

# Experimentální Analýza Napětí 2007

## RESIDUAL STRESSES AT CONTACT FATIGUE OF MATERIAL ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ PŘI KONTAKTNÍ ÚNAVĚ MATERIÁLU

Pavel Macura, Rostislav Kubala<sup>1</sup>, Nikolaj Ganev, Kamil Kolařík<sup>2</sup>, Vladislav Ochodek<sup>3</sup>,  
Totka Bakalova<sup>4</sup>

**Abstract:** The paper contains some results of residual stress measurements, which have already been developed in terms of research of contact fatigue. Three methods of residual experimental stress analysis were used for the measurements – hole drilling strain gage method, x-ray method and ultrasonic method. The residual stress measurements were provided both before and after contact loading.

**Keywords:** residual stress, contact fatigue

### 1. Úvod

Ke kontaktní únavě materiálů dochází v celé řadě provozních zatížení různých součástí. Vzniká kupříkladu v případě styku železniční kolo – kolejnice, při kontaktu pracovních válců válcovacích stolic s tvářeným materiálem, případně s opěrnými válci, při záběru ozubených kol a mnoha dalších případech. Je proto třeba se věnovat této problematice jak po stránce teoretické, tak experimentální. Na katedře pružnosti a pevnosti VŠB-TU Ostrava bylo zkonstruováno a uvedeno do provozu experimentální zařízení, umožňující získávání experimentálních podkladů pro výzkum kontaktní únavy různých materiálů při různých podmínkách zatěžování.

### 2. Experimentální zařízení pro výzkum kontaktní únavy

Zkušební zařízení je ukázáno na obr. 1. Zkušebním vzorkem je cylindrická anebo bombírovaná kladka ze zkoušeného materiálu, která je v kontaktu s poháněným bubnem při nastaveném kontaktním tlaku, vyvozeném závažím, obr. 2. Zařízení umožňuje volné odvalování kladky pouze třením, anebo odvalování s pevně nastaveným prokluzem, při brždění kladky elektromagnetickou brzdou, při rovnoběžných anebo mimoběžných osách kladky a bubnu, při suchém anebo mazaném kontaktu kladky a bubnu aj. Při zkouškách jsou sledovány úbytky hmotnosti kladky po určitých únavových cyklech, jsou sledovány a fotografovány povrchové vady po jejich vzniku. Po skončeném únavovém cyklu se provádí metalografické rozborů zkušebních kladek. Současně se provádí i měření zbytkových napětí, některé výsledky jsou obsahem předloženého příspěvku.

---

<sup>1</sup> prof. Ing. Pavel Macura, DrSc., Ing. Rostislav Kubala, CSc., VŠB-TU Ostrava, FS, Katedra pružnosti a pevnosti, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: +420 596993598, e-mail: pavel.macura@vsb.cz

<sup>2</sup> Doc. Ing. Nikolaj Ganev, CSc., Ing. Kamil Kolařík, ČVUT v Praze, FJFI, Katedra inženýrství pevných látek, Trojanova 13, 120 00 Praha 2, tel.: +420 224358604, e-mail: ganev@troja.fjfi.cvut.cz

<sup>3</sup> Ing. Vladislav Ochodek, VŠB-TU Ostrava, FS, Katedra mechanické technologie, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: +420 596993513, e-mail: vladislav.ochodek@vsb.cz

<sup>4</sup> Ing. Tatka Bakalova, TU v Liberci, FS, Katedra obrábění a montáže, Hálkova 6, 461 17 Liberec, e-mail: tbakalova@abv.bg

### 3. Výsledky měření zbytkových napětí

Měření zbytkových napětí se dosud provedlo na dvou bombírovaných (vzorek 1 a 2) a dvou cylindrických vzorcích (vzorek 3 a 4) před únavovými zkouškami a jedním bombírovaným zkušebním vzorku po dvou milionech otáček při kontaktním Hertzově tlaku 1400 MPa. Nejdříve se provedlo měření magnetoelastickou metodou v osmi bodech na obvodu všech pěti kladek a pak pomocí rentgenové tenzometrie ve čtyřech bodech obvodu, obr. 3. Obě metody jsou nedestruktivní, měření se provedla pouze na povrchu zkušebních kladek. Nakonec se měření provedlo semidestruktivní odvrtávací metodou s postupným vrtáním kruhového otvoru.

#### 3.1 Měření odvrtávací metodou

K měření se použily tenzometrické růžice typu RY61-1,5/120S firmy Hottinger a vrtací přípravek S200 firmy Vishay. Vrtání se provedlo frézou  $\varnothing 1,5$  mm, uvolněné deformace se měřily statickou tenzometrickou aparaturou P3500 s přepínačem měřicích míst SB-10, obojí od firmy Vishay. Na obr. 4 je jako příklad uveden zjištěný průběh hlavních zbytkových napětí ve zkušební bombírované kladce před zkušebním testem. Je vidět, že zbytková napětí jsou poměrně malá a obě tahová. Vyhodnocení zbytkových napětí se provedlo postupem dle bulletinu TECH NOTE TN-503-5. Zjištěný průběh hlavních zbytkových napětí ve vzorku po dvou milionech otáček je uveden na obr. 5. Je vidět, že v důsledku dlouhodobého kontaktního namáhání vzniknou na a pod povrchem poměrně vysoká tlaková zbytková napětí. K vyhodnocení na obr. 5 byla pro změnu použita integrální metoda. Z uvedených obrázků je vidět výrazný vliv kontaktního namáhání a kontaktní únavy na změnu zbytkových napětí v okolí kontaktního povrchu.

