



Vliv vlastností konstrukčního vrubu na jeho chování

Michal Lattner, Ing., František Holešovský, Prof. Ing., Martin Novák, doc. Ing., Tomáš Vysloužil, Ing.
Fakulta výrobních technologií a managementu, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 400 01 Ústí nad Labem.
Česká republika. E-mail: lattner@fvvm.ujep.cz, holesovsky@fvvm.ujep.cz

Strojní součásti, které jsou opatřeny konstrukčními vruby, mohou být zatěžovány řadou možných zatížení. V první řadě se jedná o statické zatížení, dále o stálé dynamické zatížení a nakonec o cyklické dynamické zatížení, které klade nejvyšší nároky na strojní součásti i jejich jednotlivé prvky a tedy i vruby. Projevy cyklicky se měnícího zatížení lze sledovat při různých kombinacích, například střídavý tah – tlak, míjivé tahové zatížení a podobně. V praxi se nejčastěji vyskytují zatížení ohybu za rotace, cyklického krutu a především komplexní zatížení součástí, což lze však velmi obtížně simulovat. Dokončovací technologie má významný vliv na okolí vrubu a samotný vrub. To se při chodu zařízení projevuje dobou životnosti a velikostí únosnosti součástí při určitém zatížení. Dokončování má výrazný vliv na vlastnosti součástí zařízení, které pracují v dynamickém režimu při proměnlivé velikosti zatížení.

Klíčová slova: dynamické zatížení, vrub, obrábění, dokončování, napětí

1 Úvod do problematiky

Chování skutečných strojních částí je závislé od komplexu svých vlastností získaných v průběhu výrobního procesu. Meze únavy skutečných součástí se od mezí únavy vzorků i při stejném použitém výchozím materiálu velmi výrazně liší. Jednodušší situace nastává u součástí, které nejsou opatřeny konstrukčním vrubem [2],[4],[5],[9]. Jestliže však musíme strojní díl opatřit konstrukčním vrubem, vneseme další výrobní parametr do vlastností takové součásti. Jsou-li uváděny výsledky měření na výchozích polotovarech (např. pružinových drátech, výkovicích, atp.), měl by být vždy uveden způsob měření [1], [6],[10]. Dimenzování těchto součástí tedy vychází z výpočtové hodnoty meze únavy, která zahrnuje součinitel η_p vyjadřující vliv mechanické kvality povrchu, součinitel η_z vystihující vliv technologických úprav povrchu a součinitel η_v vyjadřující vliv velikosti součásti. Žádná z metod nerozlišuje způsob výroby vlastního vrubu, ale zakládá se na drsnosti povrchu okolí vrubu [3]. Samozřejmě tato nepřesnost výrazně ovlivní vlastní výpočet a nutí k předimenzování dynamicky zatěžovaných strojních dílů z důvodu nejistoty chování vrubu. Vzhledem ke špičce zatěžovacího napětí právě ve vlastním vrubu u těchto součástí, je nutné zjistit jaký vliv má technologie jeho výroby na chování vrubu.

2 Experimentální měření

Sledování vlivu obrábění a tedy vlivu parametrů povrchu v místě vytvořeného vrubu, probíhá v několika úrovních. Jedná se o nalezení vlivu způsobu výroby vrubu případně vlivu okolí vrubu na chování vrubem opatřené součásti při dynamickém zatížení. Zatížení v souvislosti se skutečným průběhem je možné modelovat jako:

- Kombinace tahového a tlakového zatížení – zatížení střídavé souměrné
- Pulsující tahové zatížení
- Zatížení ohybem za rotace
- Zatížení střídavým krutem

