

ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ - VÝZNAMNÝ FAKTOR PROVOZNÍ SPOLEHLIVOSTI STROJNÍCH DÍLŮ

Klasické příčiny poškození částí strojů jako např. korozní praskání, křehký lom nebo únava materiálu jsou konstruktérům dobře známé a systematicky sledované už několik desetiletí. Skryté v záloze však čeká ještě jedno nebezpečí spolehlivého provozu strojírenských výrobků - zbytkové napětí. Problém jsou nejen s jeho identifikací a kvantitativním vyjádřením, ale především s pochopením nejrozmanitějších forem vzniku a možnými důsledky existence v reálných objektech. Zbytková napětí vyvolávají obtíže v souvislosti s většinou technologií tepelného, tepelně-chemického a mechanického zpracování kovů i slitin. Úloha, kterou hrají, je zcela specifická: zesilují nebo urychlují klasické mechanismy poškození.

Zájem o zbytková napětí v posledních letech vzrůstá, zvětšují se obavy z jejich nepříznivých účinků. Je to přirozené, protože se nelze vyhnout odpovědnosti za jakost výrobků, za technologickou kázeň, která v desítkách známých případech přestala být jen otázkou profesionální hrdosti, ale přešla do oblasti právních důsledků za ekologické katastrofy (havárie potrubí, nádrží apod.).

Praxe ukazuje, že mnoho inženýrů má o zbytkovém napětí jen velmi mlhavé představy. Takový poznatek přestane být překvapující, když si uvědomíme, jak málo místa je fyzikálním aspektům tenzometrické problematiky věnováno v učebních plánech na technických vysokých školách i v literatuře věnované strojírenské technologii. Výjimku u nás představuje specializovaná příručka Rentgenová tenzometrie z roku 1988 /1/.

Výchova technologů a konstruktérů pro práci v oboru experimentální analýzy napětí by měla dát vyčerpávající odpovědi na tři okruhy otázek:

1) Jaké metody měření zbytkových napětí jsou k dispozici?

2) Jak jsou tyto metody přesné a spolehlivé?

3) Jaké zařízení má být k měření použito, jak s ním zacházet a co lze od něj očekávat?

Současný stav může být charakterizován tak, že každý inženýr v průmyslu zůstává odkázán víceméně sám na sebe. Odborná literatura mu zpravidla pomáhá jen formulovat úkol, s nímž se pak obrací na výzkumnou laboratoř. O jaké problémy se jedná?

Do první skupiny náleží požadavky na řešení situace "post factum", kdy defekty, vznikající během provozu určitých součástí, nelze přijatelně objasnit žádnou běžně známou příčinou. (Teprve naposled se obvykle uvažuje i o případných účincích zbytkové napjatosti.) Typickým jevem v těchto případech bývá pokles zájmu zadavatele o další výzkum, jakmile se (třeba i náhodně) počet poškozených výrobků sníží pod únosnou mez.

Druhá skupina zahrnuje žádosti "preventivní". Nejčastěji jde o zjištění, jestli změnou technologického procesu (zaváděním alternativního způsobu povrchového zpevnění, tepelného zpracování, broušení apod.) nebo jiným typem materiálu (obvykle levnějším) nevznikne rozložení napětí, které by mělo za následek výrazné zhoršení užitných vlastností výrobku. Tento přístup je bezpochyby prozíravější a ekonomicky výhodnější.

Příkladem efektivního využití tenzometrických metod jsou poznatky o vlivu zbytkových tlaků na mez únavy. Především díky nedestruktivním rentgenografickým měřením byla nalezena optimální technologie mechanického zpevnění povrchu řady vysoce namáhaných součástí letadel, turbokompresorů, automobilových motorů aj. Jako zvláště účinný způsob, vyvolávající vysoké tlakové předpětí povrchových vrstev, se osvědčilo otryskávání ocelovými kuličkami nebo balotinou. Rentgenová tenzometrie umožnila spolehlivě prokázat souvislost zbytkového napětí a meze únavy. Tím zároveň přispěla k vyřešení problému zvýšení provozní spolehlivosti (bezpečnosti) mnoha strojírenských výrobků, a to způsobem podstatně levnějším, než navrhovali konstruktéři, tj.

použitím kvalitnějších, vesměs však nedostatkových slitin.

