

ZVÝŠENÍ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI MATERIÁLŮ METODOU LASER SHOCK PEENING

INCREASE OF MATERIAL CYCLE FATIGUE LIFE TIME USING THE LASER SHOCK PEENING METHOD

Zbyněk Špirit ^{a,b)}, Jan Kaufman ^{c)}, Jan Brajer ^{c)}, Josef Strejcius ^{a)} a Michal Chocholoušek ^{a)}

^{a)} Centrum výzkumu Řez s.r.o., Morseova 1245/6, Plzeň, e-mail: zbynek.spirit@cvrez.cz

^{b)} Katedra materiálu a strojírenské technologie, Západočeská univerzita v Plzni

^{c)} HiLASE, Fyzikální Ústav AV ČR, v. v. i.

Abstrakt

Laser Shock Peening (LSP) se řadí mezi moderní bezkontaktní technologie zpevňování povrchu kovových materiálů na principu vzniku rázových vln, které se generují během interakce krátkých laserových pulzů s povrchem materiálu. Rázové vlny v materiálu vyvolávají strukturní změny, které mají za důsledek vznik zbytkového tlakového napětí a zvýšení tvrdosti, což obecně vede ke zlepšení únavových vlastností materiálu, zabraňování vzniku a šíření trhlin a zlepšuje odolnost vůči koroznímu praskání a opotřebení. V tomto článku se zabýváme aplikací technologie LSP na vzorky z nerezové austenitické oceli 08Ch18N10T, kdy po ovlivnění došlo k nejméně desetinásobnému prodloužení životnosti materiálu při vysokocyklických únavových zkouškách.

Abstract

Laser Shock Peening (LSP) is one of the modern contactless technologies for surface reinforcement of metallic materials. The technology is based on the shock wave principle generated during the interaction of short laser pulses with the surface of the material. Shock waves in the material induce structural changes that result in residual compressive stress and increase in hardness, generally resulting in improved fatigue properties of the material, preventing crack initiation and propagation, and improving resistance to corrosion cracking and wear. This paper deals with the application of LSP technology to stainless austenitic steel 08Ch18N10T, when the lifetime of the influenced material was prolonged at least ten times in the high-cycle fatigue tests.

Úvod

Technologii laserového vyklepávání neboli Laser Shock Peening (LSP) lze popsat jako metodu ovlivnění povrchu materiálu pomocí silných rázových vln, které vznikají při interakci krátkých (ns) vysokoenergetických laserových pulzů s hmotou. Vznik technologie lze vysledovat do počátku 70. let [1], nicméně první reálná aplikace přišla až v 90. letech, a to v podobě řešení problému odlamujících se lopatek leteckého motoru amerického bombardéru B1 a stíhacího letounu F101 v důsledku vnějšího poškození [2]. Od té doby byla technologie LSP aplikovaná k řešení dalších průmyslových problémů jako korozní praskání tlakových reaktorových nádob v Japonských jaderných elektrárnách [3] nebo tvarování křídel Boeingu 747-8. Hlavní překážkou v proniknutí technologie k menším aplikacím byla nedostupnost dostatečně výkonných malých levných laserových zdrojů. Avšak rapidní vývoj levných laserových zdrojů v posledních letech otevřel mnohé dveře v nejrůznějších oblastech výzkumu a průmyslových aplikací.

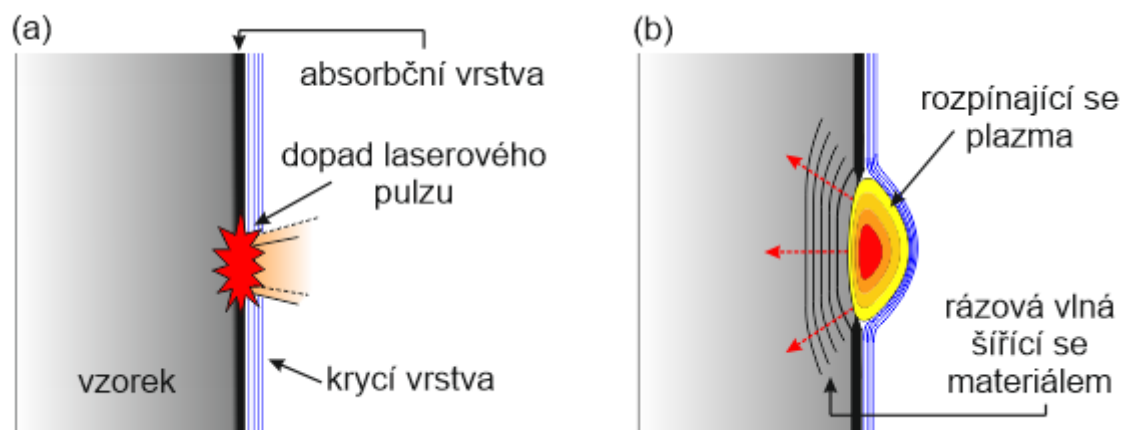
Z konvenčních procesů má k LSP nejbližší kuličkování [4], kdy je povrch materiálu ostřelován kovovými nebo skleněnými projektily o vysoké rychlosti. V tomto případě rovněž dochází ke vzniku tlakových zbytkových napětí, nicméně oproti LSP dosahují malých hloubek (cca 250 μm), zatímco u LSP sahá napětí do hloubky typicky přes 1 mm, v závislosti na tloušťce

