

Ing. Jan Brajer

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Školitel: prof. Ing. Jan Mádl, CSc.

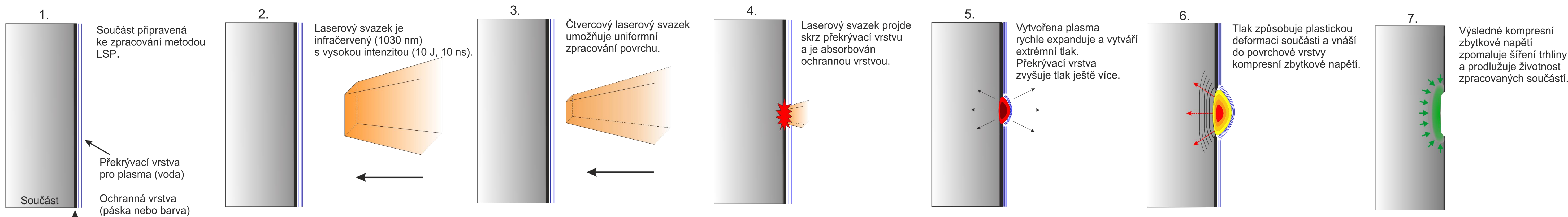
Školitel specialista: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

1. Cíle disertační práce

Prvním cílem doktorské práce je na základě teoretických poznatků specifikovat technologii Laser shock peening, závislost velikosti zbytkového napětí na technologických parametrech a určit možnosti a omezení technologie. Následně popsat konvenční i nekonvenční metody zpracování povrchu součástí pro možnost porovnání využitelnosti technologie Laser shock peening.

Druhým cílem práce je určit vhodné metody měření zbytkového napětí po ovlivnění metodou LSP v závislosti na předpokládané hloubce ovlivnění. U měření zbytkových napětí v povrchu i u dalších vlastností lze předpokládat rozdílné výsledky oproti konvenčním metodám dokončování. Rozdíly při určování měřící metody lze předpokládat hlavně z důvodu větší hloubky ovlivnění a tím změně přesnosti měření a to hlavně hloubko pod povrchem. Vyber metody můžou ovlivnit také rozdílné náklady na měření kvůli potřebě vytváření hloubkového profilu vlastností dosahujícího až několik milimetrů.

Posledním cílem práce je provést ekonomickou analýzu LSP procesu a použitých měření. Bude vyjádřena závislost nákladů na míře a hloubce ovlivnění zpracovaného povrchu.



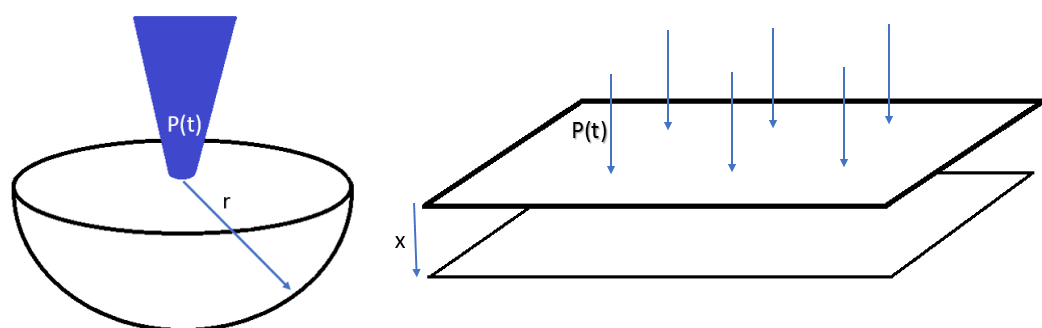
4. Modelace tlaku vyvolaného plazmatem

Pro modelaci tlaku na povrchu materiálu vyvolaného plazmatem je potřeba určit intenzitu energie. Intenzita energie je vyjádřena jako funkce frekvence, doby pulzu, výkonu a velikosti spotu, jak je uvedeno v rovnici (4.1). Ostatní parametry jsou absorpce energie laseru, jak je uvedeno v rovnici (4.2), zatížení nebo tlak (P), který musí být větší než dynamická mez kluzu pro zaručení plastické deformace. I je intenzita laseru v GW / cm², P_{avg} je průměrný výstupní výkon ve W, f je laserová frekvence v Hz, pt je doba pulzu v ns, a je laserová stopa plocha v cm². Následně lze spočítat Hugoniot Elastický Limit (HEL) (4.5)