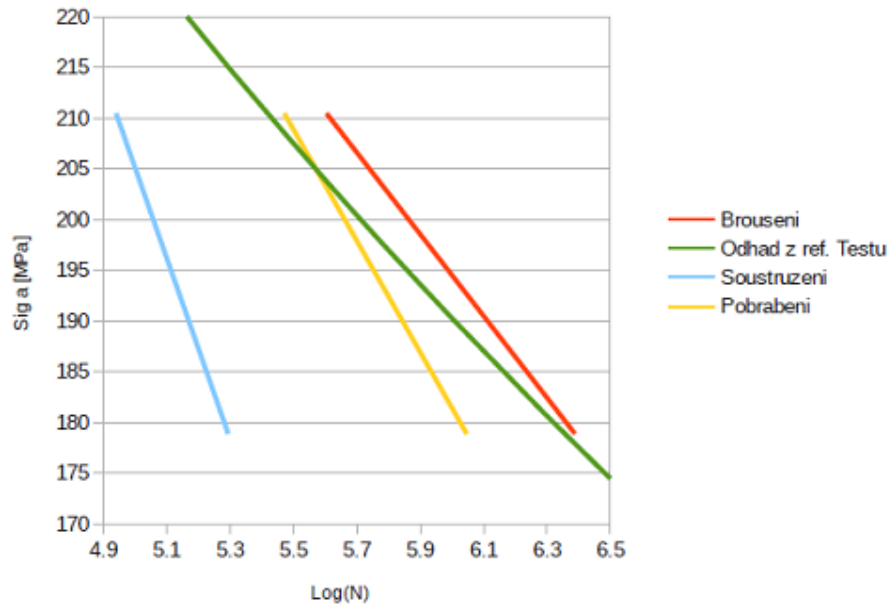
2.1 Zatížení tah – tlak válcových tyčí



Obr.1 Zkušební zařízení AMTREL

Při porovnání obrobených ploch, kdy okolí vrubu bylo vždy broušeno za stejných podmínek a bylo dosaženo s malou odchylkou stejné drsnosti povrchu dochází k výrazně odlišné poloze klesajících křivek Wöhlerova diagramu (obr.2). V případě zatížení vrubu cyklickým zatížením kombinace tah-tlak se projevuje vysoká tendence způsobu výroby vrubu. Broušený vrub vykazuje výrazně vyšší životnost při obou hladinách zatížení oproti vrubu vyrobenému soustružením. Materiál zkušební tyče je uhlíková ocel 11 523 (ČSN ISO S355J2).

ocel 11523, $R_m=580\text{MPa}$



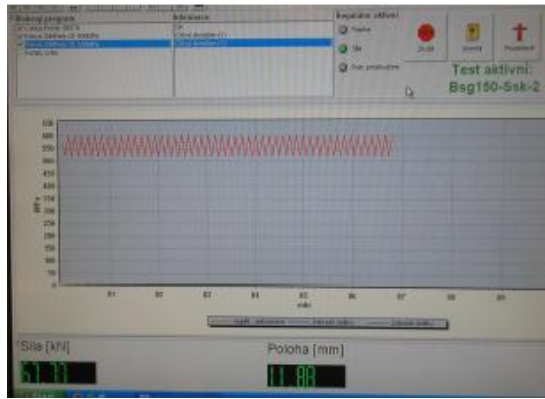
Obr.2 Wöhlerův diagram, únavové křivky s vrubem $K_t=2,32$, $R=-1$

2.2 Pulsující tah

Tab. I – Obrábění povrchu a vrubu jednotlivých zkušebních vzorků

Způsob obrábění dříku tyče	Velikost zrna při broušení	Posuv f	Řezná rychlost v_c	Způsob obrábění vrubu	Řezná rychlost v_c
Soustruženo SK		0,05 mm/ot.	94 m/min	Soustruženo SK	94 m/min
Soustruženo SK		0,05 mm/ot.	94 m/min	Broušeno CBN	40 m/sec
Broušeno SG	150	1m/min	40 m/sec	Soustruženo SK	94 m/min
Broušeno SG	150	1m/min	40 m/sec	Broušeno CBN	40 m/sec
Broušeno CBN	125	1;3 m/min	40 m/sec	Broušeno CBN	40m/sec

