ANALÝZA VLIVU POVRCHOVÉ VRSTVY NA VÝSLEDNÝ STAV NAPJATOSTI ZKUŠEBNÍHO VZORKU

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SURFACE LAYER ON THE FINAL STRESS STATE OF A SPECIMEN

Jiří MALINA[(1+2)], Mária BEHÚLOVÁ[(3)], Bohuslav MAŠEK[(1)],

Autori: ***Ing. Jiří Malina[(1+2)], RNDr. Mária Behúlová[(3)], CSc.,***
Prof. Dr. Ing. Bohuslav Mašek[(1+3)]
Pracovisko: ***[(1)] Výzkumné centrum tvářecích technologií FORTECH, FST ZČU Plzeň,***
[(2)] Fakultät für Maschinenbau, TU Chemnitz
[(3)] Katedra aplikovanej mechaniky MTF STU v Trnave
Adresa: ***Paulínska 16, 917 24 Trnava, SK; Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, ČR,;***
Erfenschlager Str. 73, D-09107 Chemnitz, Germany;
Tel.: ***+421 33 5511601***
E-mail.: ***maria.behulova@stuba.sk, anilam@kmm.zcu.cz,***
bohuslav.masek@mb.tu-chemnitz.de

Abstract

Stav povrchu a způsob zpracování výrazně ovlivňuje životnost jak strojních součástí tak i celých konstrukcí. Při únavovém zatěžování se malé nerovnosti povrchu a zbytková napětí, vnesená do materiálu během celého výrobního procesu, mohou projevit na výsledném stavu napjatosti. Zjištění výsledného stavu napjatosti v reálné povrchové vrstvě je značně náročný technický problém a v praktických podmínkách jej není vždy možné kvantifikovat. Alternativní možností je využití FEM simulace. V příspěvku jsou představeny simulační modely zkušebního vzorku pro zkoušku ohybem za rotace. Jsou porovnána napěťová pole pro varianty vzorku s reálným povrchovým reliéfem a integrovanými hodnotami zbytkových pnutí, naměřených experimentálně pomocí rentgenové difrakce, s napěťovým polem ve vzorku s dokonale hladkým povrchem bez zbytkového pnutí.

The state of the surface layer and the used manufacturing process strongly influence the life of single components and also the whole constructions. By the fatigue loading, a small surface roughness and residual stresses put into the material during the whole production process can rapidly affect the final stress state. Determination of final stresses is quite difficult technical problem and in practical conditions, it is not always possible to quantify these stresses. An alternative possibility represents the application of the FEM simulation. In the paper, simulation models of the test specimen for the rotating bending test are presented. The stress fields in the specimen with real surface roughness and with integrated values of residual stresses experimentally measured using the X-ray diffraction are compared with the stress field in a specimen with ideally smooth surface without residual stresses.

Key words

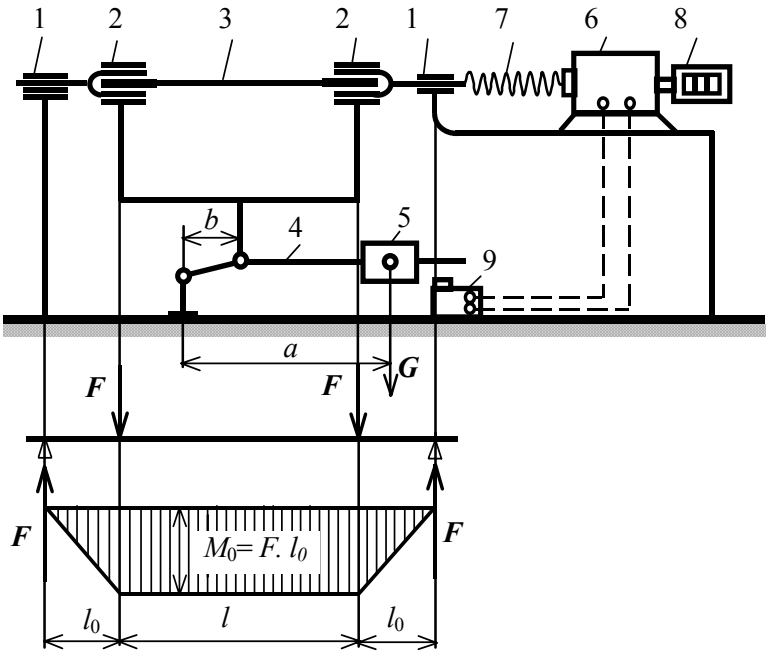
numerická simulace, zbytkové napětí, povrchová vrstva, drsnost povrchu
numerical simulation, residual stresses, surface layer, surface roughness