$$(4.1) I = \frac{GW}{cm^2} = \frac{P_{avg}}{f(pt)a}$$

$$(4.2) Fluence \left(\frac{J}{cm^2}\right) = \frac{Laser\ pulse\ energy\ (J)}{focal\ spot\ area\ (cm^2)}$$

$$(4.3) P(GPa) = 0.01 \left(\frac{\alpha}{2\alpha + 3}\right)^{1/2} Z^{1/2} p^{1/2}$$

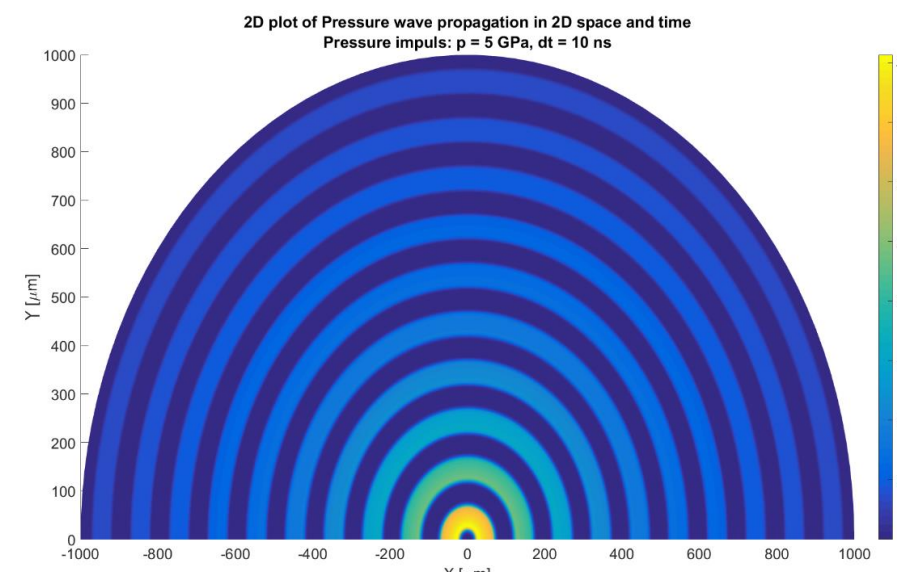


Rovnice (4.3) obsahuje konstanty na základě experimentálních pozorování. Velká rozmanitost konstant je přičítána typu ablační vrstvy [16], přikryvacího média [207] a vlastnosti cílového materiálu [144][197]. Tento model je popisován dle rovnice (4.3).

Kde α je poměr tepelné k vnitřní energii, Z je redukovaná impedance cílového materiálu a přikryvacího média, θ je Poissonův poměr. Rovnice (4.4) ukazuje sníženou velikost impedance tlaku při procesu (Z), kde materiál vzorku (Z₁) a přikryvacího média (Z₂) se vztahuje k hustotě a rychlosti zvuku v materiálu.

$$(4.4) \frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$$

$$(4.5) HEL = \frac{1 - \theta}{1 - 2\theta} \sigma_y^{dyn}$$



Šíření vlny prostorem ve sférických souřadnicích pak popisuje následující rovnice