#### 3.2 Měření rentgenovou tenzometrií

K rentgenografickému určení makroskopických zbytkových napětí byla zvolena metoda jedné expozice bez referenční látky [1] s detekcí difraktovaného záření na paměťové fólii (obr. 6). Hlavní parametry použité metody: úhel dopadu záření CrK $\alpha$  na analyzovaný povrch  $\Psi_0 = 45^\circ$ , vzdálenost filmu od povrchu vzorku  $D = 46$  mm, průměr cylindrického kolimátoru 1,7 mm, plocha ozářeného povrchu cca 2,5 mm<sup>2</sup>, symbol analyzované difrakční linie {211}. Způsob vyhodnocování difrakčních linií je uveden v [2]. Chyba měření napětí nepřesahuje 40 MPa. K uchycení vzorků se vyrobil zvláštní přípravek, jeho uložení při měření je na obr. 7.

Výsledky měření jsou přehledně shrnuty v tabulkách 1 a 2 a graficky znázorněny na obr. 8 a 9. Měřená veličina  $W$  (šířka difrakční linie) je úměrná plastické deformaci. Na povrchu kontaktně unavovaného vzorku je dvojnásobná v porovnání se vzorky 1 a 4, což ilustruje vysokou úroveň plastické deformace unavovaného vzorku.

#### 3.3 Měření magnetoelastickou metodou

Princip magnetoelastické metody je založen na měření intenzity signálu Barkhausenova signálu a je podrobně popsán v [3] a [4]. Na tuto intenzitu má mj. významný vliv přítomnost a rozložení mechanických napětí, která ovlivňují cestu, po které se domény ubírají směrem ke snadné orientaci ve směru magnetizace. Tento jev, kdy elastické vlastnosti ovlivňují doménovou strukturu a magnetické vlastnosti, se nazývá magnetoelastická interakce. V důsledku magnetoelastické interakce u materiálu s pozitivní magnetostrikcí (železo, většina ocelí, kobalt) tlakové napětí intenzitu Barkhausenova šumu snižuje, zatímco tahové napětí ji zvyšuje, viz obr. 10. Pro kvantitativní vyhodnocení napětí je nutná kalibrace, kdy se Barkhausenův šum převádí na hodnotu napětí dle patřičné kalibrační křivky, viz obr. 11. Pro

dvouosou napjatost se nejčastěji používá křížový vzorek [5]. Přednosti této metody jsou její nedestruktivnost, rychlá odezva a možnost rychlého měření ve velkém počtu měřicích bodů.

Jako příklad je na obr. 12 uveden změřený průběh Barkhausenova šumu podél obvodu bombírovaného vzorku č. 1 před kontaktním unavováním ve směrech  $\sigma_A$  a  $\sigma_T$  dle obr. 3 jakož i vyhodnocené střední hodnoty podél celého obvodu. Na obr. 13 je uvedeno srovnání naměřených hodnot Barkhausenova šumu u dosud nezatíženého vzorku a vzorku po 2 miliónech cyklů. Z obrázku je vidět výrazný vliv kontaktní únavy na intenzitu signálu Barkhausenova šumu a tím i velikost zbytkových napětí.

### 3.4 Porovnání výsledků měření

Porovnání výsledků měření zbytkových napětí bývá vždy problematické vzhledem k odlišnostem jednotlivých měřicích metod. V tomto případě odvrťovací metoda neumožňuje změřit zbytková napětí na povrchu vzorků na rozdíl od obou zbývajících metod, zbytková napětí je tam možno jen přibližně a problematicky extrapolovat. Proto se provedlo tabulkové srovnání povrchových zbytkových napětí pouze pro metodu rentgenové tenzometrie a magnetoelastickou metodu. Výsledky srovnání pro vzorek č. 1 a 5 jsou uvedeny v tabulkách 3 a 4.

Z obr. č. 5 je vidět, že extrapolovaná zbytková napětí na povrchu kontaktně unaveného vzorku jsou zhruba stejně velká, jaká byla určena druhými dvěmi metodami. Byla však vyhodnocena za předpokladu Hookeova zákona, jejich velikost však svědčí o pravděpodobném překročení meze kluzu zkoušeného materiálu.

## 4. Závěr

Životnost řady součástí je mnohdy výrazně omezena v důsledku jejich kontaktní únavy. Této problematice je věnován rozsáhlý teoretický i experimentální výzkum, některé výsledky měření zbytkových napětí při kontaktní únavě materiálu jsou obsahem předloženého článku. Na řešení se podílela tři pracoviště s použitím tří různých experimentálních metod experimentální analýzy zbytkových napětí. V článku jsou uvedeny první získané výsledky, výzkum bude dále pokračovat při dalších způsobech kontaktního zatížení a namáhání zkušebních vzorků.

