

# Srovnání odolnosti válcovaného a cold spray Ti-6Al-4V vůči opakovanému ohybu

L. Antoži\*, I. Smolíková\*\*, B. Jindrová\*\*\*, M. Císař\*\*\*\*

\*Gymnázium Alejová 1 v Košiciach, \*\*Masarykovo Gymnázium,  
Příbor,\*\*\*Gymnázium, Praha 5, Na Zatlance 11, \*\*\*\*Gymnázium  
Strakonice

[l.antozi@galeje.sk](mailto:l.antozi@galeje.sk), [irena.smolikova@gypri.cz](mailto:irena.smolikova@gypri.cz),  
[bara.jindrov@gmail.com](mailto:bara.jindrov@gmail.com), [cisar.miroslav04@gmail.com](mailto:cisar.miroslav04@gmail.com)

## Abstrakt:

Tato práce zkoumá rozdíl v únavovém porušování dvou vzorků Ti-6Al-4V, přičemž jeden byl zhotoven klasickou technikou - válcováním, a druhý technikou cold spray. V práci jsou ukázány příklady únavového lomu z reálného života, které byly motivací pro tuto práci a je vysvětlena základní teorie únavy materiálů. Následně je popsán experiment, který byl zhotoven s pomocí elektromagnetického zkušebního stroje, s cílem najít rozdíl mezi zmíněnými vzorky zkoumaných materiálů, ze kterých je v obou případech získaná růstová křivka únavové trhliny a 3D vizualizace lomových ploch. Z výsledků bylo vyvozeno, že vzorek vytvořen klasickou metodou je houževnatější, zjištěný rozdíl však může být akceptovatelný pro provádění urgentních oprav.

## 1 Úvod

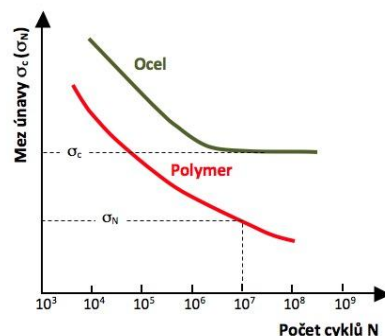
Pád mostu v Tacomě, železniční nehoda v Eschede či ulomená lopatka motoru Boeingu 737. Smrtné nehody v dopravním průmyslu jsou značným problémem již po staletí. Mnohé z nich je však možné vysvětlit pomocí fyziky, a s pomocí vědeckého výzkumu jim předejít. Často je totiž na vině únava materiálu. V naší práci nejprve vysvětlujeme teorii únavy materiálů a metody používané pro testování jejich odolnosti. V praktické části práce představujeme náš experiment zaměřený na zkoumání růstu únavových trhlin a mikromorfologie vzniklých ploch dvou vzorků z titanové slitiny porušených při rezonanční únavové zkoušce. Závěrečná část se zabývá rozdílem mezi obyčejným titanovým vzorkem a titanovým vzorkem vytvořeným pomocí techniky cold spray.



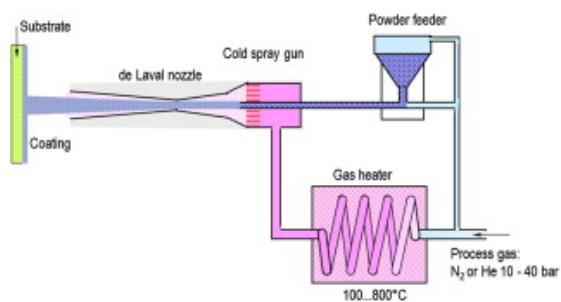
obr. 1: Železniční nehoda v Eschede, převzato z [1]

## 2 Teoretická část - únava materiálů

Vlastnosti materiálů jsou proměnlivé v závislosti na vnějších vlivech. V situacích, kdy je materiál opakovaně ohýbán nebo se na něj působí silou s konstantní amplitudou, dochází k jeho postupné únavě. Ta se projevuje vznikem postupně se rozrůstající trhliny, která zmenšuje průřez materiálu. To vede ke zvýšení na něj působícího napětí a následnému lomu. Pro zkoušení únavy materiálu jsou využívány různé metody. Jednou z možností přímá aplikace síly, pomocí mechanického nebo hydraulického budiřeje. Dalším způsobem testování materiálů je tzv. rezonanční metoda, během ní, je materiál buzen na jeho rezonanční frekvenci, energii je tedy možné dodávat postupně pomocí malé síly s vhodnou frekvencí. Tuto metodu jsme využili i v našem experimentu. Životnost materiálu v závislosti na napětí, které na něj působí, se dá vyjádřit pomocí Wöhlerovy křivky (obr. 2).