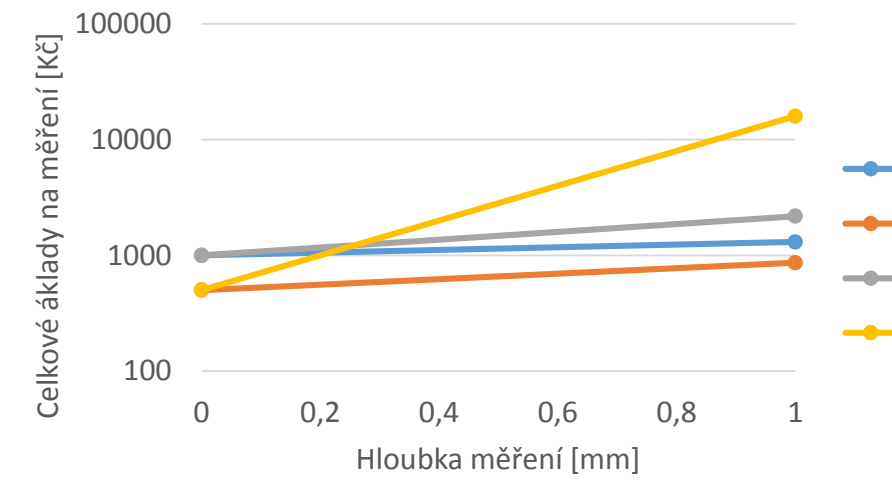
$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad u = u(r, t)$$

Využitím Fourierovy transformace lze z parciální diferenciální rovnice v časové doméně, přejít k obyčejné diferenciální rovnici ve frekvenční doméně. Tato rovnice pak má tvar:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial u(r, \omega)}{\partial r} \right) = -\frac{\omega^2}{c^2} U$$

6. Ekonomické zhodnocení použitých metod měření zbytkového napětí

Náklady na měření v závislosti na velikosti měřené hloubky



	PC	Nn	Nz	t _s	Nc
	[mil. Kč]	[Kč]	[Kč/hod]	[hod/mm]	[Kč]
Odvrtávání r.	1,2	1 000	1 216	0,25	1 304
Odvrtávání d.	2,5	500	1 450	0,25	863
Odléptávání	1	1 000	1 180	1	2 180
Rentgen	3	500	1 541	10	15 905

V tabulce a vynesném grafu PC jsou pořizovací náklady zařízení. Nn jsou fixní náklady potřebné pro samotnou přípravu vzorku, tyto náklady jsou vynaložené na každý vzorek bez ohledu, do jaké hloubky se měří. Variabilní náklady Nz jsou vztaheny k jednotce času (hodině měření) a obsahují odpisy zařízení, mzdu operátora a spotřební materiál spotřebovaný během měření. Čas t_s je doba měření potřebná pro zjištění zbytkových napětí v hloubce 1 mm. Celkové náklady Nc zahrnují všechny náklady spojené s měřením.

Analýzou nákladů na měření zbytkového napětí bylo zjištěno, že se velmi liší pro různé hloubky měření. Zatímco u konvenčních technologií dosahujeme hloubky zpevněného povrchu několik desítek milimetrů u technologie LSP musí být počítáno s hloubkami přesahujícími jeden milimetr. Při požadavku měření větší hloubky se začínají výrazně lišit náklady na jednotlivá měření.

Na logaritmické stupnici celkových nákladů je zřetelné, že měření rentgenem je velmi drahou metodou zjišťování zbytkových napětí ve velkých hloubkách. Oproti tomu metoda odvtávání je málo citlivá na hloubku měření. Metoda odléptávání je také velmi málo citlivá na hloubku měření. Jak metoda odvtávání, tak i metoda odléptávání jsou náročnější na přípravu, ale následně měření je výrazně jednodušší. Měření rentgenem vyžaduje přípravu mezi každým krokem měření a záleží jen na hustotě měřených bodů, jak bude zjištěno hloubkového profilu zbytkových napětí náročné.

7. Ekonomické zhodnocení použití technologie LSP

Nedílnou součástí je zhodnocení možnosti metody LSP za použití nové použitých výkonů laseru a návrh nových aplikací na základě vypočtené produktivity a ekonomické výhodnosti. V případě řešení nové technologie se může odhad nákladů na zakázku lišit o desítky procent. Pro Ekonomický model bylo vycházeno z reálných intenzit a rychlosti technologie ovlivňování a z potřebného překryvu pro dostatečnou účinnost.