vzorku. Další výhodou LSP oproti kuličkování je přesná kontrola nad místem dopadu jednotlivých laserových pulzů, zatímco pokrytí větších ploch se u kuličkování dosahuje statistickým překryvem náhodných dopadů jednotlivých projektilů. Výsledná drsnost povrchu po zpracování LSP je rovněž lepší, kdy se u kuličkování musí výsledný povrch většinou dobrousit nebo doleštit, zejména pak u aplikací, kde opotřebení materiálu hraje roli.

Technologii LSP lze aplikovat na širokou škálu materiálů, od nejrůznějších hliníkových slitin [5], čtených typů oceli [6] a měděných slitin [7] až po zinek [8], slitiny niklu [9], slitiny hořčíku [10], amorfních kovů [11] a dalších.

Princip LSP technologie

Před ovlivněním je vzorek pokryt tenkou absorbční vrstvou, což nejčastěji bývá černá lepicí páska nebo černá barva. Tato vrstva napomáhá absorpci laserového záření, ale hlavně pak chrání povrch vzorku před tepelnými jevy, které doprovázejí absorpci laserového pulzu. Působení na vzorek je pak čistě mechanického rázu. Při ovlivnění po vzorku laminárně stéka uniformní vrstva vody, jejíž funkce je dočasné uvěznění vzniklého rozpínajícího se plazmatu na povrchu vzorku, což vede ke vzniku déle trvajících mechanických tlaků (desítky ns) o větší velikosti (jednotky GPa) [12]. Díky tomuto jevu není k dosažení vysokých tlaků potřeba vakua [1]. Dopadající laserový pulz je fokusován čočkou, projde vodní vrstvou a odpaří malou část absorbční vrstvy (obr. 1a). Vznikne rapidně se rozpínající plazma, které absorbuje zbytek pulzu. Plošná hustota výkonu se přitom pohybuje od 1 do 10 GW/cm². Při rozpínání plazmatu vzniká rázová vlna, která se šíří materiálem (obr. 1b). Pokud je tlak dostatečný, dojde k překročení elastického limitu materiálu a v místě dopadu pulzu vznikne lokální plastická deformace. To má za následek vznik tlakových zbytkových napětí sahající do hloubky větší než 1 mm. K rovnoměrnému ovlivnění větší plochy se ovlivňovaný vzorek vůči laseru posouvá a jednotlivé pulzy se tak skládají vedle sebe v předem definovaném vzoru s nenulovým překryvem. Strategie ovlivnění má vliv na rozložení zbytkových napětí [5].



Obr. 6: Zjednodušené schéma LSP procesu. Dopadající laserový pulz odpaří absorbční vrstvu a mezi vzorkem a vodní vrstvou vznikne expandující plazma, které v materiálu vyvolá rázovou vlnu.

Materiál

Jako testovací materiál byla použita austenitická ocel 08Ch18N10T s certifikátem EN 10204/3.1 pro použití v jaderném průmyslu. 08CH18N10T ((AISI 321, 1.4541) jde o chrom-niklovou stabilizovanou ocel žáruvzdornou ocel. Ocel se hojně používá v jaderném průmyslu, například jako obálka tlakové nádoby VVER reaktorů, potrubí pro primární okruh