Úvod

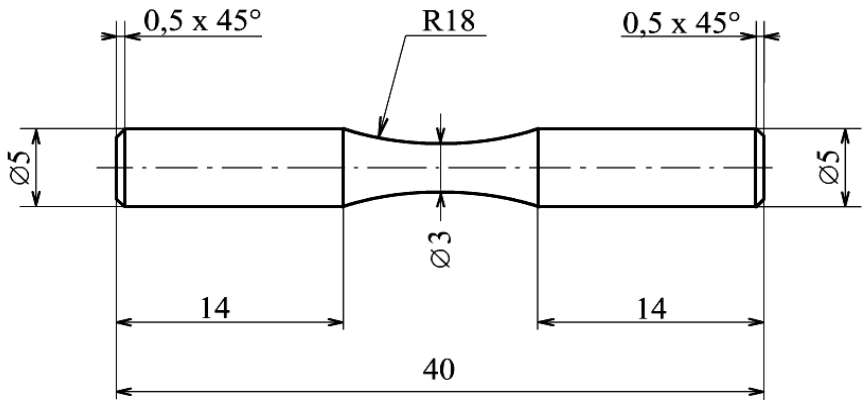
Důležitým parametrem, který ovlivňuje uplatnění daného výrobku v komerční praxi, je jeho životnost. Jednou z možností predikce životnosti součásti je zkouška ohybem za rotace. Této zkoušky se nejčastěji využívá při zkoušení součástí, které budou v provozu zatěžovány ohybovým momentem za rotace součásti. Jako příklad lze uvést hřídele automobilů, větrných elektráren, rotujících částí strojních zařízení atd.

Experiment

Pro ověření možnosti sestavit vhodný simulační model pro analýzu komplexních vlivů působících na stav napjatosti byla použita zkouška ohybem za rotace (Obr. 1) podle normy DIN 50113 [1]. Frekvence zatěžování byla 60 Hz. Tvar a rozměry zkušebního vzorku jsou definovány na obr. 2.



