

Tato publikace byla vydána z projektu:  
 „Tvorba mezinárodního vědeckého týmu a zapojování do vědeckých sítí v oblasti nanotechnologií a nekonvenčního tváření materiálu“,  
 reg. č. CZ.1.07/2.3.00/20.0038,  
 podporovaného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost, spolufinancovaného z Evropského sociálního fondu a ze státního rozpočtu České republiky.



**Tvorba mezinárodního vědeckého týmu a zapojování do vědeckých sítí v oblasti nanotechnologií a nekonvenčního tváření**



**KA03 – Podpora intersektorální mobility Nanotýmu VŠB – TU Ostrava**

**Odborný seminář „Ultrajemné struktury v kovových materiálech“**

Autor:	Kolektiv autorů
Pracoviště:	VŠB-Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní
Název:	Ultrajemné struktury v kovových materiálech
Místo, rok:	Ostrava, 2014
Počet stran:	10
Vydala:	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, FS, Katedra mechanické technologie

©Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014

ISBN 978-80-248-3480-1



Nanotým VŠB – TU Ostrava  
 CZ.1.07/2.3.00/20.0038

Ostrava 2014



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

<b>Název projektu:</b>	Tvorba mezinárodního vědeckého týmu a zapojování do vědeckých sítí v oblasti nanotechnologií a nekonvenčního tváření materiálu
<b>Program:</b>	Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost
<b>Prioritní osa programu:</b>	2 – Terciární vzdělávání, výzkum a vývoj
<b>Oblast podpory:</b>	2.3 – Lidské zdroje ve výzkumu a vývoji
<b>Registrační číslo:</b>	CZ.1.07/2.3.00/20.0038
<b>Datum zahájení projektu:</b>	1. června 2011
<b>Datum ukončení projektu:</b>	31. května 2014
<b>Žadatel projektu:</b>	VŠB – Technická univerzita Ostrava
<b>Partner projektu:</b>	COMTES FHT a.s.
<b>Administrativní tým:</b>	Hlavní manažer – prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc. Věcný manažer – Ing. Jan Kedroň Finanční manažer – Ing. Stanislav Tylšar

Tato publikace byla financována z podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/20.0038 „Tvorba mezinárodního vědeckého týmu a zapojování do vědeckých sítí v oblasti nanotechnologií a nekonvenčního tváření“.



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

## INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

### OBSAH

1. ÚVOD .....	3
2. METODY VELKÝCH DEFORMACÍ PRO ZÍSKÁNÍ NANOSTRUKTURNÍCH OBJEMOVÝCH MATERIÁLŮ.....	4
3. ZAŘÍZENÍ PROCESU ECAP V ROZMEZÍ TEPLOT -40 - 500°C PRO DOSAHOVÁNÍ UFG A NANOSTRUKTUR 5	
4. DOSAHOVÁNÍ VELMI JEMNÝCH MIKROSTRUKTUR U LOŽISKOVÝCH OCELÍ.....	6
5. VÝVOJ ULTRAJEMNÉ STRUKTURY A MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ V AL SLITINĚ V PODMÍNKÁCH EXTRÉMNÍ TORZNÍ DEFORMACE .....	7
6. VÝVOJ METODIKY MĚŘENÍ MIKROTAHOVÝCH VZORKŮ PRO POSUZOVÁNÍ OBJEMOVÝCH NANOMATERIÁLŮ .....	8
7. MOŽNÉ APLIKACE MIKROTAHOVÝCH VZORKŮ PRO REÁLNÉ PŘÍPADY VYHODNOCOVÁNÍ LOKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ.....	9

## 1. ÚVOD

Tato publikace nabízí abstrakty přednášek z odborného semináře „Ultrajemné struktury v kovových materiálech“ pořádaného dne 22. října 2013 na VŠB – TU Ostrava. Seminář byl zorganizován pro akademické pracovníky a studenty VŠB v rámci projektu „Tvorba mezinárodního vědeckého týmu a zapojování do vědeckých sítí v oblasti nanotechnologií a nekonvenčního tváření materiálu“ CZ.1.07/2.3.00/20.0038, který je spolufinancován z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky.

Publikace obsahuje přehled přednesených odborných přednášek v podobě abstraktů od vědeckých pracovníků výzkumné organizace COMTES FHT a.s. Jak název napovídá, společným motivem prezentované problematiky jsou ultrajemné struktury (UFG) v kovových materiálech. Jednotlivé příspěvky uvedené v publikaci se na problematiku dívají z různých pohledů.