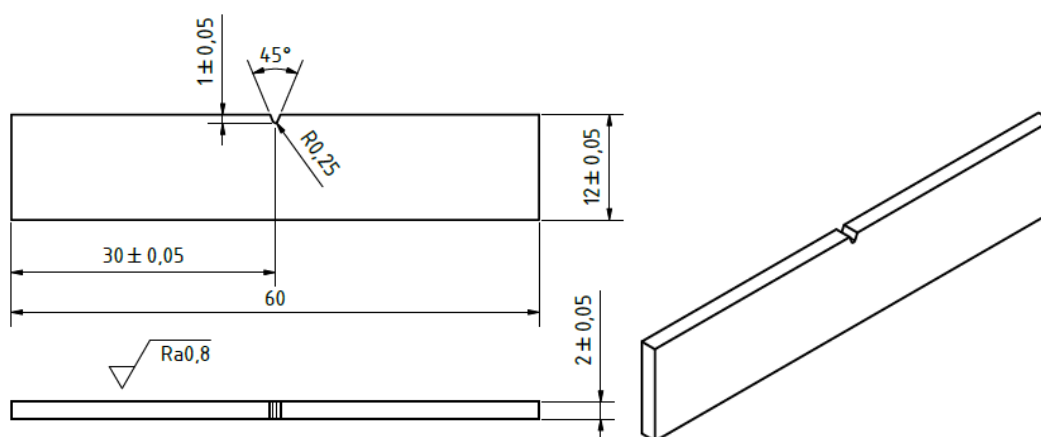
chlazení a další [14]. Komponenty bývají často únavově namáhané a musejí odolávat koroznímu prostředí za vyšších teplot. Základní chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 1 a tab. 2. U materiálu 08CH18N10T byla testována odolnost proti vysoko cyklické únavy v ohybu. Pro HCF zkoušky byl vybrán typ zkušebního tělesa, viz obr. 2.

Tab. 1: Základní chemické složení – 08CH18N10T

Materiál	Fe [wt.%]	C [wt.%]	Mn [wt.%]	Si [wt.%]	P [wt.%]	S [wt.%]	Cr [wt.%]	Ni [wt.%]	Cu [wt.%]	Mo [wt.%]	Ti [wt.%]
08CH18N10T	-	0,05	1,68	0,57	0,02	0,001	17,5	9,9	0,06	0,06	0,47

Tab. 2: Základní mechanické hodnoty – 08CH18N10T

Materiál	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [%]
08CH18N10T	248	565	54,5

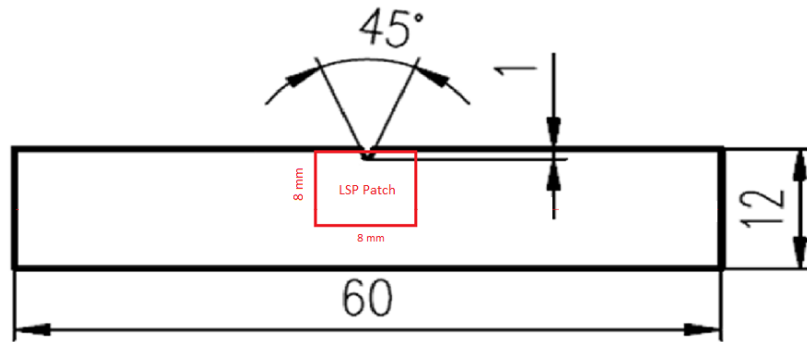


Obr. 2: Zkušební těleso pro únavové zkoušky třibodovým ohybem

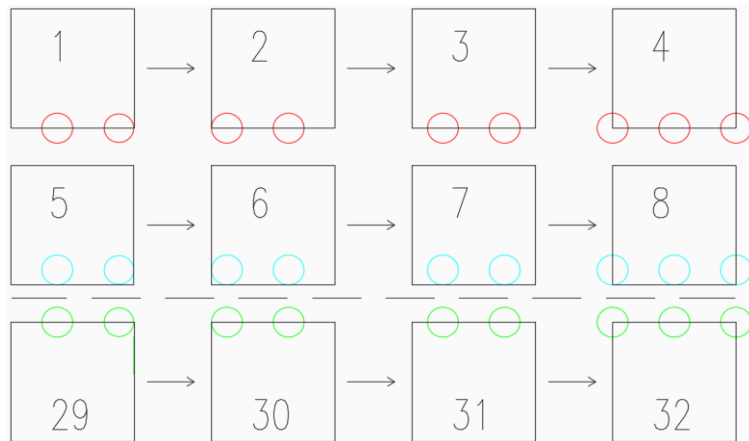
Experimentální činnost

Hlavním cílem experimentu bylo zvýšení mechanických vlastností (vysoko cyklická únava) pomocí technologie LSP. Experiment se zaměřil na porovnání únavových vlastností materiálu 08CH18N10T před a po aplikaci LSP. Zpevněná oblast na vzorku měla rozměr 8x8 mm a byla aplikována z obou stran zkušebního tělesa, viz obr. 3. Pro zpevnění této oblasti byl použit laserový systém Bivoj ve výzkumném centru HiLASE, který dodal pulzy o energii 2,5 J, s délkou pulzu 10 ns, s velikostí laserové stopy 2 mm a s plošnou hustotou výkonu 6,25 GW/cm². Opakovací frekvence laseru byla 10 Hz. Vzorky byly ovlivněny z obou stran 1 vrstvou s 50% překryvem pulzů. Plošná hustota energie byla 250 J/cm². Během ovlivnění byl vzorek pokryt černou vynilovou páskou o tloušťce 120 um a po vzorku stékala laminární vrstva vody 2 mm tlustá.