Příklad:			
Velikost zakázky	P _z	1 000	ks
Velikost ovlivňované plochy na dílcích	S _o	1 000	mm ² /ks
Produktivita - za minutu	P _{min}	1 200	mm ² /min
Jednotkový čas vedlejší	T _{sv}	3	min
Čas na kontrolu nastavení	T _{sk}	1	min
Počet kontrol za směna	T _{sk}	1	směna ⁻¹
Délkový čas	T _{dc}	120	min
Přirážka směnového času	k _s	1,15	-
Celkové náklady na proces	N _o	5 742,8	Kč/hod
Nepřímá rezijní náklady	N _{nr}	20	%
Jednotkový čas strojí	T _{AS} = $\frac{S_o}{P_{min}}$	T _{AS}	0,83
Jednotkový čas TA	T _{sv}	T _{sv}	4,09
Jednotkový čas TA	T _{dc}	T _{dc}	4,70
Doba plnění zakázky	T _z	T _z	4840,2
Doba zpracování 1 ks	T _k	T _k	4,84
Počet směn na zakázku	T _s	T _s	10,08
Celkové náklady na zakázku	N _{cz} = $(1 + N_{nr}) \frac{T_{z0}}{60} + N_{nr}$	N _{cz}	555 928
Náklady na jeden kus	N _{ck} = $(1 + N_{nr}) \frac{N_{cz}}{P}$	N _{ck}	555,9

2. Laser shock peening

Laser shock peening je podskupinou technologií se souhrnným názvem Laser shock processing. Laser Shock Peening (LSP), neboli vytvzování povrchu materiálu rázovou vlnou vyvolanou laserem, je velmi moderní a progresivní technologií, která umožňuje výrazné zvýšení únavové životnosti cyklicky namáhaných součástí. Laserový paprsek generuje v povrchové vrstvě zpracovávaného materiálu tlaková zbytková napětí, která významně zlepšují únavové vlastnosti materiálu a omezují vznik a rozvoj povrchových trhlin. Díky svým možnostem tato technologie nalézá praktického uplatnění ve velmi náročných aplikacích zejména v leteckém průmyslu a lze předpokládat její rozšíření i na další oblasti. Propagace rázové vlny jde od maximálního tlaku dosaženého na povrchu za pomoci plazmatu směrem do materiálu, kde je postupně absorbována. Vzhledem k velmi malé délce pulzu při prostupu směrem do materiálu povrchový tlak postupně vymizí. Je velmi složité dokonale popsat dynamiku plazmatu na povrchu materiálu, kde dochází nejprve k postupnému nárůstu tlaku, až do jeho maxima a následně ztrátě tlaku expanzí plazmatu směrem od materiálu.

Šíření vlny je pak popsáno ve frekvenční doméně $U(r, \omega)$. Řešením rovnice ve frekvenční doméně lze vyjádřit ve tvaru funkce

$$U(r, \omega) = \frac{C_1(t)e^{i\omega t}}{r} + \frac{C_2(t)e^{i\omega t}}{2r\omega} \frac{\partial^2 U}{\partial r^2}$$

Vztah mezi deformací a napětím je daný rovnicí:

$$\tau(r, t) = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial r}$$

S okrajovou podmínkou:

$$\tau(0, t) = -p(t)$$

Dosažením inverzní Fourierovy transformace rovnic a využitím okrajové podmínky lze napětí vyjádřit ve tvaru

$$(3.12) \tau_z = \tau' \quad Z\text{ rovnice (4.11) tedy plyne:}$$

$$(3.13) \tau_z(x, t) = -pD \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{t - \frac{x}{c}}{x} \right)$$

Do závislosti vstupují konstanty C_{el} a C_{pl}, respektive elastická a plastická rychlost deformace v základním materiálu. V elastickoplastickém poloprostoru je hodnota zbytkového napětí v lineární části.

$$(3.14) L = \frac{C_{el} C_{pl} \tau}{C_{el} - C_{pl}} \left[\frac{p - (\sigma_y - \sigma_y)(1 + 2\mu)}{2\sigma_y(1 + \lambda/2\mu)} \right]$$

3. Měření vlastností po zpracování povrchu metodou Laser shock peening

Měření vlastností po zpracování povrchu metodou Laser shock peening je mírně odlišné od ostatních metod dokončování. Hlavní rozdílem je potřeba měření velké hloubky zbytkových napětí a tlaková zbytková napětí mohou dosahovat hloubky až několika milimetrů. Povrchové metody měření zbytkového napětí lze použít pouze v kombinaci s postupným odebráním materiálu. Dalším rozdílem je požadavek na spolehlivost měření, protože technologie LSP je často využívána v leteckém nebo jaderném průmyslu, požadavek na přesné určení dosažení předepsaných zbytkových napětí je velmi žádoucí a to i ve velkých hloubkách měření.