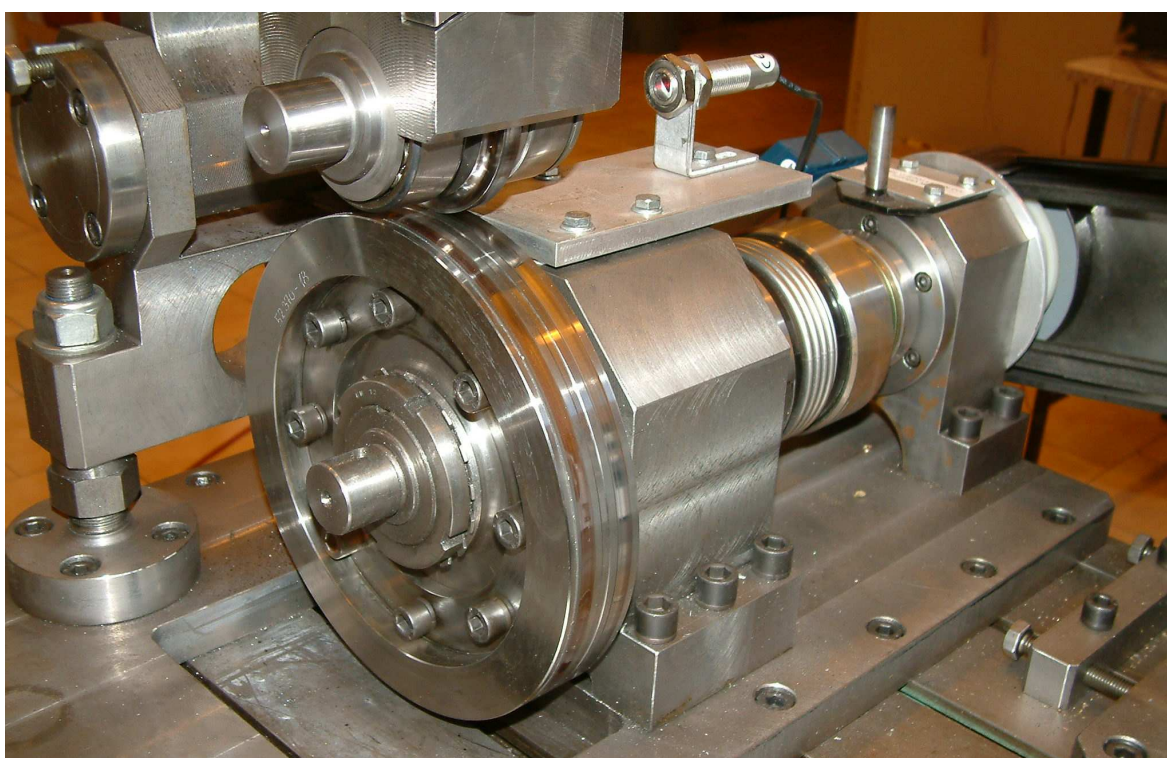
**Poděkování:** Příspěvek byl podpořen projektem VZ MSM 6840770021 a GAČR 101/05/2523.

## Literatura

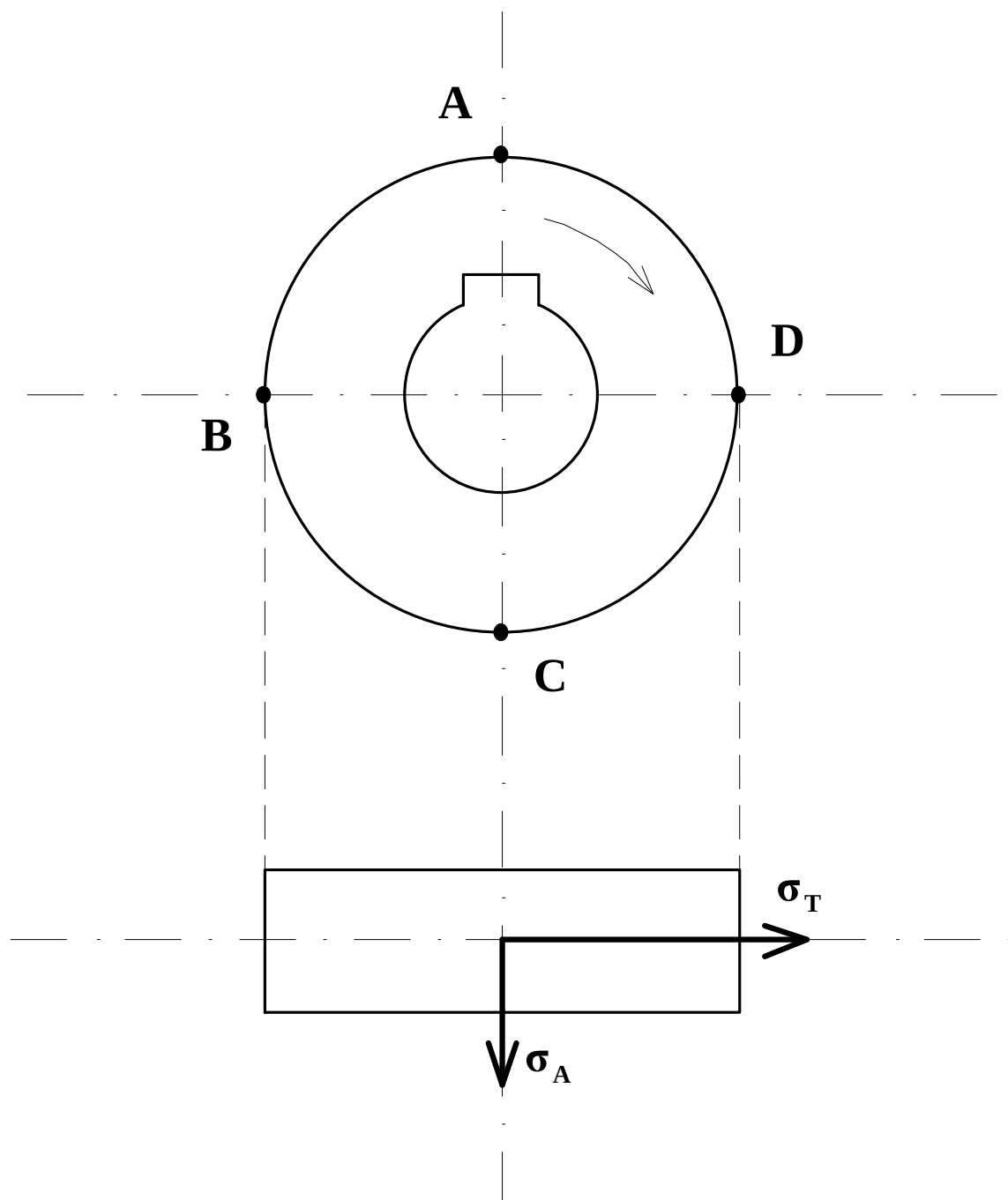
- [1] Kraus I., Ganev N.: *Technické aplikace difrakční analýzy*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004.
- [2] Ganev N., Kraus I.: *Čs. čas. fyz.* A 36, 1986, 270.
- [3] Barkhausen, H.: *Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen*. Physik Zeitschrift XX, 1919, pp. 401 - 403.
- [4] Vengrinovich, V.: *Magnitošumovaja strukturoskopja*. Nauka i Technika, Minsk, 1991.
- [5] Titto, S.: *Barkhausen noise method for determining biaxial stresses in ferromagnetic materials*. US Patent 4977373, 1990.



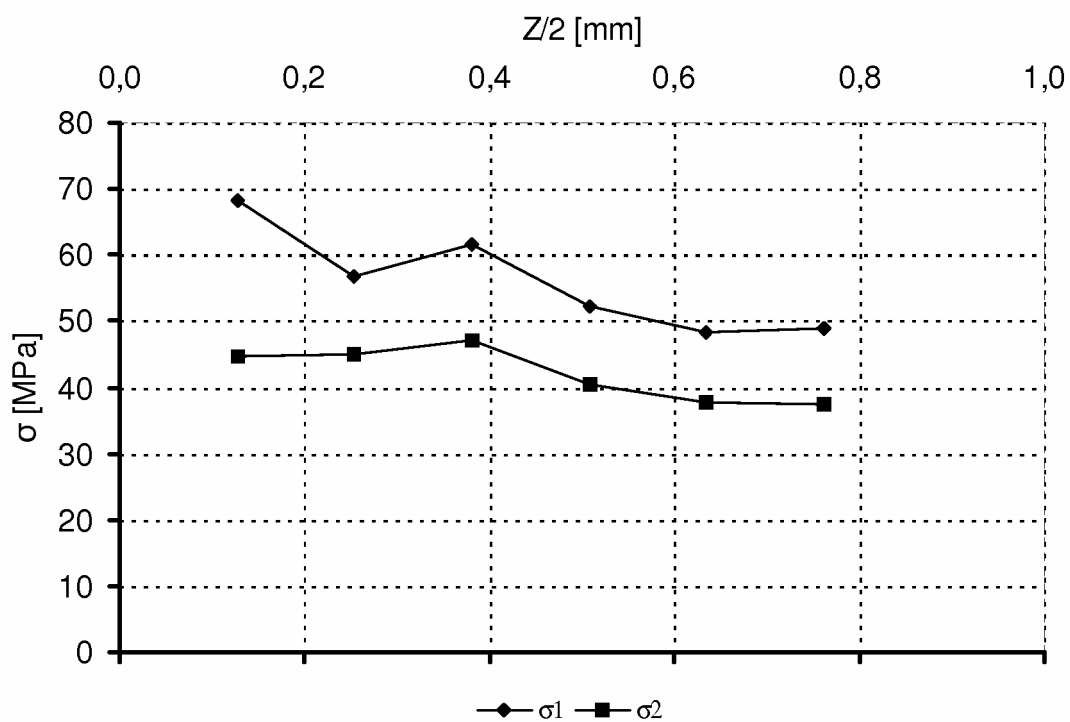
Obr. 1. Zkušební zařízení pro výzkum kontaktní únavy