Pro dosažení co největšího tlakového zbytkového napětí v místě pod vrubem zkušebního tělesa byla použita strategie polohy a pořadí jednotlivých vtisků dle obr. 4 [13].



Obr. 3: Ovlivněná oblast na zkušební tělese pro mechanické zkoušky

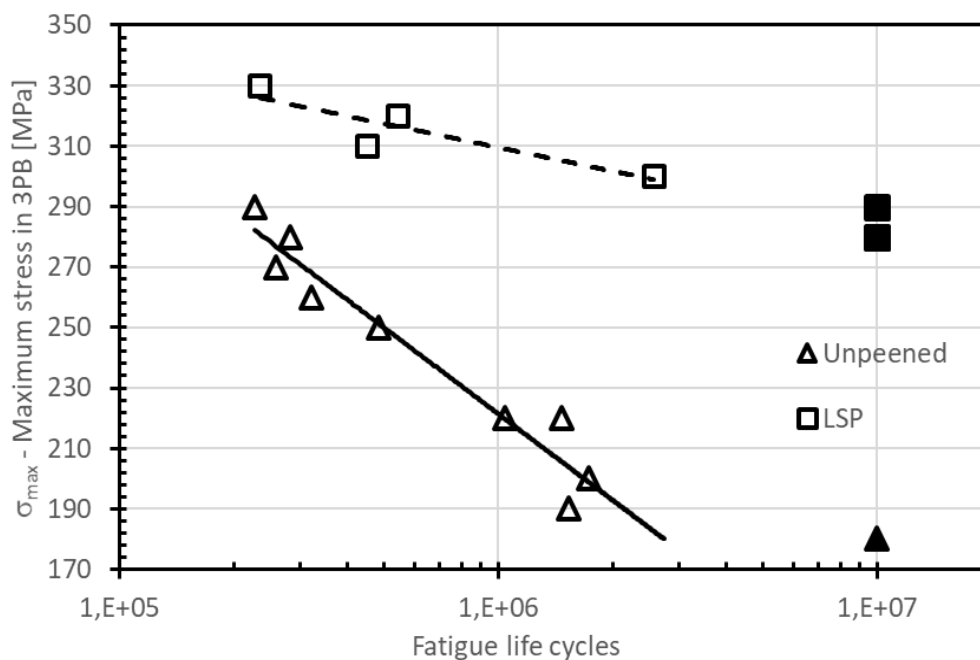


Obr. 4: Strategie vtisků po jednotlivých řádcích v ovlivněné oblasti 8x8 mm

Únavové zkoušky byly provedeny na Elektrodynamickém pulsátoru – RUMUL v režimu síly. Vzorky byly namáhány třibodovým ohybem se vzdáleností podpor 40 mm, $R = 0,1$, frekvencí 90-92 Hz, stopovací podmínka byla při poklesu frekvence o 20 Hz, teplota testování byla 22 °C.

Výsledky

Výsledkem únavových zkoušek materiálu 08CH18N10T ve zpevněném a nezpevněném stavu jsou na obr. 4. Hodnota únavové životnosti pro jednotlivé zkušební tělesa byla vyhodnocena při poklesu delta frekvence o 20 Hz (trhlina se šířila cca. do poloviny výšky zkušební tělesa). Z únavových křivek je patrné, že únavová životnost (10^7 cyklů) u zpevněného materiálu je na hodnotě σ_{\max} 280 MPa u nezpevněného materiálu 180 MPa. Zpevněný materiál dosahuje o více jak 50 % vyšší únavovou životnost než nezpevněný.



Obr. 4: Únavová životnost materiálu 08Ch18N10T ve zpevněném (LSP) a nezpevněném stavu

Závěr

Technologie LSP byla od doby svého vzniku úspěšně aplikována na vyřešení několika významných průmyslových problémů, nicméně její záběr byl vždy poměrně úzký. Jejím širšímu rozšíření především bránily malá rychlost ovlivnění a vysoká cena. S novou generací levnějších, výkonných a spolehlivých laserových zdrojů má LSP potenciál dostat se do popředí špičkových průmyslových technologií ovlivnění povrchu.