Celková integrita povrchu (zbytková napětí, povrchová drsnost, úchytky tvaru a rozměry) tak musí odpovídat provozním podmínkám, pro zajištění bezproblémového provozu opracovaných součástí. Pro měření zbytkového napětí po ovlivnění technologií laser shock peening jsou nejčastěji využívané metody rentgenová difrakce a odvtávání. Tyto dvě metody se velmi liší svým principem. Do experimentu byla přidána ještě metoda vetknutého nosníku, neboli metoda postupného odléptávání.

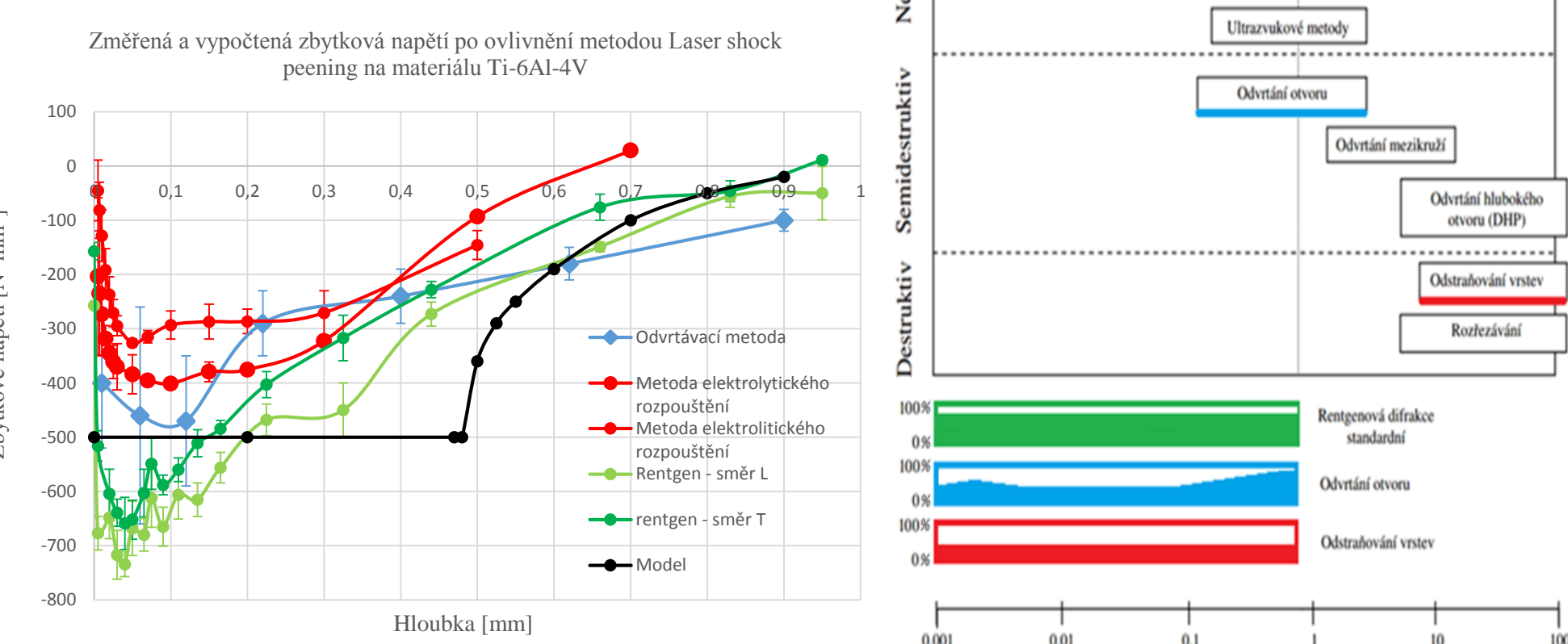
Tato závislost však neplatí v celé hloubce materiálu, protože při překročení meze plasticity materiálu se nemůže vytvořit větší zbytkové napětí než je jeho teoretické maximum. Vzdálenost, která odpovídá zlomu křivky, kde se protíná obálka maximálního zbytkového napětí a derivace tlakové vlny lze odvodit ze vztahu:

$$\sigma_{res} = \sigma_0 + \mu \epsilon^p \left(\frac{1+\nu}{1-\nu} \right) \left[1 - \frac{4(2)^{1/2}}{\pi} (1+\nu) \frac{z}{a} \right]$$

kde ν je Poissonovo číslo materiálu a veličina a je velikost čtvercové plochy pod laserem.

5. Porovnání výpočetního modelu a měření zbytkových napětí

Do jednoho grafu byl vyneseno zjednodušený model závislosti zbytkového napětí na hloubce a závislosti zbytkových napětí na hloubce změřené různými metodami



Spolehlivost měření rentgenovou difrakcí je velmi vysoká, proto je výhodné vztahovat k ní možnosti jednotlivých metod i modelu zbytkových napětí. Největší chyba měření v případě rentgenové difrakce vzniká nedokonalostí při odebrání materiálu leptáním. Metoda odvtávání je těsně pod povrchem (0,1 mm) materiálu dostatečně přesná, protože nástroj není opotřebováván a vzdálenost k tenzometrické ruzičce je také malá. Odvtáváním není možné zachytit přímo povrchové zbytkové napětí (do 0,02 mm), protože funguje na přirůstkovém principu porovnávání mezi vrstvami. Další nevýhodou jsou nepřesnosti ve střední hloubce měření (0,2 mm až 0,5 mm) kde většinou dochází k velkému rozptylu hodnot. Metodou odvtáváním se dá relativně přesně určit hloubka, kde zbytkové napětí z tlaku přechází do tahu (0,5 mm až 1,5 mm)

8. Využitelnost predikce vlastností povrchu

V závislosti na vyvinuté metodice je možné určit vhodnou měřící metodu pro kombinaci technologických parametrů. Při návrhu nového LSP pracoviště, je nutné počítat i s následným měřením zbytkového napětí a dalších vlastností povrchu.

Vyber zařízení pro měření zbytkových napětí může být proveden na základě navržené metodiky stejným způsobem jako při volbě vhodné měřící metody. Na základě popsané technologie, měření a ekonomické analýzy bylo navrženo pracoviště na ovlivňování povrchu metodou LSP a následně měření vlastností povrchu.



9. Splnění cílů disertační práce

Na základě teoretických poznatků byla specifikována technologie Laser shock peening a závislost velikosti zbytkového napětí na technologických parametrech. Následně byly popsány konvenční i nekonvenční metody zpracování povrchu součástí, zaměřené na změnu zbytkového napětí, pro možnost porovnání využitelnosti technologie Laser shock peening.

Dále byla určena vhodná metoda měření zbytkového napětí po ovlivnění metodou LSP v závislosti na předpokládané hloubce ovlivnění. U měření zbytkových napětí v povrchu i dalších vlastností byly potvrzeny rozdílné přístupy k měření oproti konvenčním metodám dokončování. Pro správné určení byl sestaven matematický model zbytkového napětí v povrchu součástí po ovlivnění metodou LSP. Na základě sestaveného modelu byly určeny vlastnosti povrchu ovlivněného metodou Laser shock processing v závislosti na procesních parametrech za použití velkého výkonu laseru. Byl proveden rozbor výsledků měření a přesnosti metod pro stanovení průběhů zbytkových napětí a jejich porovnání s modelem. Na základě poznatků celého procesu, vznikla ekonomická analýza LSP procesu a použitých metod měření v závislosti na míře a hloubce ovlivnění. Rozdíly při určování vhodné měřící metody, oproti konvenčním metodám ovlivňování, lze předpokládat hlavně z důvodu větší hloubky ovlivnění a tím rozdílným přesnostem měření a rozdílným nákladům na měření.