Na úvod je uveden přehled způsobů přípravy UFG materiálů společně s výčtem očekávaných změn v materiálových vlastnostech:

- Kraus L.: Metody velkých deformací pro získání nanostrukturních objemových materiálů

Poté je uveden příklad konstrukce zařízení včetně deformačního nástroje ECAP pro přípravu UFG struktur:

- Zemko M.: Zařízení procesu ECAP v rozmezí teplot  $-40 - 500^{\circ}\text{C}$  pro dosahování UFG a nanostruktur

Další dva příspěvky se věnují rozboru výsledků dosažených na konkrétních materiálech konkrétní metodou:

- Nový Z.: Dosahování velmi jemných mikrostruktur u ložiskových ocelí
- Zrník J.: Vývoj ultrajemné struktury a mechanických vlastností v Al slitině v podmínkách extrémní torzní deformace

Poslední dva příspěvky jsou zaměřené na hodnocení UFG struktur:

- Džugan J., Konopík P.: Vývoj metodiky měření mikrotahových vzorků pro posuzování objemových nanomateriálů
- Džugan J., Konopík P.: Možné aplikace mikrotahových vzorků pro reálné případy vyhodnocování lokálních vlastností

## 2. METODY VELKÝCH DEFORMACÍ PRO ZÍSKÁNÍ NANOSTRUKTURNÍCH OBJEMOVÝCH MATERIÁLŮ

Libor KRAUS<sup>a</sup>

<sup>a</sup> COMTES FHT a.s., Průmyslová 995, 334 41 Dobřany, Česká republika, comtes@comtesfht.cz

Publikace obsahuje popis metod zpracování kovových materiálů pomocí velkých deformací (severe plastic deformation – SPD), které vedou k vytvoření mikrostruktury s velikostí zrn v nanorozměrech. Změny ve velikosti zrna z mikronového na nanometrický rozměr, jak ukazují výsledky experimentů aplikace extrémní deformace získané z posledních 20 let, vedou k výraznému růstu pevnosti a tvrdosti jak čistých kovů, tak i slitin. Samotná vysoká pevnost u těchto ultrajemnozrnných materiálů však není dostatečným důvodem zvýšeného zájmu o tyto materiály. Zvýšení zájmu o tyto ultrajemnozrnné materiály spočívá v naplnění očekávání, že tyto materiály poskytnou kombinaci vysoké tvrdosti s ostatními vlastnostmi, kterými mohou být tažnost, houževnatost, odolnost proti opotřebení nebo jiné chemické a fyzikální vlastnosti. Zvýšená plasticita (tvářitelnost) případně schopnost pro superplastické tváření materiálů s ultrajemným zrnem je též důvodem zájmu získání optimální ultrajemné struktury (od 1 $\mu$ m), Tato skupina materiálů proto zabezpečuje pro materiálové specialisty dostatečné množství zajímavých námětů pro studium, poskytujících jednak možnost vývoje nových materiálů a jejich vlastností, tak i způsob zkoušení a ověřování nových modelů umožňujících pochopení podstaty jejich vlastností.

Uvažovaný zkrácený přehled představuje (uvádí) možnosti přípravy a vývoje ultrajemných struktur v rozsahu poskytnutí základních informací podstatných pro pochopení návaznosti na změnu mechanických vlastností různých materiálů s velikostí zrna v submikronové oblasti hlavně s využitím extrémních způsobů deformace vzorků. Termín “nano” se vztahuje na rozsah několika nanometrů až po 1 $\mu$ m. V podstatě je možno definovat čtyři rozličné skupiny nanokrystalických materiálů, s třemi variacemi rovinné, lamelární struktury nanometrické tloušťky, povlaků tvořených nanometrickými zrny a trojrozměrné „bulk“ nanokrystalické materiály, které jsou v publikaci popsány. Větší prostor je věnován metodám přípravy „bulk“ nano materiálů s výslednou submikronovou velikostí zrna.

Při hodnocení účinnosti procesu extrémní deformace na vývoj ultrajemné struktury je však potřeba odpovědět na otázku: „Je možné s využitím extrémních deformačních metod vyrobit takové ultrajemnozrnné materiály kde velikost zrna bude  $\sim 20$  nm?“ Řešení, jak se ukazuje, je třeba hledat v kombinaci použití extrémní deformace s výrobou prášků resp. deformačně indukovanou nanokrystalizací amorfních materiálů.