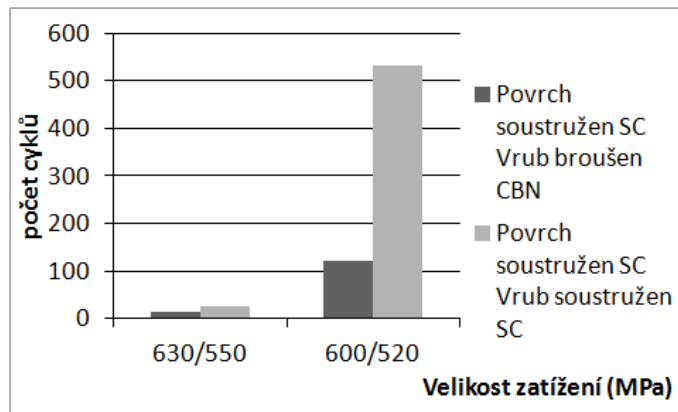
Pro cyklický tah byl použitý trhací stroj velikosti 100 kN. Software stroje byl upraven pro možnost aplikace pulsujícího tahového zatížení (obr.3). Pro materiál 11 523 (ČSN ISO S355J2). byla použita cyklická zatížení v rozmezí 630-550 MPa a 600-520 MPa, to znamená zatížení těsně pod mezí pevnosti materiálu. Jako zkušebního tělíska bylo použito válcových tyčí s vrubem ve středu dříku. Otázkou tedy je, zda nejen okolí vrubu, ale také samotná výroba vrubu ovlivňují jeho chování při dynamickém zatížení. Okolí vrubu v případě soustružení má drsnost $R_a=3,2\ \mu\text{m}$. Tyče byly opatřeny vrubem tvaru U šíře 1,6mm, hloubky 1mm. Obrábění povrchu a vlastního vrubu proběhlo dle tab.I.



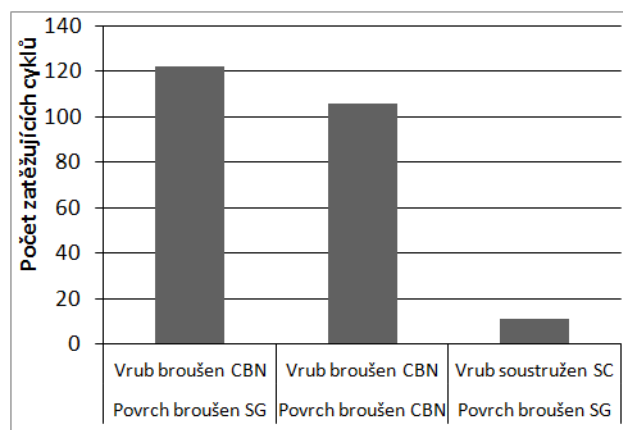
Obr.3 Záznam průběhu cyklického zatěžování

2.2.1 Výsledky experimentu

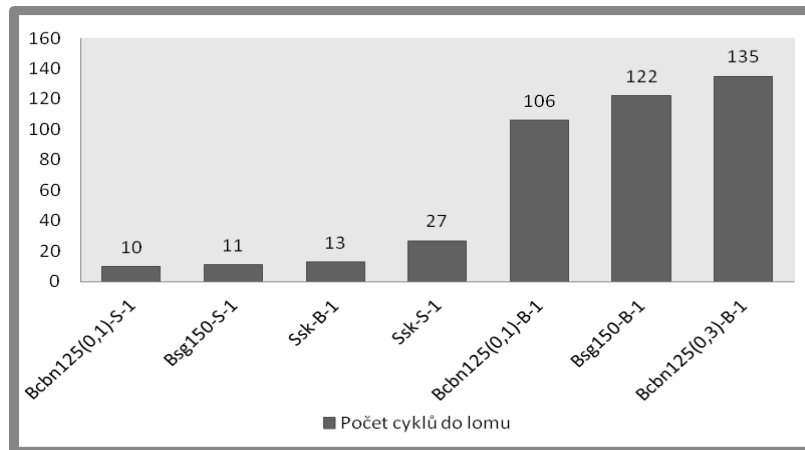
Výsledky výzkumu při cyklickém tahovém zatížení ukázaly několik zajímavých skutečností. Povrch soustružený slinutým karbidem vykazoval mnohem delší životnost, pokud byl vrub soustružený také slinutým karbidem (obr.4). Lze se domnívat, že do broušeného vrubu bylo vneseno tahové napětí a to výrazně zkrátilo životnost vzorku.