obr. 2: Wöhlerova křivka, převzato z [4]

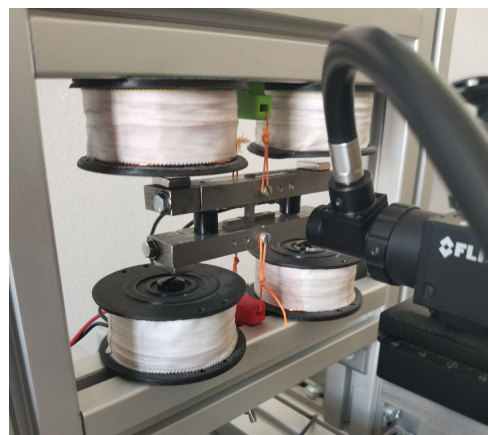


obr. 3: schéma techniky cold spray

Ke konci minulého století se v průmyslu začala aplikovat metoda zvaná cold spray, která využívá kinetického nanášení materiálu. Celá tato technika spočívá na principu nanášecí pistole, ve které se nejprve zahřeje lehký plyn, ke kterému je následně v chladicí trysce přidáván prášek s požadovaným materiálem. Prášek dokáže dosáhnout rychlost až mach 3 a částice materiálu se tak při dopadu deformují a zahřívají, čímž se spojují v nástřík.

## 3 Experimentální část

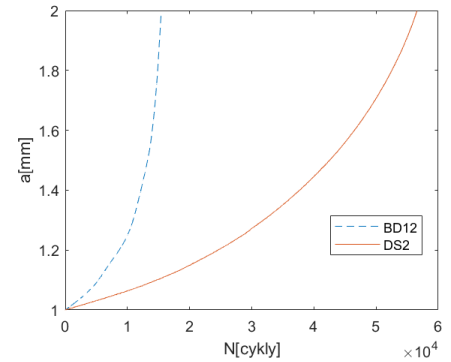
Náš experiment spočíval v komparaci dvou způsobů zpracování Ti-6Al-4V. Klasicky (válcováním) zpracovaný vzorek titanu byl porovnáván s titanem vytvořeným pomocí techniky cold spray. Po přípravě a vyříznutí vrubu byl vzorek vložen do elektromagnetického kmitátka, které funguje na stejném principu jako ladička. Po uvedení do chodu vysokorychlostní kamera, která je součástí zmiňovaného přístroje, začala na připojený monitor přenášet obraz rozšiřující se trhliny a analýza signálu kmitání soustavy vzorek-kotvy podávala informace o délce trhliny a počtu ukončených cyklů. Tyto informace byly vzápětí převedeny do podoby grafu udávajícího závislost délky



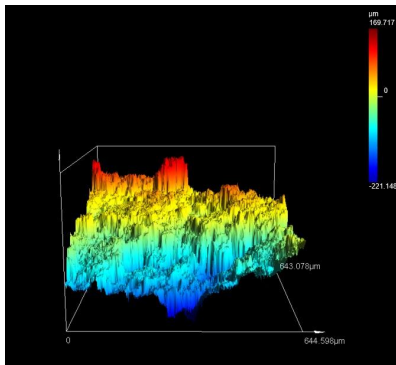
obr. 4: kmitátko

trhlina na počtu ukončených cyklů (viz. obr.5). Poté, co se trhlina rozšířila do předem stanovené délky, byl experiment lomu ukončen a aby nedošlo k poškození lomových ploch, byl vzorek dolomen ručně. Tento postup byl poté použit i pro druhý vzorek připravenou technologií CS.

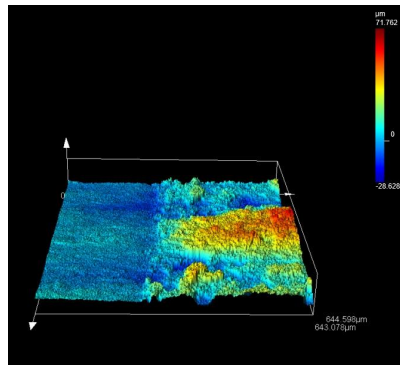
Druhou částí našeho experimentu bylo zkoumání lomových ploch za pomoci konfokálního mikroskopu. Na obrázcích 6a a 6b můžeme vidět grafické znázornění lomových ploch obou vzorků.



obr. 5: graf závislosti délky trhliny na počtu cyklů



obr. 6a: lomová plocha cold spray



obr. 6b: lomová plocha bez cold spraye

Ze zjištěných hodnot vychází výrazně rychlejší šíření trhliny u vzorku titanu vyrobeného pomocí techniky cold spray v porovnání se vzorkem titanu vyrobeného klasickou technikou. Na obrázcích z mikroskopu poté můžeme pozorovat odlišnou

strukturu lomu zkoumaných vzorků. U vzorku cold spray (obr.5a) vyšel znatelně nepravidelnější lom bez rozdílu mezi únavovým lomem a ručním dolomem. Lom tu totiž vzniká mezi částicemi, které díky metodě cold spray nedrží tak pevně při sobě. Na druhou stranu u vzorku vyrobeného klasickou technikou (obr.5b) měl lom jen lehké nerovnosti a přechod mezi únavovým lomem a ručním dolomem byl výrazný. V tomto případě prochází lom skrz částice a je proto pravidelnější a jeho šíření zabere více času.

## 4 Shrnutí

V naší práci jsme pomocí rezonanční metody zkoumání materiálů porovnali dva způsoby zpracování titanu - klasické a pomocí cold spraye. Po zhodnocení našich výsledků jsme dospěli ke zjištění, že titan vyrobený technikou cold spray se porušuje rychleji a má výrazně nepravidelnější strukturu lomu. Titan vytvořen klasickou technikou vydrží ohýbání déle, ovšem je často dražší. Výhodou metody cold spray tak zůstává její ekonomičnost a snadné tvoření složitých tvarů, přičemž ztrácí únavovou životnost ve zkoumaném režimu namáhání a pro pozorované délky trhlín.

## Poděkování

Touto cestou bychom chtěli poděkovat Ing. Ondřeji Kováříkovi PhD., Katedra materiálů FJFI ČVUT a Ing. Kateřině Jirouškové, Katedra materiálů FJFI ČVUT za odbornou pomoc při naší práci a FJFI ČVUT za možnost zúčastnit se Týdnu vědy na Jaderce 2022.

## Reference

- [1] Železniční nehoda v Eschede. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022, 24.2.2007 [cit. 2022-06-21]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD\\_nehoda\\_v\\_Eschede](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD_nehoda_v_Eschede)
- [2] 5 Disasters Caused by Material Fatigue and What We Learned From Them. *Element: Materials and Product Testing, Inspection & Certification* [online]. c2022, 4.6.2022 [cit. 2022-06-21]. Dostupné z: <https://www.element.com/nucleus/2016/5-disasters-caused-by-material-fatigue-and-what-we-learned-from-them>
- [3] JABŮREK, Václav. Za smrt pasažérky v Boeingu 737 může únava materiálu, z motoru se utrhla lopatka. *IROZHLAS - spolehlivé a rychlé zprávy* [online]. Praha, c1997-2022, 18. duben 2018 [cit. 2022-06-21]. Dostupné z: [https://www.irozhlas.cz/zpravy-svet/boeing-737-nehoda-rozbite-okenko-usa-spojene-staty-a-mericke-letecke-nestesti\\_1804181838\\_haf](https://www.irozhlas.cz/zpravy-svet/boeing-737-nehoda-rozbite-okenko-usa-spojene-staty-a-mericke-letecke-nestesti_1804181838_haf)
- [4] BĚHÁLEK, Luboš. Obecná Wöhlerova křivka pro ocel a polymer. In: *Polymery* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2022-06-21]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/images/pics/79.jpg>