Požadavky, které musí být zohledněné při přípravě nanostruktury v rozměrnějších vzorcích, jsou následující:

- vytvoření nanostruktury s převážně velkoúhlovými hranicemi zrn (garance kvalitativní změny vlastností materiálů)
- tvorba homogenní struktury v celém objemu vzorku (stabilita vlastností)

- ☉ stav materiálu po realizaci extrémní deformace musí být bez poruch (bez trhlin)

Tradiční klasické způsoby deformace jako je válcování, kování, tažení a protlačování tyto požadavky nezaručuje. Aplikací těchto konvenčních způsobů, při kterých dochází ke zmenšování rozměrů vzorků, se dosáhne buněčná struktura, resp. struktura s malouhlovou orientací subzrn. Vytvoření submikronové struktury v rozměrnějších vzorcích je možné jen v podmínkách deformačních procesů, při kterých je možno dosáhnout velké deformace při relativně nízkých teplotách, bez předurčení optimálních podmínek zpracování materiálu.

### 3. ZAŘÍZENÍ PROCESU ECAP V ROZMEZÍ TEPLOT -40 - 500°C PRO DOSAHOVÁNÍ UFG A NANOSTRUKTUR

Michal ZEMKO <sup>a</sup>, Václav KUBEC <sup>a</sup>, Filip TIKAL <sup>a</sup>

<sup>a</sup> COMTES FHT a.s., Průmyslová 995, 334 41 Dobřany, Česká republika, [comtes@comtesfht.cz](mailto:comtes@comtesfht.cz)

Článek popisuje konstrukci nástroje ECAP a princip jeho činnosti. Princip tvářecí technologie ECAP spočívá ve vícenásobném protlačování materiálu lomeným kanálem konstantního průřezu. Materiál protlačený lomeným kanálem jen velmi málo změní své rozměry a lze jej tedy opakovaně tvářet. Do materiálu je vnášena vícenásobná deformace a tím materiál získává novou strukturu a mechanické vlastnosti. Na Obr. 1 je znázorněn princip protlačování.

Zadání:

- ☉ Velikost vzorku: 20 x 20 x 12 [mm] (hranol)
- ☉ Tvářecí teplota: -40 – 500 [°C]
- ☉ Síla lisu: 3 [MN]
- ☉ Rychlost lisování: 40 [mm/s]
- ☉ Možnost lisování s protitlakem

Nástroj je určen pro práci v rozmezí teplot -40 – 500°C. Ohřev je zabezpečen topnými patrony a chlazení je zabezpečeno rozvodem podchlazeného dusíku. Dále jsou popsány MKP simulace pro ověření konstrukce a následná výroba tohoto zařízení.

#### 4. DOSAHOVÁNÍ VELMI JEMNÝCH MIKROSTRUKTUR U LOŽISKOVÝCH OCELÍ

Zbyšek NOVÝ<sup>a</sup>

<sup>a</sup> COMTES FHT a.s., Průmyslová 995, 334 41 Dobřany, Česká republika, comtes@comtesfht.cz