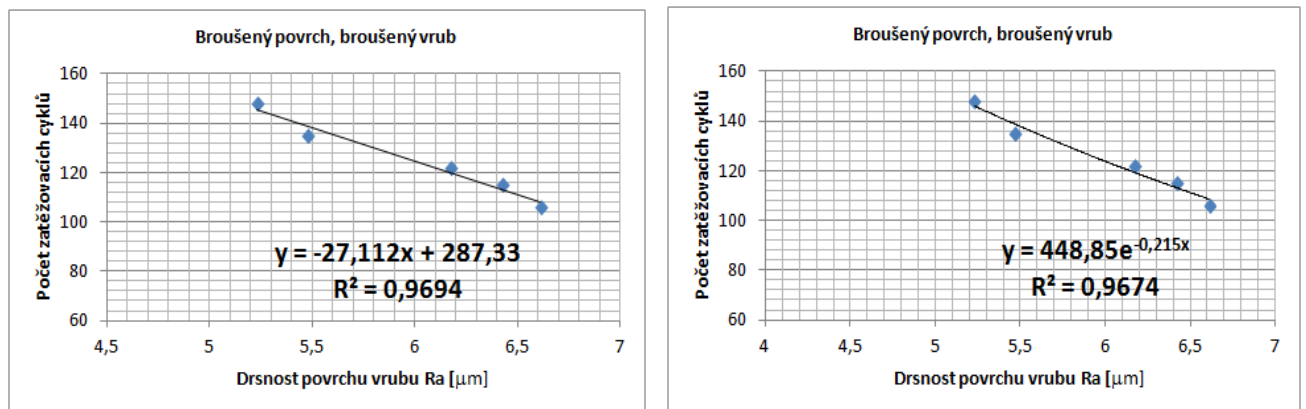
Obr.4 Vliv obrábění na cyklické zatížení vzorku s vrubem



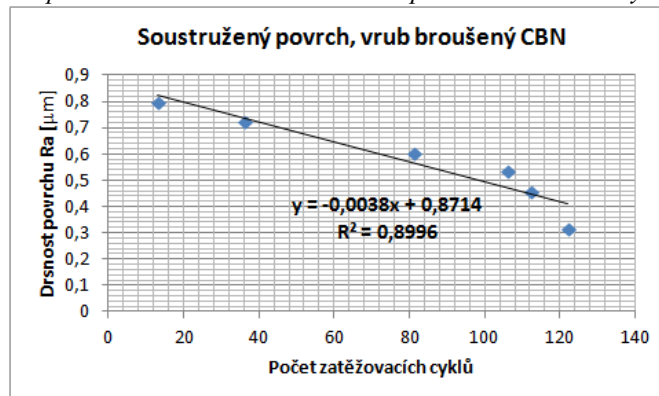
Obr.5 Ovlivnění cyklického zatížení vzorku s vrubem druhem obráběním – SC (slinutý karbid), SG(mikrokryсталický korund – zrno), cyklický tah 630/550 MPa



Obr.6 Doba do lomu zkušebních vzorků s různým obráběním povrchu a vrubu, cyklický tah, první část popisu určuje způsob obrábění povrchu (Bcbn – broušeno CBN, Bsg- broušeno SG, Ssk – soustruženo SC), údaj po pomlčce určuje způsob výroby vrubu (S – soustruženo, B – broušeno)



Obr.7 Závislost hodnoty drsnosti povrchu Ra broušeného vrubu na počtu zatěžovacích cyklů, cyklický tah 630/550 MPa



Obr.8 Závislost hodnoty drsnosti povrchu Ra broušeného vrubu CBN na počtu zatěžovacích cyklů, soustružený povrch SC, cyklický tah 630/550 MPa

V případě broušeného povrchu s broušeným vrubem prokazuje nejdelší životnost povrch broušený zrnem SG s vybroušeným vrubem CBN (obr.5). V tomto případě se ukazuje jako nevhodné soustružení vrubu slinutým karbidem.