Zajímavý příklad toho, jak se na celkovém namáhání materiálu mohou podílet zbytková napětí, uveřejnila diagnostická laboratoř švédských loděnic v Malmö. Na vybraných místech ocelového skeletu námořního tankeru o výtlačku 250 tisíc tun bylo technikou odporové tenzometrie zjištěno, že výsledná vnitřní napjatost má ze 63% původ ve zbytkových napětích vzniklých svařováním, 16% připadá na montážní práce, 15% vyvolalo zatížení (náklad) tankeru a 6% odpovídá působení mořských vln.

Zborcení svařovaných dílů lze účinně předejít zatím jen snížením hladiny zbytkových napětí pomocí vhodného tepelného zpracování. Zabezpečit rychlou relaxaci zbytkových napětí je žádoucí u těch technologií sváření, při nichž mohou být svary ohroženy vodíkovou křehkostí. Kontrola uvolňování zbytkových napětí v řezu svaru se obvykle provádí destruktivně (odvrtáváním).

Předpověď distribuce zbytkových napětí vyvolaných za určitých známých podmínek může být principiálně formulována také pomocí matematického modelování. V poslední době se tento postup jeví stále reálnější vzhledem k dostupnosti výkonné výpočetní techniky.

V souvislosti s měřením napjatosti svarů se nedávno objevilo doporučení používat při svařování konstrukcí z hliníkových slitin zařízení, která zabráňují vzniku případné distorze vyvolané nerovnoměrností ohřevu. Takový postup sice prakticky eliminuje deformaci svařovaných dílů, hladina zbytkových napětí však může zůstat stejná, jako když omezující (tlakové) síly při sváření nepůsobily. Řešení problému je pak v žíhání na odstranění napětí. Jestliže půjde o rozměrnou konstrukci v exteriéru, stává se ovšem praktická realizace temperování problematická přinejmenším z hlediska finanční náročnosti. Východiskem může být změna projektu a nahrazení svarů šroubovými spoji. Jeden ani druhý postup nepřichází v úvahu u takových objektů jako jsou svařovaná potrubí (naftovody nebo plynovody).

S výjimkou sváření vznikají všemi nejvýznamnějšími operacemi zpracování kovů napětí, která lze označit povrchová. Jejich identifikace, kvalitativní i kvantitativní popis jsou podstatně snazší než v případě tenzometrické analýzy vnitřních oblastí zkoumaných součástí. Obecně platí, že optimalizaci užitečných vlastností materiálu vyhovují stavy tlakové zbytkové napjatosti. Splnění tohoto kritéria je však zpravidla neslučitelné s požadavkem produktivity výroby. Tlakového předpětí se nechá totiž dosáhnout spíše nižšími než vysokými rychlostmi obrábění, jako vhodnější jsou doporučovány "méně výkonné" měkčí pracovní nástroje, při kuličkování se dosáhne lepších výsledků s nepřilíš razantní aplikací měkčího otryskávacího materiálu. Analogicky je třeba posuzovat i broušení a vrtání. Při vysokých obrátkách brusného kotouče, velkých úběrech materiálu nebo rychlém posuvu vrtáku vznikají v blízkosti povrchu tahy. Tlaky jsou typické pro tradiční metody opracování (soustružení, frézování, protahování) a ostré řezné nástroje: příznivé předpětí mají i povrchy leštěné a hlazené (honované). Pro spolehlivé odstranění (relaxaci) napětí lze doporučit pomalejší průběhy tepelného zpracování s menším počtem temperovaných objektů v peci.

U technologií, kde působí kombinace účinků mechanických a tepelných, je výsledný stav napjatosti určen tím z obou faktorů, který převažuje. S mechanickým působením spojujeme obvykle tlaková napětí, tahy bývají naopak důsledkem dominujících efektů tepelných. Tyto kvalitativní závěry o souvislosti mezi zbytkovou napjatostí a technologií zpracování kovových materiálů se čas od času zdají málo exaktní. Je to vždy, když se objeví informace, že bude vyráběn jednoduchý a na obsluhu nenáročný přístroj k analýze zbytkových napětí na čemkoliv a kdekoliv. Obvykle jde o různá zařízení založená na měření magnetických nebo akustických (ultrazvukových) veličin. Jejich praktické možnosti byly zatím vždy jen velmi omezené.