Žíhání na měkko je v případě vysokouhlíkových ocelí obvykle nedílnou součástí jejich zpracování z důvodu technologických požadavků zejména při obrábění. Kromě snížení tvrdosti, meze kluzu a meze pevnosti je neméně důležitá i vlastní změna morfologie karbidů z lamelárního perlitu na globulární. Globulární morfologie karbidů má velice pozitivní vliv na obrobiteľnosť oceli z důvodu menšího opotřebení nástrojů. Vedle morfologie karbidů ovlivňuje významně velikost zrna feritické matrice a velikost samotných karbidů. Z hlediska dosažení nízké hodnoty tvrdosti po žíhání na měkko je výhodnější hrubší mikrostruktura s většími karbidy a většími zrny. Z hlediska finálních vlastností zušlechťeného ložiskového materiálu je výhodnější struktura jemnozrná s drobnějšími a četnějšími karbidy. Konvenční provedení žíhání na měkko spočívá v dlouhodobém žíhání oceli při teplotě okolo teploty Ac1 a následném ochlazení v peci. Celý proces trvá obvykle více než 20 hodin. Ve výzkumném programu představeného v tomto článku je hlavním cílem dosáhnout sferoidizace karbidů a změkčení struktury v čase desítek sekund, maximálně několika málo minut. Proces vedoucí ke zrychlené sferoidizaci karbidů spočívá v cyklickém zahřívání polotovaru na teplotu nad Ac1 a ochlazování pod teplotu Ac1. Austenitizace musí být pouze částečná, nesmí dojít k úplnému rozpuštění karbidů v austenitu. Částečně rozpuštěné lamely perlitu pak při ochlazení hrají roli zárodků pro vylučování cementitu při perlitické přeměně. Tak nevznikají nové lamely. Opakováním procesu částečného rozpouštění lamelárního perlitu a zpětného perlitického rozpadu austenitu dochází k fragmentaci a nakonec k dokonalé sferoidizace perlitických lamel ve velice krátkém čase (do 5 min). Tímto procesem vzniká jemnozrná struktura s drobnějšími a četnějšími karbidy. Sferoidizace karbidů se realizuje prostřednictvím difuze, a tento proces je v současné době značně časově a energeticky náročný. Časy potřebné výdrže na teplotě, v některých případech až desítky hodin, činí z žíhání na měkko jeden z nejdražších způsobů tepelného zpracování vůbec. Nově navržená technologie, vyvinutá firmou COMTES FHT, tento proces sferoidizace karbidů několikanásobně zkrátí, a tím umožní výrazné časové a energetické úspory. Tepelné zpracování bylo provedeno pomocí indukčního ohřevu, který umožňuje rychlý ohřev a tím i rychlé změny struktury. Princip zrychlené sferoidizace karbidů je založen na rychlém teplotním cyklování kolem transformační teploty A1. Účelem tohoto žíhání je získat drobné globulární karbidy rovnoměrně rozložené v jemnozrné matici a dosažení celkového odpevnění.

## 5. VÝVOJ ULTRAJEMNÉ STRUKTURY A MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ V AL SLITINĚ V PODMÍNKÁCH EXTRÉMNÍ TORZNÍ DEFORMACE

Jozef ZRNÍK<sup>a</sup>, Reinhard PIPAN<sup>b</sup>, Miroslav CIESLAR<sup>c</sup>

<sup>a</sup>COMTES FHT Inc, Průmyslová 994, Dobřany, Czech Republic, jzrník@comtesfht.cz

<sup>b</sup>Eric-Schmid Institute of Materials Science, AAS, Leoben, Austria, pippan@unileoben.ac.at

<sup>c</sup>Charles University, Dept. of Physics Materials, FMP, Prague, Czech Republic, cieslar@met.mff.cuni.sk

In this study ultrafine grain (ufg) structure evolution during high pressure torsion (HPT) of commercial aluminium alloy AA6082 at increased temperature is presented. Two different initial structural states of the alloy were prepared by thermal treatment. The progress in structure refinement in dependence on the shear strain level strain was investigated by TEM. The impact of different amount of strain ( $\epsilon_{ef}$ ) introduced was analyzed with respect to increased temperature of deformation. The microhardness results measured across the deformed discs pointed out on the data scattering. The microstructure analyses showed that an ufg structure was already formed in deformed disc upon the first turn, regardless the initial structure of alloy, resulting from prior thermal treatment. Heterogeneity appearance in ufg deformed structure appearance across the deformed disc was observed, supporting the scattering of microhardness results. Increasing the strain level by increasing the number of turns ( $N=2,4,6$ ), resulted in more uniform homogenized ufg structure across the deformed discs. The effect of deformation temperature increasing became more evident and dynamic recrystallization modified the ufg structure locally. The retardation of new grain growth and higher thermal stability of ufg structure was observed, when two steps thermal treatment of alloy (quenching and ageing) was executed prior torsion deformation. Strength measurement by tensile tests showed that the effect of structure strengthening was degraded partially by local recrystallization advancement. The results of torque measurement versus time showed that the torque required to deform the sample was increasing until the first turn and then remained stable or even fairly decreased.



