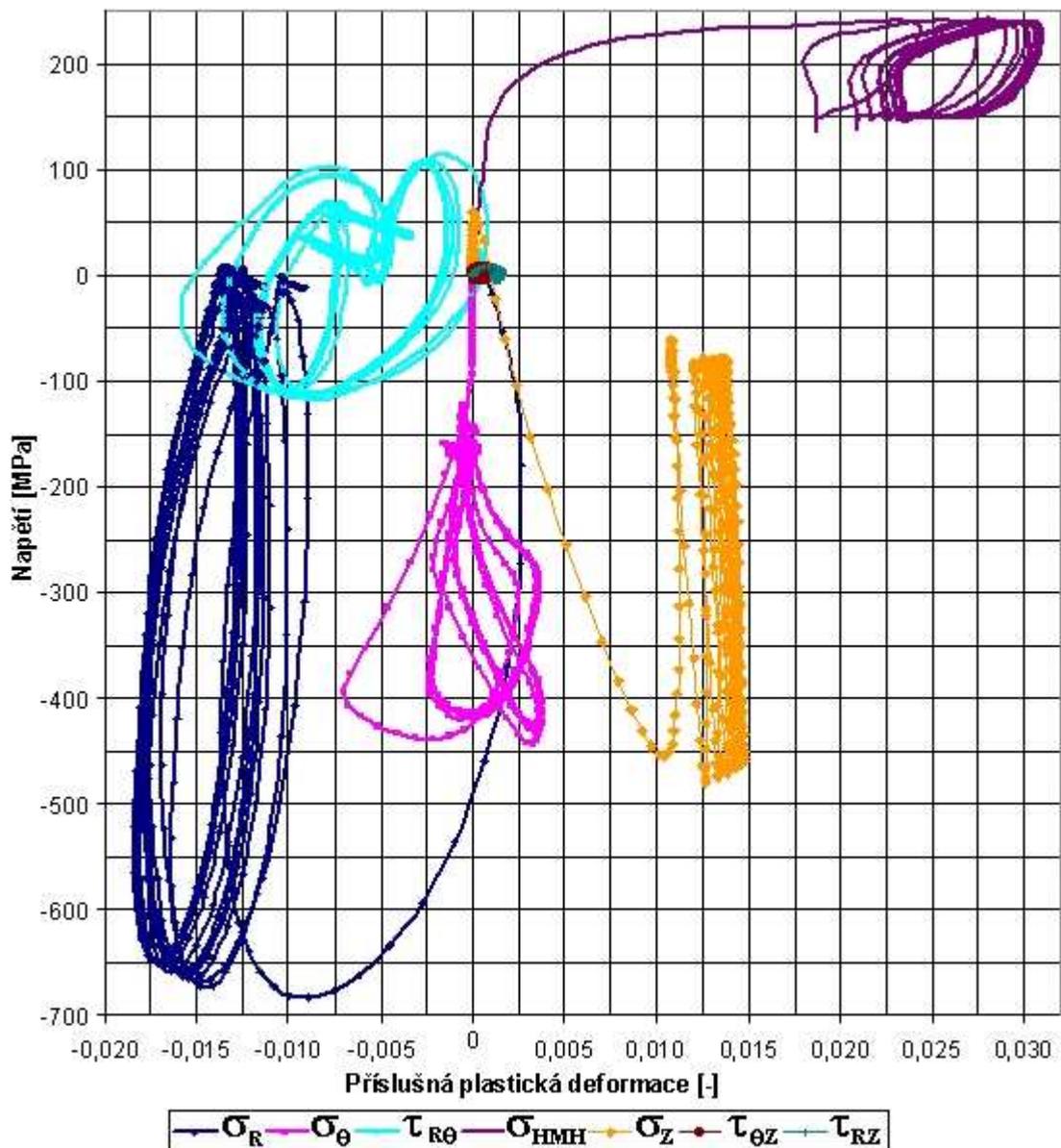
V práci autora (Macura, 1983) jsou srovnány výsledky průběhů kontaktních napětí, získaných jednak na základě výpočtů dle výše uvedených způsobů řešení, jednak experimentálně pro stejné parametry válcování.



obr. 9: Zbytková napětí v oblasti kontaktu

3.2 Numerické řešení napjatosti válce

Numerické řešení kontaktních napětí při odvalování válce po rovinné ploše, simulující kontakt mezi železničním kolem a kolejnicí, se provedlo metodou konečných prvků pomocí programu Ansys Release 6.1. Problém byl řešen jako prostorová úloha při bodovém styku s uvážením materiálové nelinearity v důsledku vzniku plastických deformací v kontaktní oblasti, obr. 8. Modelovalo se vratné odvalování kladky ze stejného materiálu a stejných rozměrů jako kladka zkušebního zařízení pro výzkum kontaktní únavy. Odvalování bylo zajištěno třením s předpokládaným koeficientem tření $f = 0,1$. Dílčím úkolem řešené úlohy bylo zjištění zátěžné síly, při které vzniknou ve zkušební kladce plastické deformace. Pak se provedly výpočty při větších zátěžných silách a po odlehčení byla pod povrchem patrná

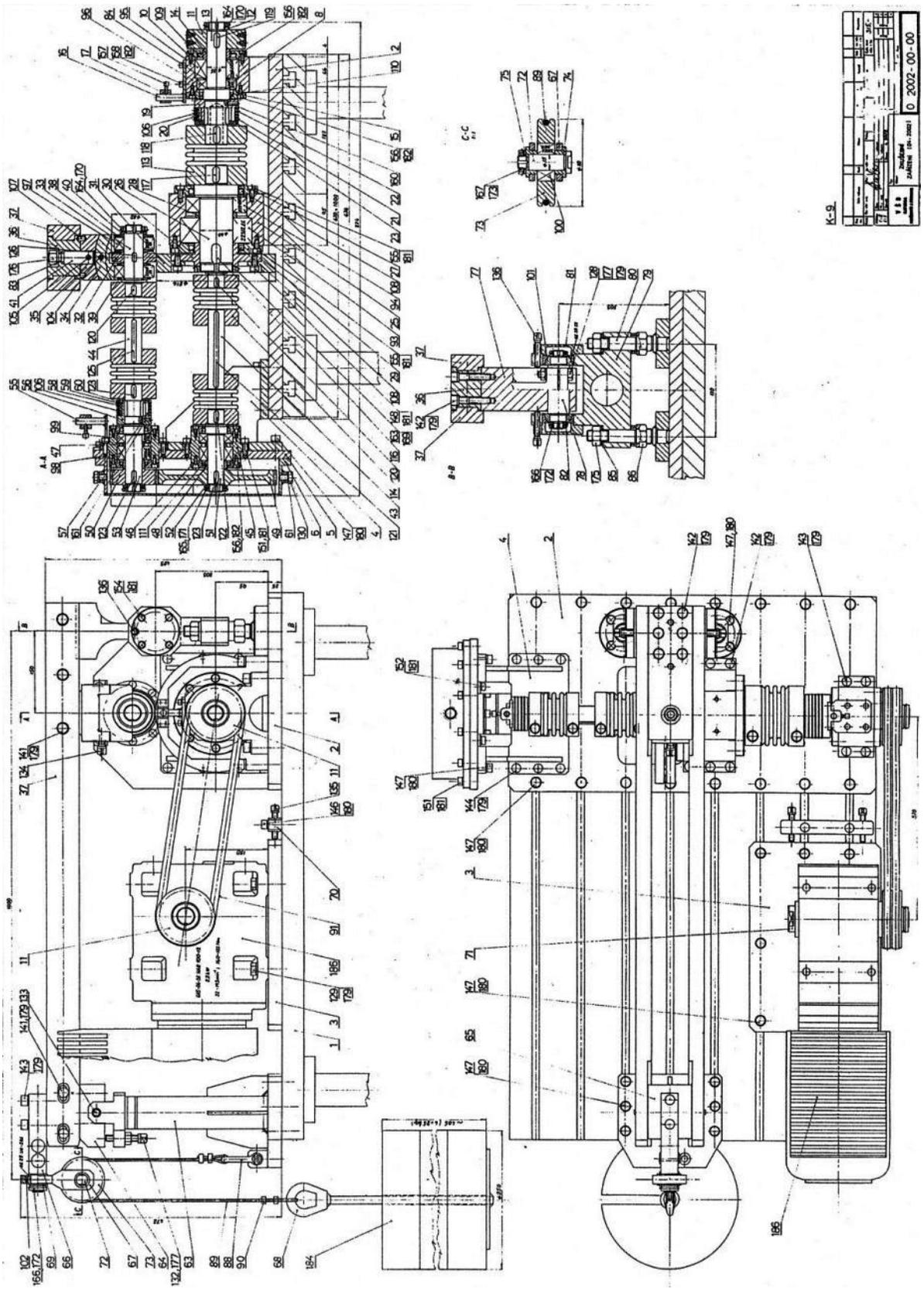


obr. 10: Hysterezní smyčky

zbytková napětí, obr. 9. Výsledky výpočtů jsou znázorněny pomocí hysterezních smyček, ze kterých je snahou stanovit předpokládaný počet cyklů do iniciace únavové trhliny, obr. 10.

4. Zkušební zařízení kontaktní únavy

Pro experimentální výzkum kontaktní únavy bylo navrženo a je vyráběno zkušební zařízení, umožňující kontaktní namáhání dvou válců při různých způsobech zatěžování a režimech provozu, obr. 11. Je možné realizovat prosté odvalování, provoz s pevně nastaveným prokluzem, s regulovatelným bržděním, s natočením os válců aj. Ke sledování vzniku a rozvoje trhlinek v důsledku kontaktní únavy se kromě metalografických metod předpokládá i využití termovizní kamery a magnetických a ultrazvukových metod.



obr. 11: Zkušební zařízení kontaktní únavy

5. Závěr

V příspěvku jsou stručně uvedeny některé výsledky experimentální a výpočetní analýzy kontaktních napětí u válců válcovacích stolic a simulovaného procesu kontaktu železničního kola s kolejnicí. Pro výzkum kontaktní únavy se připravují měření na zkušebním zařízení při různých způsobech zatěžování a provozu.

6. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory GAČR v rámci řešení grantového projektu č. 101/01/0089.

7. Literatura

Macura, P. (1983). Teoretické a experimentální řešení měrného tlaku při válcování. Hutnické listy, 38, 2, s. 92 – 98.

Milbauer, M. Perla, M. (1959) Fotoelasticimetrické přístroje a měřicí metody. Nakladatelství ČSAV, Praha.

Počta, B. (1966) Základy teorie tváření kovů. SNTL, Praha.