V poslední době se často setkáváme s názorem technologů a konstruktérů, že zbytková napětí, ať už byla vyvolána jakoukoliv příčinou, se dají snížit vibracemi.

Pracovníci výzkumných laboratoří však takové stanovisko zpravidla nedělají. Jednoznačné nejsou ani naše vlastní zkušenosti. Účinek vibrací na hladinu zbytkových napětí byl sice v některých ojedinělých případech prokazatelně pozitivní, obecně je však tato metoda příliš rozporuplná, než aby se dala považovat za prostředek srovnatelný co do spolehlivosti s tepelným zpracováním. V literatuře se před časem objevila rovněž zmínka, že zbytkové elastické deformace napjatého objektu mohou být sníženy průchodem střídavého elektrického proudu; napětí vzniklé svářením pokleslo údajně až o cca 45%.

Význam rentgenové tenzometrie se v průmyslově vyspělých zemích i u nás zvláště za posledních dvacet let výrazně změnil. Metodika, sloužící zpočátku převážně základnímu fyzikálnímu a technologickému výzkumu, získává široké uplatnění jako prostředek tenzometrické diagnostiky povrchových vrstev kovových výrobků zpracovaných nejrůznějšími klasickými i zcela novými postupy. V některých zemích jako např. v USA, Japonsku nebo NSR bylo difrakční měření napětí na vybraných místech vysoce namáhaných strojních dílů zařazeno do norem pro výstupní kontrolu kvality.

I když se v odborném tisku objevují občas zajímavé práce o rentgenografickém měření napětí v extrémních podmínkách (napjatost velmi tenkých vrstev, napěťová analýza čistých materiálů, výzkum v magnetickém poli apod.), praxe má mnohem prozaičtější problémy. Reálným objektem difrakčního studia může být právě tak dokonale definovaný vzorek laboratorních rozměrů jako veliké naprasklé kolo pokryté rzí a mastné od oleje. Ilustrací pestrosti technických otázek, které se dají metodou rentgenové tenzometrie řešit v našich podmínkách, je výzkumná problematika rentgenografické laboratoře katedry inženýrství pevných látek FJFI ČVUT v posledních třech letech:

- posouzení vlivu vibrací železného vzorku na relaxaci jeho zbytkové napjatosti vyvolané svářením,
- měření povrchových napětí na dílech leteckých podvozků,
- určení průběhu napětí v povrchové vrstvě válečkovaných náprav motorových lokomotiv,

- kontrola účinnosti různých režimů žíhání na odstranění napětí v trubkách z austenitických ocelí,
- měření napjatosti povrchových vrstev železničních kol,
- tenzometrická analýza povrchu závitů řezaných různými technologiemi,
- studium zbytkových napětí na povrchu železných materiálů zpevněných kontinuálním CO₂-laserem,
- určení napětí na vzorcích ocelí povrchově tvrzených elektronovým paprskem,
- výzkum napjatosti na povrchu výrobků ze šedé litiny po soustružení a honování.

Kromě toho řeší rentgenografická laboratoř FJFI ČVUT i široké spektrum otázek metodické povahy a problémů základního výzkumu technologií zpracování kovů a slitin. Zkušenosti, které v tomto oboru experimentální fyziky máme, jsme ochotni předávat všem zájemcům z našich strojírenských podniků. Nabízíme spolupráci jak ve formě přímé účasti na řešení konkrétních úkolů průmyslové praxe, tak při budování pracovišť pro rentgenografickou analýzu napětí včetně přípravy potřebných specialistů.

Literatura:

- /1/ KRAUS I., TROPIMOV V.V. - Rentgenová tenzometrie, Academia, Praha 1988

Doc. RNDr. Ivo Kraus, DrSc. - FJFI ČVUT, 115 19 Praha 1
 Ing. Nikolaj Ganev, CSc. - FJFI ČVUT, 115 19 Praha 1