## 6. VÝVOJ METODIKY MĚŘENÍ MIKROTAHOVÝCH VZORKŮ PRO POSUZOVÁNÍ OBJEMOVÝCH NANOMATERIÁLŮ

Jan DŽUGAN<sup>a</sup>, Pavel KONOPÍK<sup>a</sup>

<sup>a</sup> COMTES FHT a.s., Průmyslová 995, 334 41 Dobřany, Česká republika, comtes@comtesfht.cz

Pro hodnocení mechanických vlastností objemových nanomateriálů je třeba naměřit deformačně-napjatostní charakteristiky a to často na velmi malém množství materiálu. V mnoha případech se používá metoda Small Punch Test, která tyto charakteristiky umožňuje měřit. SPT se také často využívá např. v energetice pro odhad zbytkové životnosti aktivních zařízení, pro hodnocení lokálních vlastností svarů nebo při zkouškách vzorků po termofyzikální simulaci. Často je však SPT využíváno i v případě, že se požaduje vyhodnocení jen tahových vlastností. V mnoha případech lze celkem spolehlivě na základě korelačních vztahů přepočítat hodnoty SPT na mez pevnosti  $\sigma$ , s o něco větší nejistotou, i na mez kluzu. Korelace na tažnost a kontrakci se obvykle nedělají. Nutnost verifikace nalezených korelačních vztahů pro každý nový materiál patří mezi hlavní slabiny SPT. Řešením těchto problémů a snížení nejistoty při použití korelací bylo použito takového zkušební tělesa, které zachovává výhody zkušebního disku SPT, ale zároveň je zatěžováno co nejvíce shodným druhem zatížení jako standardní zkouška tahem. Pro určení tahových vlastností pak z této úvahy vyplývá, že vzorek je zatížen pouze v tahovém (jednoosém) módu zatížení. Byla tedy navržena a odzkoušena zkušební tělesa a tato metoda mechanického zkoušení materiálu se označuje jako Mikro-tahové testy (M-TT).

Samotná zkouška M-TT tedy probíhá ve stejném módu zatěžování a při stejných deformačních rychlostech jako standardní zkouška tahem prováděná dle normy. Při prvních testech bylo k měření deformace těles použito extenzometru připevněného na čelistech. Vhodnost takto navržené zkoušky byla ověřena na mnoha materiálech. Stejně jako v případě standardní zkoušky tahem byly zaznamenány hodnoty síly v N a deformace v mm, které se převedly na souřadnice smluvní napětí - poměrná deformace. Získané záznamy z M-TT tedy již není třeba korelovat pomocí empirických vztahů, mají stejný průběh jako standardní tahové testy a lze z nich vyhodnotit všechny standardní tahové charakteristiky:  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ,  $A_g$ ,  $A$  a  $Z$ . Zároveň požadavek zachování minimálního objemu experimentálního materiálu zůstává, stejně jako v případě SPT, splněn.

Při snímání deformace mechanickým extenzometrem však dochází ke zkreslení měření, zejména na začátku zkoušky, což se projevuje na snížené hodnotě Youngova modulu pružnosti. Vyhodnocení tažnosti je možné provést na základě měření na stereomikroskopu s digitálním zpracováním záznamu nebo vyhodnocení provést přímo z grafu. Oba přístupy vedou k téměř stejným výsledkům. Vyhodnocení kontrakce je prováděno na základě měření nejužších míst po zkoušce. Pro přesnější měření deformací bylo navrženo měřit deformaci opticky. V podmínkách laboratoře COMTES FHT a.s. bylo možno provést tato měření buď videoextenzometrem nebo pomocí optického systému ARAMIS. ARAMIS využívá metody digitální obrazové korelace (Digital Image Correlation, DIC). DIC je moderní metodou měření pole deformací. Je založena na optickém sledování změn v obrazovém záznamu při mechanické zkoušce. Na zkoušený

vzorek je nanesen náhodný kontrastní vzor (tzv. pattern), který je snímán jednou (2D) nebo více (3D) kamerami. DIC software pak sleduje změny vzoru v jednotlivých obrazech záznamu vůči referenčnímu obrazu. Touto metodou je možné velmi přesně měřit deformace a posuvy, a to jak na celém zkušebním tělese, tak lokálně v jednotlivých oblastech. Pro snímání M-TT je použito 2D snímání a ARAMIS v tomto případě plní jen funkci videoextenzometru, kdy se měří vzdálenost dvou bodů na tělíčku tělesa, obvykle od sebe vzdálených 2,6 mm.