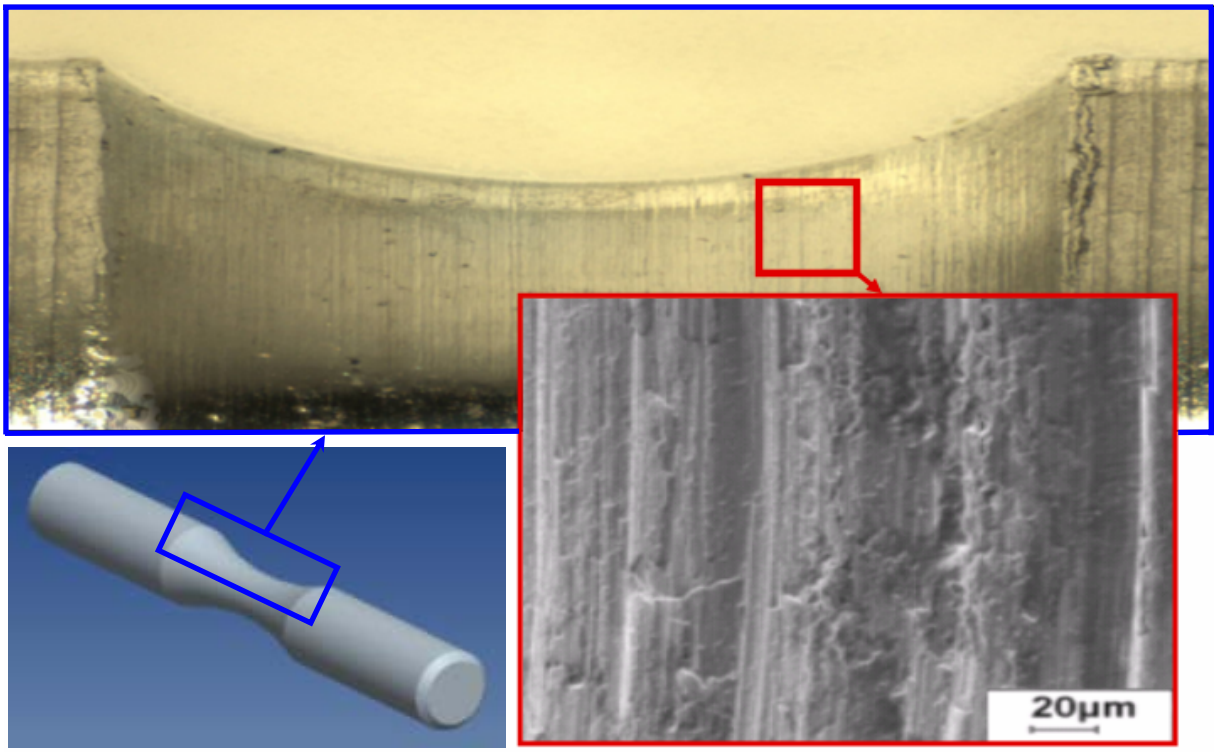
Obr. 1. *Schéma uchycení a způsobu zatížení zkušebního vzorku*
1-ložiska; 2-upínací čelisti; 3-zkušební vzorek; 4-pákový mechanizmus; 5-závaží
6-elektromotor; 7-ohybový hřídel; 8-otáčkoměr; 9-regulátor otáček.



Obr. 2. *Tvar a rozměry zkušebního vzorku*

Při obrábění povrchu vznikají na povrchu nerovnosti (obr. 3), které působí jako koncentrátory napětí a jako iniciační místa lomu. Kromě povrchového reliéfu hraje také významnou roli velikost a charakter zbytkových pnutí, které mohou vzniknout jak během opracování povrchu tak i během předchozího zpracování.

Tlaková zbytková pnutí vedou ve většině případů k zvýšení životnosti součásti a naopak tahová k jejímu poklesu. Superpozicí všech napěťových složek vzniká v reálných součástech komplikovaný stav napjatosti. Pro stanovení intenzity vlivu jednotlivých složek, které jsou v technické praxi těžko kvantifikovatelné, byla následující analýza provedená s podporou FEM simulace.

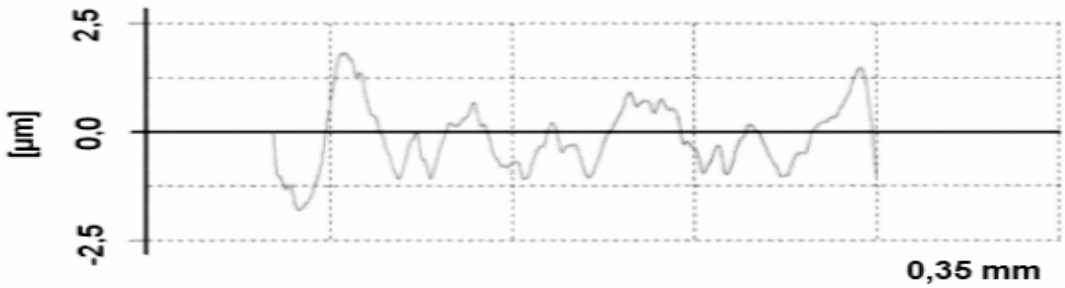


Obr. 3. *Povrchový reliéf zkušebního vzorku z oceli 20MoCrS4 dosažený jemným soustružením*

Vstupní data a okrajové podmínky pro FEM simulace

Stanovení profilu povrchového reliéfu

Na reálném zkušebním vzorku z oceli 20MoCrS4 byla zjištěna drsnost povrchu po jemném soustružení (obr. 4). Získaná data byla převedena do simulačního modelu tak, aby reprezentovala skutečný reliéf modelové součásti.



Obr. 4. *Naměřený povrchový reliéf zkušebního vzorku*

Odzkoušením různých variant prokládání bodů byla pro konečné použití vybrána metoda spline [2], která vyhovujícím způsobem zachytila charakter mikronerovností povrchu v řezu kolmém na směr řezného pohybu při soustružení.

Stanovení velikosti zbytkových pnutí

K stanovení velikosti zbytkových pnutí v povrchové oblasti bylo využito rentgenové difrakční analýzy.

Rentgenová difrakční analýza je založena na dopadu primárního rentgenového záření na povrch krystalu, které způsobí rozkmitání elektronů na frekvenci odpovídající primárnímu záření [2]. Rozkmitané elektrony se stanou zdrojem sekundárního záření se shodnou vlnovou délkou jako primární záření. Každá rovina rozptýlí malé množství rtg záření. Složením rozptylu z velkého počtu rovin se získá rozptyl o dostatečné intenzitě potřebné pro pozorování. Ke vzniku interferenčního maxima difraktovaných paprsků dochází, pokud je jejich dráhový rozdíl roven celému násobku vlnové délky dopadajícího záření. Velikost dráhového rozdílu mezi dopadajícími paprsky 11' a 22' je $2d\cdot\sin\vartheta$ (obr. 5a), kde ϑ udává úhel, který svírá dopadající paprsek s rovinou krystalu.

Podmínka pro vznik difrakčních maxim u paprsků 1' a 2' je dána Braggovou rovnicí [6]

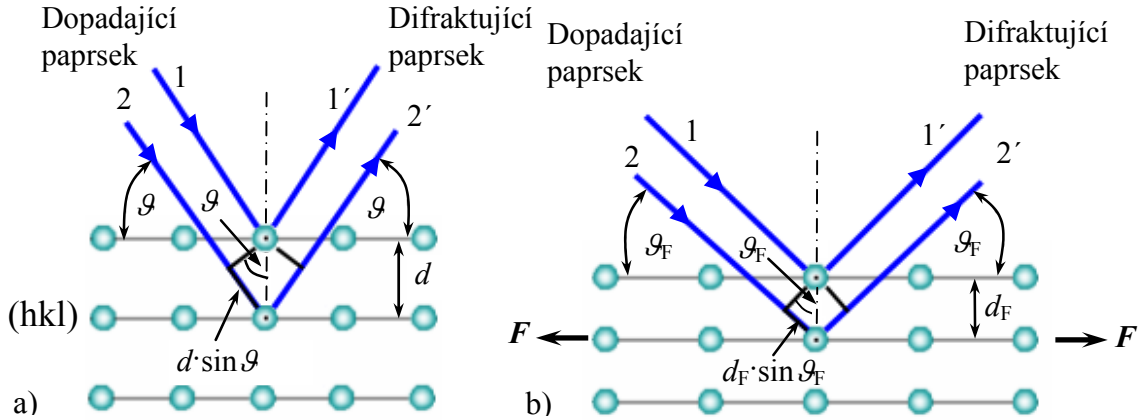
$$n\,\lambda = 2d.\sin\vartheta\,,$$

kde: n = 0, 1, 2, 3, ...; λ - vlnová délka, d - mezirovinná vzdálenost, ϑ - difrakční úhel.

Pro určení velikosti zbytkového napětí je třeba nejprve zjistit, zda došlo v krystalové mřížce ke změně výchozí mezirovinné vzdáleností d (obr. 5a,b) na vzdálenost d_F.

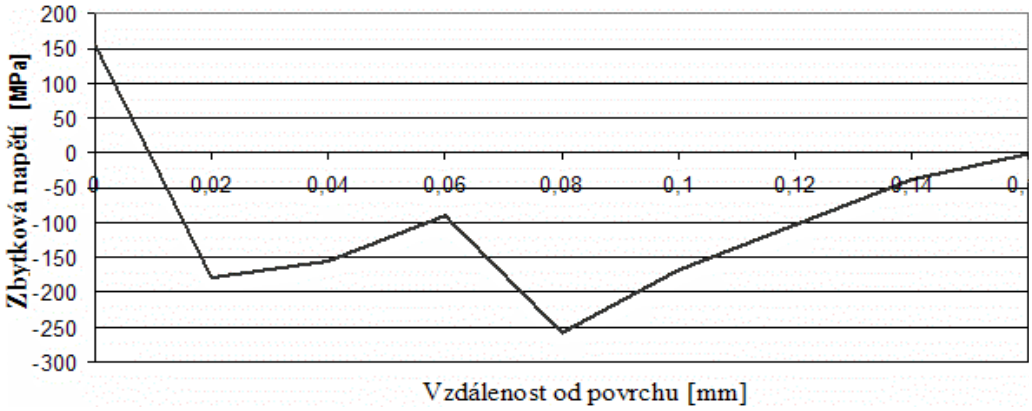
Po úpravě Braggovy rovnice do tvaru $\Delta d / d_F = \Delta\vartheta \cot g\,\vartheta$, ($\Delta d = d - d_F$ a $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_F$) je možné vypočítat velikost deformace a následně uplatněním Hookova zákona určit velikost zbytkového napětí.

Rentgenografické měření bylo provedeno vždy třikrát v každé vrstvě vzorku. Nejprve byla zjištěna velikost zbytkového pnutí na povrchu vzorku. Poté byly postupně odleptávány povrchové vrstvy s krokem po 0,02 mm a zjišťováno napětí.



Obr. 5. *Vzdálenost krystalografických rovin v a) nedeformovaném b) deformovaném stavu [4],[5]*

Tímto postupem se pokračovalo až do hloubky 0,16 mm, kde již byla hodnota zbytkového pnutí pouze 1 MPa (obr. 6). Leptání bylo použito z toho důvodu, aby se zabránilo případnému zanesení nových pnutí. Změřená lokální nehomogenita napěťového pole v hloubce 0,06 mm a 0,08 mm pod povrchem byla v FEM modelu rovněž zohledněna.



***Obr. 6**. Průběh zbytkového pnutí v povrchové oblasti zkušebního vzorku*

Simulační model

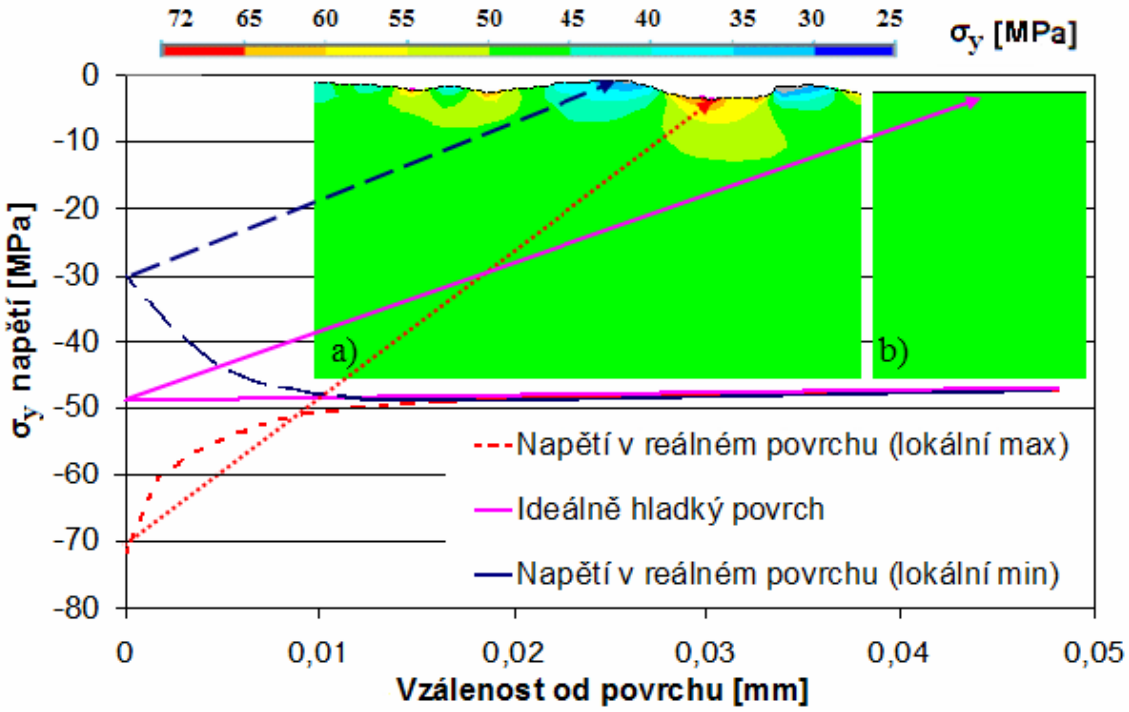
Celkem byly vytvořeny tři simulační modely zohledňující jednotlivé vlivy působící na vznik reálného napětí. Simulovaný zkušební vzorek o průměru 3 mm měl rádius 18 mm (obr. 2). První model byl s ideálně hladkým povrchem bez zbytkového pnutí a sloužil k zjištění základního teoretického napětí vzniklého pouze od zatěžujících sil bez jiných vlivů. Druhý model s ideálně hladkým povrchem byl rozšířen o vliv zbytkového pnutí, které bylo experimentálně zjištěno pomocí rentgenové difrakce. Ve třetím modelu byl navíc zohledněn i vliv koncentrace napětí způsobené povrchovým reliéfem.