Účinky LSP byly demonstrovány na testech vysokocyklické únavy u asutenitické oceli 08CH18N10T. Z výsledků měření vyplývá, že při použití technologie LSP za účelem zpevnění povrchu zkušebních těles namáhaných tříbodovým ohybem, byla zvýšena únavová životnost materiálu o více jak 50%. Pro dosažení maximálního tlakového vnitřního napětí v oblasti vrubu byla použita strategie rozmístění jednotlivých vtisků dle numerické simulace.

Poděkování

Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108.

Literatura

- [1] Anderholm, N. C. (1970): *Laser generated stress waves*. Applied Physics Letters, Vol. 16, No. 3, paper 10.1063/1.1653116. ISSN 0003-6951
- [2] Clauer, A., Koucky, J. (1991): *Laser Shock Processing Increases the Fatigue Life of Metal Parts*. Materials and Processing Report, Vol. 6, No. 6, doi: 10.1080/08871949.1991.11752452. ISSN 1066-7857

- [3] Sano, Y., Akita, K., Masaki, K., Ochi, Y., Altenberger, I., Scholtes, B. (2006): *Laser Peening without Coating as a Surface Enhancement Technology*. Journal of Laser Micro / Nanoengineering, Vol. 1, No. 3, doi: 10.2961/jlmn.2006.03.0002. ISSN 1880-0688
- [4] Gujba, A. K., Medraj, M. (2014): *Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening*. Materials, Vol. 7, No. 12, pp. 7925-7974. ISSN 1996-1944
- [5] Hfaiedh, N., Peyre, P., Song, H., Popa, I., Vignal, V. (2015): *Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum alloy*. International Journal of Fatigue, Vol. 70, pp.480-489, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2014.05.015. ISSN 0142-1123
- [6] Yoshihiro, S., Yuji, S., Rie, S., You-Chul, K. (2012): *Fatigue Life Enhancement of Fillet and Butt Welded Joints after Laser Peening*. Transactions of JWRI, Vol. 41, No. 1, pp. 71-76. available on <http://hdl.handle.net/11094/23163>, ISSN 03874508
- [7] Ye, Ch., Suslov, S., Lin, D., Liao, Y., Cheng, G. J. (2014): *Cryogenic ultrahigh strain rate deformation induced hybrid nanotwinned microstructure for high strength and high ductility*. Journal of Applied Physics, Vol. 115, No. 21, paper 213519, doi: 10.1063/1.4881555. ISSN 0021-8979
- [8] Thareja, R.K., Shukla, S. (2007): *Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles by laser ablation of zinc in liquid*. Applied Surface Science, Vol. 253, No. 22, pp. 8889-8895, doi: 10.1016/j.apsusc.2007.04.088. ISSN 0169-4332
- [9] Bugayeva, A.A., Guptab, M.C., Payne, R. (2006): *Laser processing of inconel 600 and surface structure*. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 44, No. 2, pp. 102-111, doi: 10.1016/j.optlaseng.2005.04.014. ISSN 0143-8166
- [10] Zhang, Y., You, J., Lu, J., Cui, Ch., Jiang, Y., Ren, X. (2010): *Effects of laser shock processing on stress corrosion cracking susceptibility of AZ31B magnesium alloy*. Surface and Coatings Technology, Vol. 204, No. 24, pp. 3947-3953, doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.03.015. ISSN 0257-8972
- [11] Fu, J., Zhu, Y., Zheng, C., Liu, R., Ji, Z. (2014): *Effect of laser shock peening on mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass*. Applied Surface Science, Vol. 313, pp. 692-697, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.06.056. ISSN 0169-4332
- [12] Fabbro, R., Fournier, J., Ballard, P., Devaux, D., Virmont, J. (1990): *Physical study of laser produced plasma in confined geometry*. Journal of Applied Physics, Vol. 68, No. 2, paper 775, doi: 10.1063/1.346783. ISSN 0021-8979
- [13] Bhamare, S., Ramakrishnan, G., Mannava, S. R., Langer, K., Vasudevan, V. K., Qian, D. (2013): *Simulation-based optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy*. Surface and Coatings Technology, Vol. 232, pp. 464-474. ISSN 0257-8972
- [14] Fekete, B., Szekeres, A. (2015): *Investigation on partition of plastic work converted to heat during plastic deformation for reactor steels based on inverse experimental-computational method*. European Journal of Mechanics – A/Solids, Vol. 53, pp. 175-186. ISSN 0169-4332