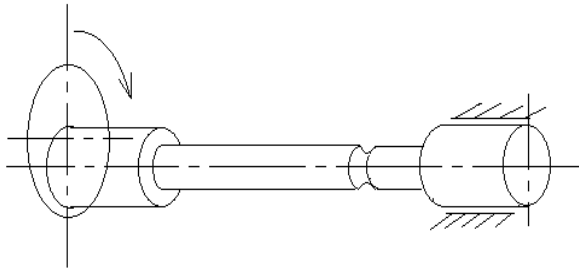
Významným zjištěním je téměř lineární závislost drsnosti povrchu vrubu a doby cyklického zatížení (obr.7). Tato závislost byla potvrzena pouze u broušených vrubů.

$$N = k \cdot Ra^{-m} \quad (\text{cyklů}) \quad (1)$$

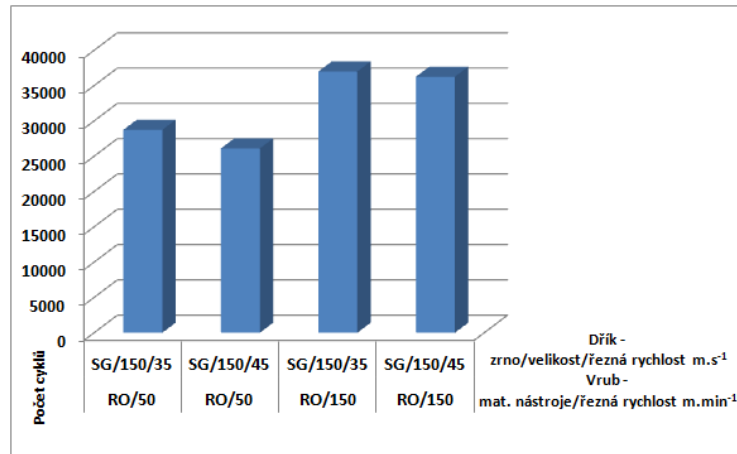
2.3 Ohyb za rotace

Zkouška probíhá na vyvinutém zařízení, kdy je jedna strana zkušební vzorku pevně upnuta a druhá strana upnuta excentricky s hodnotou excentricity 1-5 mm (obr.9). Při rotaci této části dochází k ohybu v místě vrubu. Celý

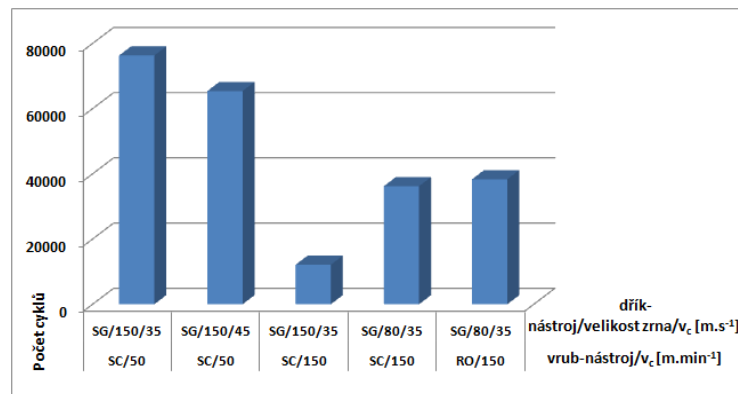
system je sledován osazen silovými snímači a přes zesilovače je průběh zatížení zaznamenáván do počítače jako doba zatížení.



Obr.9 Schéma zkoušky ohybem za rotace



Obr.10 Počet cyklů do porušení u broušeného povrchu a vrubu vyrobeného zápichem tvarovým nožem z rychlořezné oceli

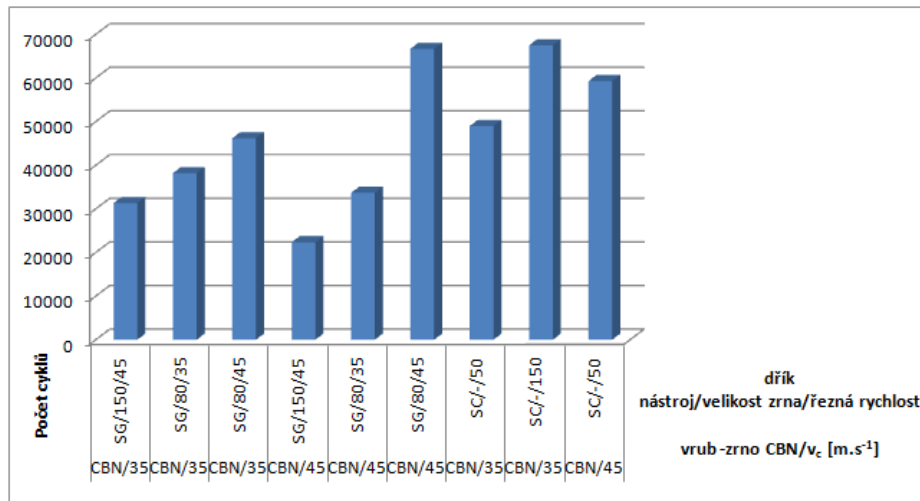


Obr.11 Počet cyklů do porušení u broušeného povrchu a vrubu vyrobeného zápichem tvarovou destičkou ze slinutého karbidu (SC)

V případě součástí opatřených konstrukčním vrubem – zápichem lze z jednotlivých průběhů opět konstatovat vliv technologie nejen obrábění povrchu součástí, ale také způsob obrábění a výroby vlastního vrubu. Technologie výroby vrubu tedy významně ovlivňuje jeho životnost.

Na základě provedených experimentů byly vytvořeny grafy vlivu jednotlivých způsobů obrábění na životnost vrubu při ohybu za rotace. Z velké řady měření vykázaly nejdelší životnost dokončené povrchy s vysokou kvalitou (obr.12). Tyto povrchy byly broušeny mikrokryalickým korundem SG při řezné rychlosti $v_c=45 \text{ m.s}^{-1}$ nebo obráběny slinutým karbidem (SC) s dosažením kvalitního povrchu. U SC byla opět prioritní vyšší řezná rychlost.

V případě výroby konstrukčního vrubu má nejdelší životnost vrub vyrobený broušením CBN. Při použití zrna CBN se překvapivě neprojevuje výrazně vliv řezné rychlosti. Zdůvodnění tohoto jevu je logické. Zrno CBN vytváří v povrchu plastickou deformaci a s tím související zpevnění povrchu včetně většinou nízkých tahových případně tlakových zbytkových napětí. Zde můžeme potvrdit správnost používání zrna CBN při broušení konstrukčních vrubů ve výrobě.



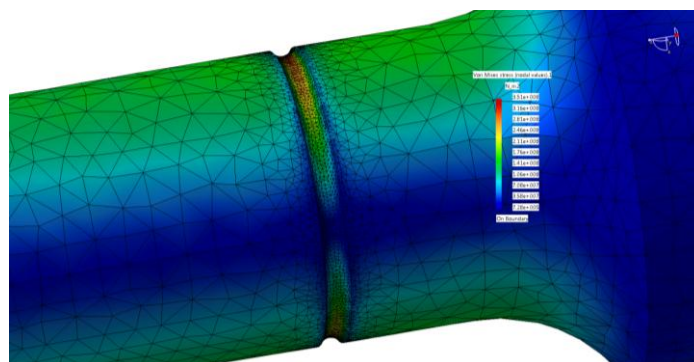
Obr.12 Počet cyklů do porušení u broušeného povrchu mikrokrystalickým korundem (SG) a soustruženého slinutým karbidem (SC) a vrubu vyrobeného zápichem tvarovým kotoučem kubického nitridu boru CBN

Na druhé straně lze z experiment usoudit, že použití nástrojů z rychlořezných ocelí (RO) k výrobě konstrukčních vrubů je naprosto nevhodné (obr.10). Přestože má tento materiál vysokou tepelnou vodivost, odvádí tedy teplo z místa řezu, dochází k vyššímu tření a nižší plastické deformaci vzhledem k velikosti vrubu. Z uvedených důvodů ani kvalita okolního povrchu výrazně neovlivní životnost součásti s vrubem. Mírně životnost navyšuje vysoká řezná rychlost při výrobě vrubu, ale při tom dochází k rychlé degradaci bříty, což výrazně zvyšuje výrobní náklady.

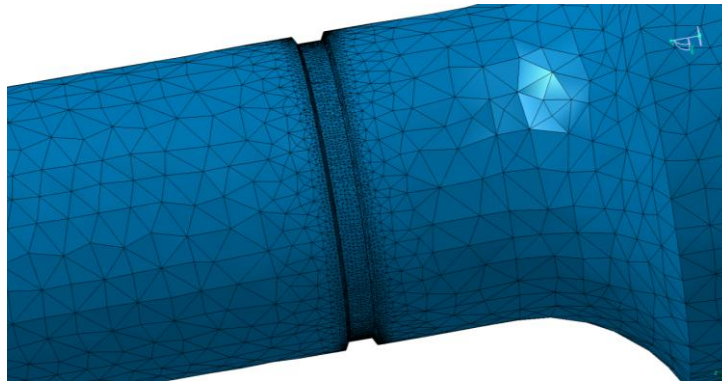
Obr.10 – 12 potvrzují vysoký vliv způsobu výroby vrubu na jeho provozní životnost, samozřejmě ve vztahu ke kvalitě okolního povrchu. Kombinací zatížení povrchu i vrubu při jejich obrábění dochází ke vzájemnému ovlivnění a tak je nutné stále sledovat množství tepla generované daným způsobem obrábění a velikost plastické deformace.

3 Analýza metodou konečných prvků

Pro podporu praktických výsledků byly zadány okrajové podmínky a provedena simulace zatížení. V softwaru CATIA V5 byl vzorek včetně vrubů namodelován a následně provedena statická analýza metodou konečných prvků. Pro numerickou analýzu je materiál považovaný za izotropní s Youngovým modulem pružnosti 2e5 MPa, Poissonova konstanta je $\mu=0,266$. Matematický model předpokládá platnost Hookova zákona při modelovaném zatěžování. Síť konečných prvků je tvořena čtyřstěny s hranou délky 2 mm, pouze v oblasti vrubu bylo zvoleno vzhledem k rozměrům vrubů zjemnění sítě s elementy velikosti 0,2 mm. Síť je nestrukturovaná, automaticky generovaná v softwaru CATIA V5. Numerická analýza byla provedena s lineárními elementy.



Obr.13 Tyčka s broušeným vrubem, von Misesovo napětí, detail v oblasti vrubu



Obr.14 Detail sítě konečných prvků v místě soustruženého vrubu

Z výpočtů je patrná oblast největšího napětí soustředěná v oblasti vrubů. Maximální hodnoty von Misesova napětí jsou dle výpočtu v případě soustruženého vrubu vyšší, nežli v případě vrubu broušeného, je však nutné uvážit vliv sítě v oblasti soustruženého vrubu v místech malých poloměrů, které jsou aproximovány pouze jedním elementem v příčném směru z důvodu zachování rozumného počtu elementů. Tím vznikají v síti konečných prvků hrany, které mohou vést k určitému zkreslení výsledku.

4 Závěr

Výsledky výzkumu dokladují vysoký vliv způsobu výroby konstrukčního vrubu na jeho dynamickou únosnost danou počtem zatěžujících cyklů do porušení místa vrubu. V případě součástí opatřených konstrukčním vrubem hraje vysokou roli kombinace velikosti deformace a tepelného zatížení jak v místě samotného vrubu, tak i přenosem hranice poškození okolního povrchu. Výpočtové metodiky zohledňují právě drsnost a tedy parametr okolí vrubu, ale nezahrnují parametry integrity vlastního vrubu. Výše uvedený výzkum prokazuje vliv vytvoření povrchu okolí vrubu na jeho chování a následně zúročuje vlastnosti dosažené při výrobě (případně dokončení) vrubu. Vruby byly zatěžovány třemi typy zatížení. Pro praxi je zde řada nových poznatků, ale je nutné se zabývat vlivem výroby konstrukčního vrubu na kombinované typy zatížení, zejména kombinaci krutu a ohybu za rotace. Při získání výsledků jednotlivých zatížení je potom možné stanovit lépe okrajové podmínky a daná zatížení simulovat a predikovat chování konstrukčního vrubu po určitém způsobu jeho výroby.