Modely byly sestrojeny jako osově symetrické. Pro zabezpečení dostatečné přesnosti pro hodnocení vlivu reliéfu povrchu vzorku na výsledný stav napjatosti, byla provedena optimalizace velikosti elementů. Na povrchu byly použity elementy se stranou o délce cca 0,002 mm. Postupně se velikost elementů zvětšovala až na hodnotu přibližně 0,01 mm v hloubce 0,06 mm pod povrchem. Zbylý objem byl nasíťován elementy o stejném rozměru.

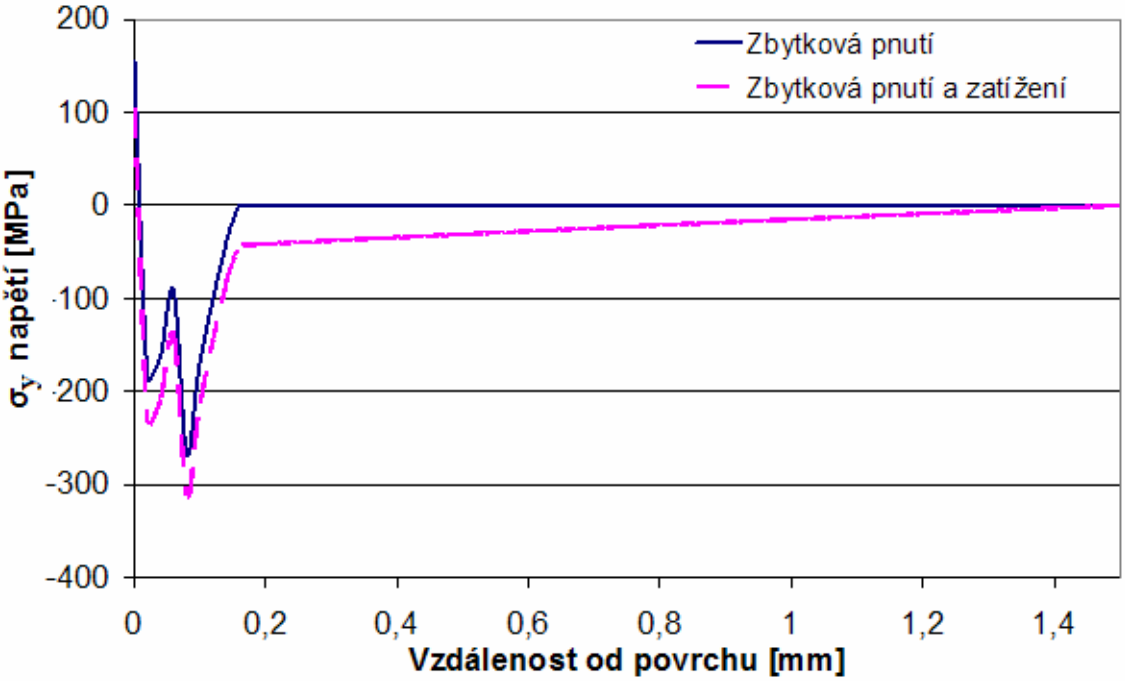
Pro zadání požadovaných hodnot zbytkového napětí byl využit algoritmus pro vytváření teplotně indukovaného napěťového pole. Pro jednotlivé vzdálenosti od povrchu byly zjištěny teploty, které indukují stejná napětí odpovídající naměřeným hodnotám metodou rentgenové difrakce. Touto metodou bylo ve vzorku vytvořeno napěťové pole, které odpovídalo reálnému stavu.

Výsledky

Výsledky byly dosažené na obdobných simulačních modelech, při stejném způsobu uchycení a zatížení. Z výsledků vyplývá, že stejná velikost zatížení, která vyvolá u ideálně hladkého vzorku maximální hodnotu napětí 49 MPa, vede v případě modelu zahrnující vliv reálného reliéfu povrchu k hodnotám napětí v intervalu 30 MPa v lokálním minimu po hodnotu 67 MPa v lokálním maximu. Tento vliv povrchu na výslednou hodnotu napětí se projevoval do hloubky cca 0,02 mm (obr. 7). Stejně působil vliv povrchového reliéfu v zatíženém vzorku (obr. 8).



Obr. 7. *Závislost napětí σ_y na vzdálenosti od povrchu pro ideálně hladký vzorek a pro vzorek s povrchovým reliéfem*



Obr. 8. *Závislost napětí σ_y na vzdálenosti od povrchu vzorku v zatíženém a nezatíženém modelu při zohlednění drsnosti a zbytkového pnutí*

Závěr

Na konkrétním případu bylo potvrzeno, že lze vytvořit simulační model pro numerickou analýzu, zahrnující působení všech hlavních vlivů na životnost materiálu. V uvedeném výpočtu byly kromě napětí vznikajících mechanickým namáháním zohledněny vlivy velikosti zbytkových pnutí a vlivy povrchového reliéfu. Na výsledcích FEM simulace jsou velmi dobře patrné rozdíly mezi vzorkem s ideálně hladkým povrchem a vzorkem s reálným povrchovým reliéfem. Díky tomuto reliéfu vznikají v mikroobjemu povrchové vrstvy lokální napěťová maxima a minima s odchylkou téměř 40% oproti stejnému stavu namáhání u ideálně hladkého vzorku.

Poděkování

Příspěvek vznikl s podporou projektu VEGA MŠ SR a SAV 1/0837/08 a projektu 1M06032 Výzkumné centrum tvářecích technologií Fortech (www.fortech.zcu.cz), který je řešen v rámci programu Výzkumná centra (1M) a podporován z účelových prostředků státního rozpočtu ČR na výzkum a vývoj. Poděkování patří také Slovenské akademické informační agentuře SAIA (www.saia.sk) za podporu v rámci Národního stipendijního programu.

Seznam bibliografických odkazů:

[1] Norma DIN 50113.
[2] Ansys Theoretical Manual, Release 10.0., SAS IP, Inc., 2005.
[3] DOMÁNKOVÁ, M., ČAPLOVIČ, Ľ., JANOVEC, J. *Experimentálne metódy štúdia materiálov I.* 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2007. 219 s. ISBN 978-80-227-2741-9 (https://sweb.mtf.stuba.sk)
[4] http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/rtg_difrakce/4.html [cit. 2007-03-11].
[5] http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/rtg_difrakce/6e.html [cit. 2007-03-11].
[6] http://www.eserc.stonybrook.edu/ProjectJava/Bragg/ [cit. 2007-03-11].