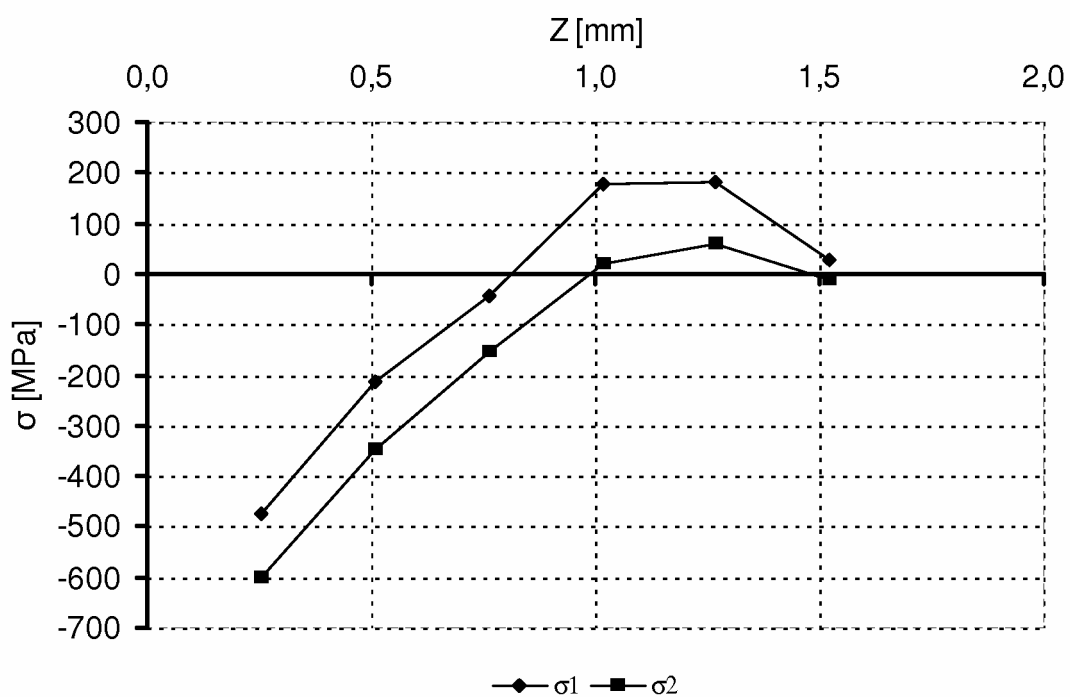
Obr. 2. Zkušební kladka v kontaktu s poháněcím bubnem



Obr. 3. Místa a směry měřených zbytkových napětí



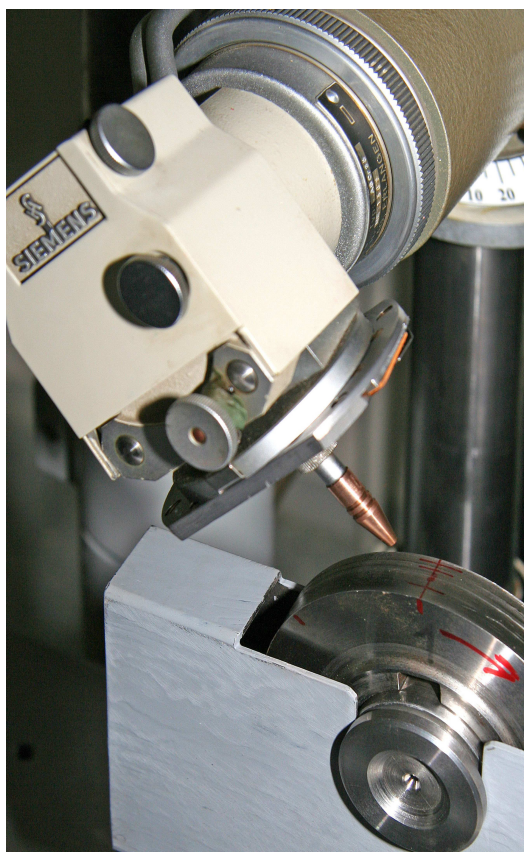
Obr . 4. Průběhy hlavních zbytkových napětí bombírované kladky před zkušebním testem



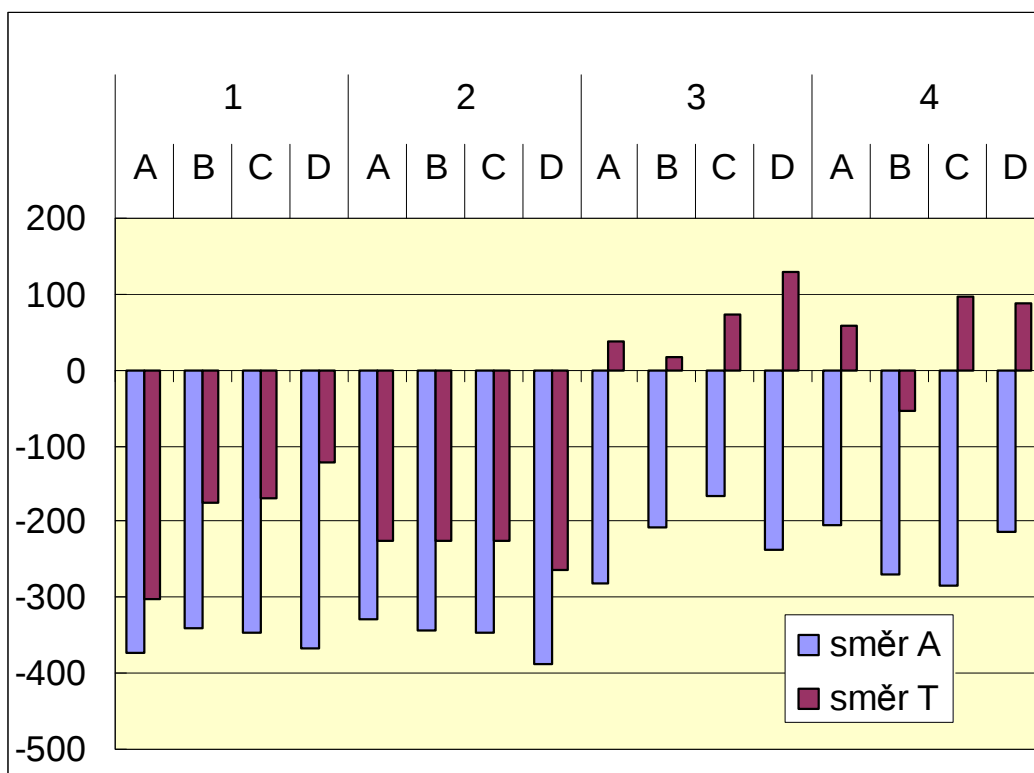
Obr. 5. Průběhy hlavních zbytkových napětí bombírované kladky po 2 000 000 otáček



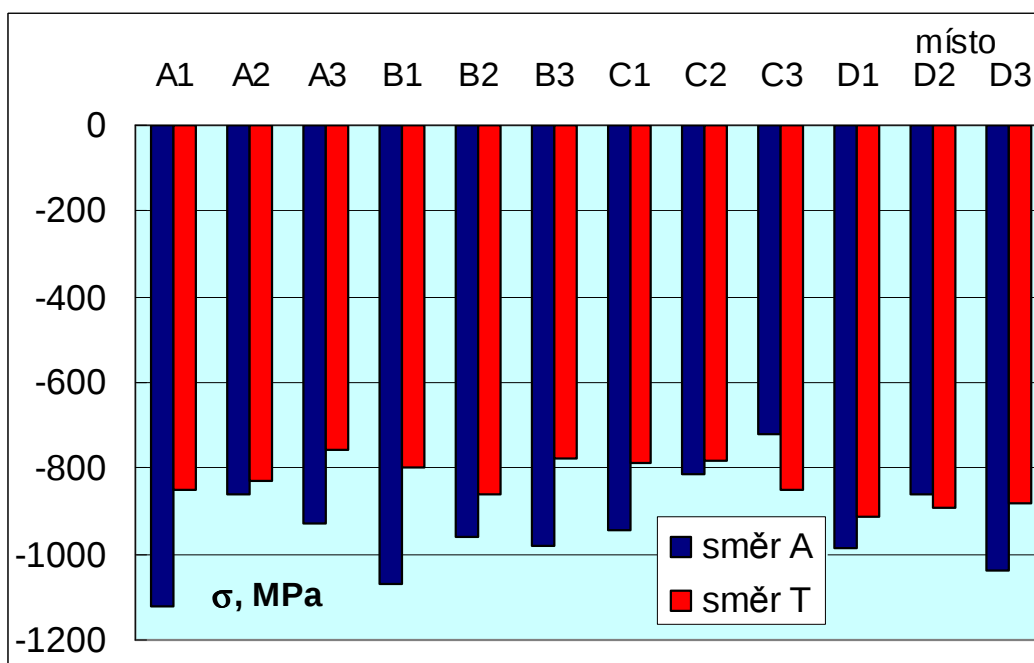
Obr. 6. Experimentální pracoviště v laboratoři rtg difrakce FJFI ČVUT



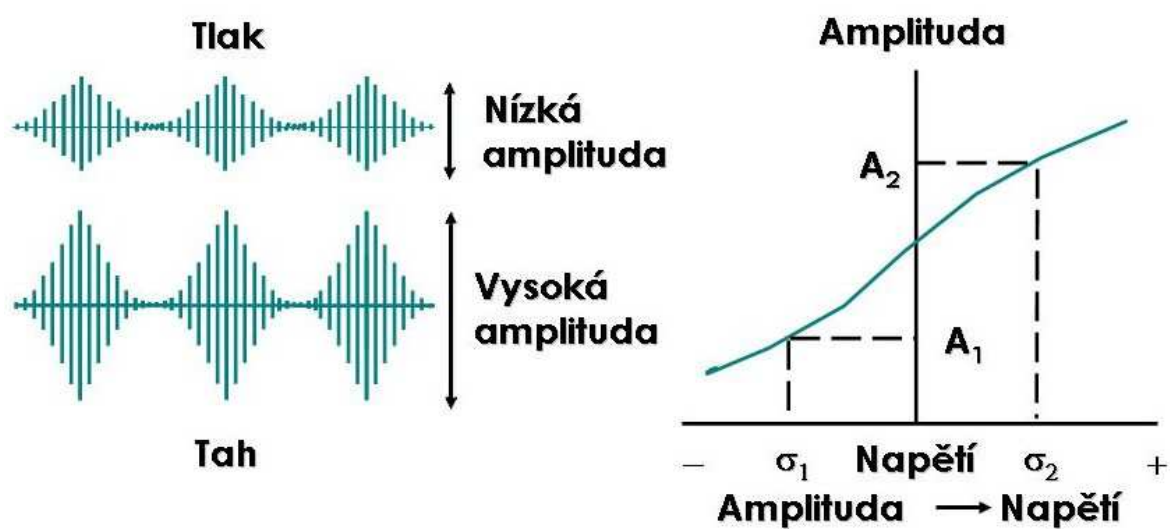
Obr. 7. Měření vzorku, umístěného ve speciálním přípravku



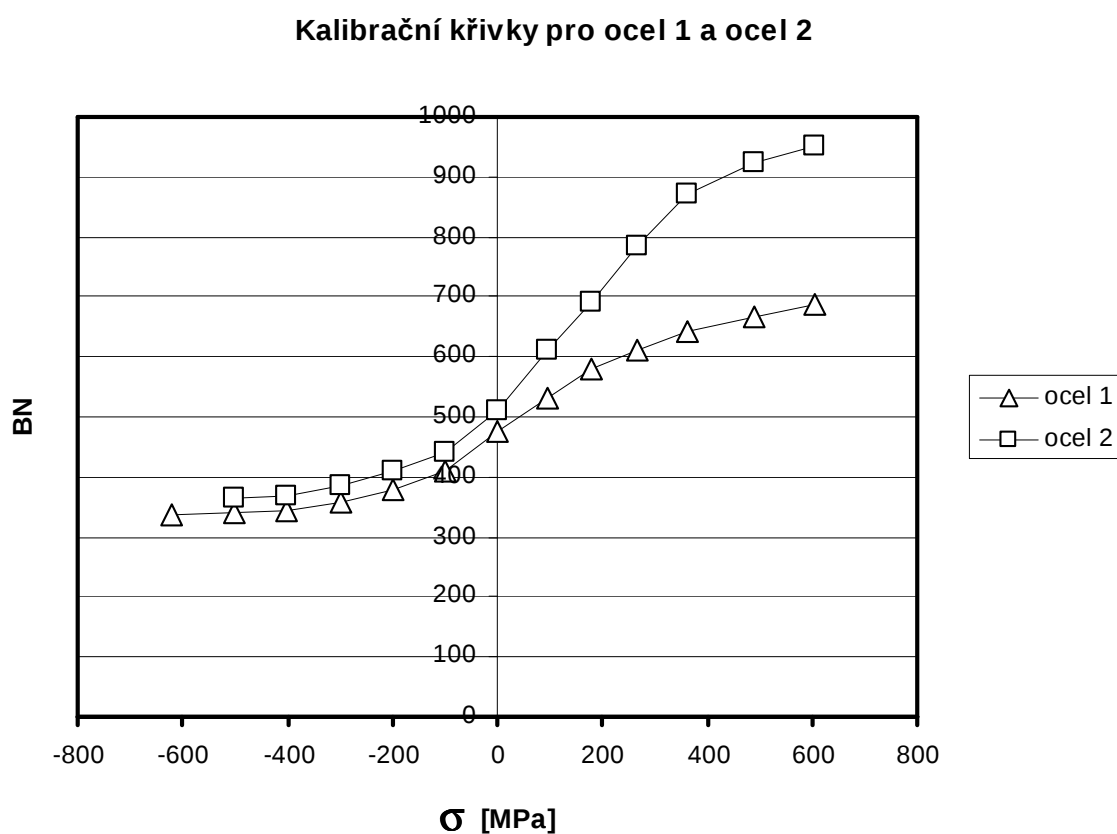
Obr . 8. Zbytková napětí na neunavených vzorcích



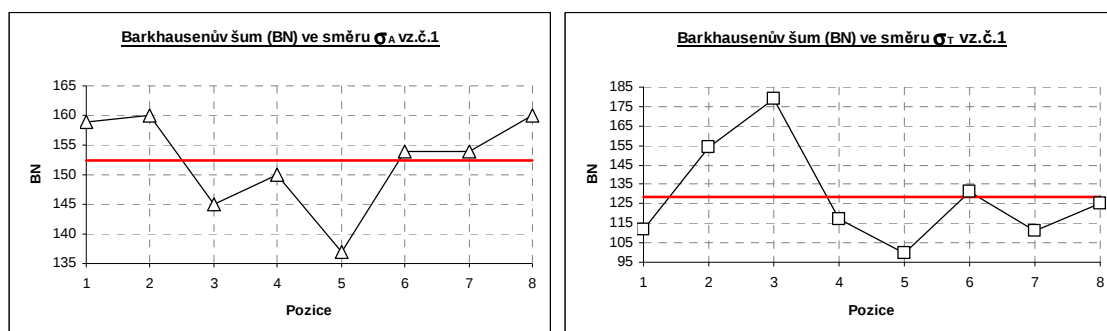
Obr. 9. Zbytkový napětí ve vzorku po 2 000 000 otáček



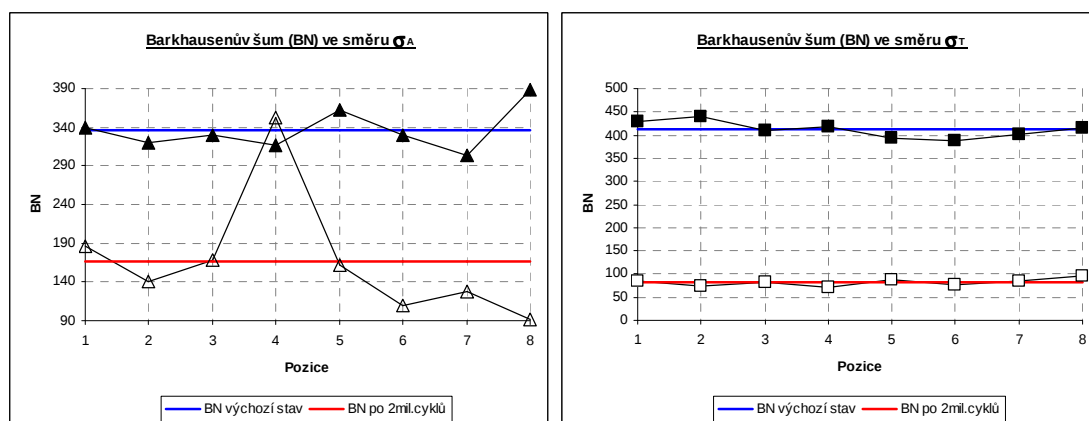
Obr. 10. Závislost amplitudy Barkhausenova šumu na napětí



Obr. 11. Kalibrační křivky pro magnetoelastickou metodu



Obr. 12. Měření na bombírovaném neunaveném vzorku



Obr. 13. Srovnání výsledků měření na neunaveném a unaveném vzorku

| Vzorek | Místo | $\sigma_A$ , MPa | $\sigma_T$ , MPa | W, deg |
|--------|-------|------------------|------------------|--------|
| 1      | A     | -374             | -303             | 1,43   |
|        | B     | -341             | -174             | 1,46   |
|        | C     | -347             | -170             | 1,44   |
|        | D     | -368             | -122             | 1,44   |
| 2      | A     | -330             | -226             | 1,43   |
|        | B     | -344             | -227             | 1,41   |
|        | C     | -346             | -226             | 1,44   |
|        | D     | -387             | -262             | 1,44   |
| 3      | A     | -281             | 38               | 1,43   |
|        | B     | -207             | 18               | 1,45   |
|        | C     | -167             | 73               | 1,41   |
|        | D     | -236             | 129              | 1,42   |
| 4      | A     | -206             | 58               | 1,48   |
|        | B     | -271             | -55              | 1,41   |
|        | C     | -283             | 96               | 1,49   |
|        | D     | -212             | 87               | 1,43   |

Tab. 1. Zbytková napětí na povrchu neunavených vzorků

| Místo | $\sigma_A$ , MPa | $\sigma_T$ , MPa | W, deg |
|-------|------------------|------------------|--------|
| A1    | -1124            | -849             | 3,05   |
| A2    | -863             | -828             | 2,64   |
| A3    | -930             | -755             | 2,56   |
| B1    | -1070            | -796             | 2,99   |
| B2    | -958             | -861             | 2,64   |
| B3    | -979             | -777             | 2,58   |
| C1    | -943             | -787             | 2,79   |
| C2    | -816             | -781             | 2,46   |
| C3    | -718             | -851             | 2,50   |
| D1    | -988             | -912             | 2,94   |
| D2    | -859             | -894             | 2,51   |
| D3    | -1036            | -882             | 2,50   |

Tab. 2. Zbytkový napětí ve vzorku po 2 000 000 otáček

| Vzorek | Místo | Rent. difrakce   |                  | Magnetoeel. metoda |                  |
|--------|-------|------------------|------------------|--------------------|------------------|
|        |       | $\sigma_A$ [MPa] | $\sigma_T$ [MPa] | $\sigma_A$ [MPa]   | $\sigma_T$ [MPa] |
| č.1    | A     | -374             | -303             | -361               | -234             |
|        | B     | -341             | -178             | -342               | -168             |
|        | C     | -347             | -170             | -345               | -175             |
|        | D     | -368             | -122             | -334               | -111             |

Tab. 3. Výsledky měření zbytkových napětí na vzorku č. 1

| Vzorek | Místo | Rent. difrakce   |                  | Magnetoeel. metoda |                  |
|--------|-------|------------------|------------------|--------------------|------------------|
|        |       | $\sigma_A$ [MPa] | $\sigma_T$ [MPa] | $\sigma_A$ [MPa]   | $\sigma_T$ [MPa] |
| č.5    | A     | -863             | -828             | -829               | -856             |
|        | B     | -958             | -861             | -933               | -876             |
|        | C     | -816             | -781             | -873               | -776             |
|        | D     | -859             | -894             | -861               | -856             |

Tab. 4. Výsledky měření zbytkových napětí na vzorku č. 5