Literatura

- [1] BENEDETTI, M., FONTANARI, V. *Influence of Residual Stress Relaxation on Plain and Notch Fatigue of Shot Peened Al-7075-T651*. SEM Proceedings, 2009, New Mexico, USA
- [2] HOLEŠOVSKÝ, F.: *Formation and meaning of residual stress of ground surfaces*. International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering, No.1, vol.3 (2010) p.52-63, ISSN 1753-3465
- [3] HOLEŠOVSKÝ, F.; NOVAK, M.; LATTNER, M. *Influence of Machining Process on Design Notch Performance*. Precision machining VI, Key Engineering Materials - Trans Tech Publications Inc., UK 2012, Vol. 496, 217p. ISBN 978-3-03785-297-2
- [4] KOCMAN, K. *Optimalizace dokončovacích operací výrobních procesů*. Strojírenská technologie, 3/2012, vol.XVII., str.164-169
- [5] KOLAŘÍK, K., BERÁNEK, L. *Integrita povrchu dynamicky namáhaných komponent dekantační odstředivky*. Strojírenská technologie, 1-2/2012, vol.XVII., str.38-46
- [6] MADL, J., RAZEK, V., KOUTNÝ, V., KAFKA, J.: *Surface Integrity in Notches Machining*. Manufacturing Technology, June 2013, Vol. 13, No. 2, pp-187-193
- [7] MALKIN, S.: *Grinding Technology – Theory and applications of machining with abrasives*, SME, Deaborn, Michigan (1989)
- [8] MARINESCU D. I.; ROWE, W. B.; DIMITROV, B., INASAKI Ichiro., *Tribology of abrasive machining processes*. William Andrew, Inc.. United States. 2004. ISBN: 0-8155-1490-5

- [9] NOVÁK, M., NÁPRSTKOVÁ, N., CAIS, J. *Vliv řezných podmínek na drsnost povrchu při broušení oceli EN ISO X38CrMoV5*. Strojírenská technologie, 2/2014, vol. XIX., str. 106-111
- [10] PETERSON, R. E. *Stress concentration factors*. New York: J. Wiley & Sons, 1974. ISBN 0-471-68329-9
- [11] ROKYTA, L., LUKOVICS, I. *Výzkum vlivu poměru brusiv na jakost povrchu při broušení*. Strojírenská technologie, 1-2/2012, vol. XVII., str. 93-95
- [12] ROSENBERG, G., JUHÁR, E.: *Fatigue resistance of dual phase steels in presence of microstructural inhomogeneities*. Manufacturing Technology, December 2012, Vol. 12, No. 13, pp. 217-221
- [13] SADELER, R., OZEL, A., KAYMAZ, I., TOTIK, Y.: *The Effect of Residual Stresses Induced by Prestraining on Fatigue Life of Notched Specimens*, JMEP, vol. 14 (2005) p. 355, ISSN 1059-9495

Abstract

Article: Effect of design notch properties on its behaviour

Author: Lattner Michal, Ing.
Holešovský František, Prof., Dr., Ing.
Novák Martin, doc. Ing., Ph.D.
Vysloužil Tomáš, Ing., Ph.D.

Workplace: Faculty of Production Technology and Management, J.E.Purkyně University in Ustí nad Labem

Keywords: dynamical load, machining, notch, stress, finishing

For many manufactured components, we find various types of notches, such as grooves, step and holes. They have a tend to be the place where is concentrated stress, so called the macroscopic stress concentrator. In this area is higher risk of part destruction. In many cases the designer prescribe unnecessarily high surface quality. It is necessary to maintain adequate quality of the surface, and also necessary that the component has attained a high durability. The paper deals with the influence of machining technology carrying capacity of notched components. As the test material was used steel Fe510 according to EN ISO (11523, according to CSN 42 0002).

In experiment was machined material Fe510 . On this material was created two notches with same shape and several surrounding areas were machined by different machining methods (see Tab. I). Roughness was measured on samples and then the samples were tested to cyclic load.

In the case where the notch was created by cubic boron nitride has been demonstrated to favorably influence machined using sintered carbide (Fig.11). In addition, you can see the positive influence of microcrystalline corundum. In the case where the notch was created by the blades from high speed steel, the most appropriate technology for machining the surface showed a microcrystalline corundum grinding (Fig.10). Vice versa machining by sintered carbide had the worst impact.

If we compare the effect of roughness for durability components, so in notch created by HSS is possible to see positive impact finishing technologies and with lower surrounding surface roughness the sample reach a higher number of cycles.

In notch grinding by cubic boron nitride is also possible to see the influence of finishing technology, but the machined surface of the sintered carbide point out the fact that it is necessary to examine this issue more deeply.

For the ground surface and ground notch we can form up the mathematical relations (Fig.7) just as for the turned surface and ground notch (Fig.8) with very high correlation.