## 7. MOŽNÉ APLIKACE MIKROTAHOVÝCH VZORKŮ PRO REÁLNÉ PŘÍPADY VYHODNOCOVÁNÍ LOKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ

Jan DŽUGAN<sup>a</sup>, Pavel KONOPÍK<sup>a</sup>

<sup>a</sup> COMTES FHT a.s., Průmyslová 995, 334 41 Dobřany, Česká republika, comtes@comtesfht.cz

Atributem zkušebních metod na miniaturních tělesech je, že díky velmi malým rozměrům se zkouší pouze lokální charakteristiky materiálů. To může být někdy nevýhoda, zejména u testů velmi heterogenních materiálů, u kterých je nutné dobře zvážit místo odběru a obvykle je nutné udělat více těchto testů. Nicméně díky tomuto rysu miniaturních těles je možné měřit mechanické charakteristiky v místech, která jsou pro porušení součástí kritická, např. přechodové oblasti u svarových spojů či měření aktuálních vlastností nejvíce namáhaných míst v provozovaných komponentách energetických zařízení. Mezi testy na miniaturních vzorcích se řadí např. Small Punch Test (SPT) či mini-Charpy testy. Na základě SPT geometrie byly vyrobeny a provedeny zkoušky tahem na mikrotahových vzorcích (tzv. mikro-tahové testy, M-TT). Získané záznamy jsou v rámci rozptylu měření shodné se záznamy získanými ze standardních vzorků pro stejné materiály. Díky krátké délce paralelní části tělíčka (2,6 mm) lze na těchto vzorcích dosáhnout také vysokých rychlostí deformace. M-TT lze tak díky tomu využít pro studium změny mechanických vlastností v závislosti na rychlosti deformace. Data z M-TT se mohou využít jako vstupní data pro počítačové simulace.

Využití M-TT je stejně rozsáhlé jako využití ostatních metod používající miniaturní vzorky (např. SPT). Pomocí měření lokálních vlastností lze změřit např. heterogenitu vlastností tenkostěnných trubek v podélném a příčném směru. Zatímco v podélném směru lze vlastnosti měřit i na standardních tahových vzorcích, v podélném směru toto lze udělat jen za cenu narovnání trubky, čímž ale dojde ke zplastizování materiálu, vyčerpání čisti tažnosti a posunutí meze kluzu. Pomocí mikrotahových vzorků je možné vyhodnotit lokální vlastnosti svarových spojů, což bylo potvrzeno na několika experimentech. Dosud se běžně provádělo jen měření distribuce tvrdosti napříč svarovým kovem a z těchto měření byly odhadovány kritická místa pro porušení součástí. Na provedených svarových spojích byly naměřeny ve stejné vzdálenosti jak tvrdosti HV10, tak byly odebrány mikrotahové vzorky. Stejný trend distribuce meze pevnosti a tvrdosti od referenčního bodu svědčí o stejné lokalizaci míst a lze takto hodnotit vlastnosti

nejen základních materiálů, ale také svaru a teplem ovlivněných zón. Oproti tvrdosti lze vyhodnotit nejen jednu hodnotu, ale také mez kluzu, tažnost, kontrakci a pro účely počítačových simulací také kompletní tahovou křivku. Přesné měření deformací na takto malém vzorku nelze dosáhnout pomocí mechanických extenzometrů, ale je nutné použít optické metody, např. kameru či video-extenzometr. V rámci optických metod měření deformace se nejvíce osvědčilo měření deformace pomocí bezkontaktního měřicího systému ARAMIS, který využívá metody digitální obrazové korelace (Digital Image Correlation, DIC). DIC je moderní metodou měření pole deformací. Je založena na optickém sledování změn v obrazovém záznamu při mechanické zkoušce. Na zkoušený vzorek je nanesen náhodný kontrastní vzor (tzv. pattern), který je snímán jednou (2D) nebo více (3D) kamerami. DIC software pak sleduje změny vzoru v jednotlivých obrazech záznamu vůči referenčnímu obrazu. Touto metodou je možné velmi přesně měřit deformace a posuvy, a to jak na celém zkušebním tělese, tak lokálně v jednotlivých oblastech. Pro snímání M-TT je použito 2D snímání a ARAMIS v tomto případě plní jen funkci videoextenzometru, kdy se měří vzdálenost dvou bodů na tělíčku tělesa, obvykle od sebe vzdálených 2,6 mm.

### Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen v rámci projektu **Tvorba mezinárodního vědeckého týmu a zapojování do vědeckých sítí v oblasti nanotechnologií a nekonvenčního tváření materiálu CZ.1.07/2.3.00/20.0038**, který je spolufinancován z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky.