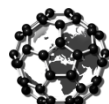


Tato publikace byla vydána z projektu:  
**„Tvorba mezinárodního vědeckého týmu a zapojování do vědeckých sítí v oblasti nanotechnologií a nekonvenčního tváření materiálu“,**  
 reg. č. CZ.1.07/2.3.00/20.0038,  
 podporovaného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost,  
 spolufinancovaného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

|              |                                                                                        |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Autor:       | Kolektiv autorů                                                                        |
| Pracoviště:  | VŠB-Technická univerzita Ostrava<br>Fakulta strojní                                    |
| Název:       | Aplikovaný výzkum a vývoj v oblasti ultra-jemnozrnných materiálů                       |
| Místo, rok:  | Ostrava, 2014                                                                          |
| Počet stran: | 46                                                                                     |
| Vydala:      | Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, FS, Katedra mechanické technologie |

©Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014

ISBN 978-80-248-3481-8



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



**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 „Aplikovaný výzkum a  
 vývoj v oblasti ultra-jemnozrnných  
 materiálů“**

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.<br><br>Věcný manažer – Ing. Jan Kedroň<br><br>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. ZPRACOVÁNÍ KOVŮ METODAMI SPD – VÝVOJ STRUKTURY A MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ .....    | 3  |
| 3. VÝVOJ A KONSTRUKCE NÁSTROJE PRO ECAP PRO PRÁCI V ROZMEZÍ TEPLOT -40 – 500°C ..... | 11 |
| 4. VÝVOJ A KONSTRUKCE NÁSTROJE PRO HPT ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT .....                     | 16 |
| 5. ZJEMŇOVÁNÍ MIKROSTRUKTURY METODOU ASR .....                                       | 19 |
| 6. ZJEMŇOVÁNÍ MIKROSTRUKTURY POVRCHOVÝCH OBLASTÍ OCELOVÉHO PASU .....                | 25 |
| 7. POSUZOVÁNÍ VLASTNOSTÍ OBJEMOVÝCH NANOMATERIÁLŮ .....                              | 30 |
| 8. AKTIVITY VÝZKUMNÉ ORGANIZACE COMTES FHT A.S. V OBLASTI NANOMATERIÁLŮ .....        | 38 |
| 9. MOŽNOSTI SPOLEČNÝCH PROJEKTŮ V OBLASTI NANO .....                                 | 42 |

## 1. ÚVOD

Tato publikace obsahuje příspěvky, které byly v rámci odborného semináře „Aplikovaný vývoj a výzkum v oblasti ultra-jemnozrnných materiálů“ prezentovány partnerem projektu společností COMTES FHT a.s., dne 18. dubna 2012 na ZČU v Plzni a 23. – 24. listopadu 2012 v Dobřanech. Druhého jmenovaného odborného semináře, konaného v sídle společnosti COMTES FHT a.s., se zúčastnili akademičtí pracovníci a studenti z VŠB – TU Ostrava.

Pracovníci výzkumné organizace COMTES FHT a.s. přednesli odborné přednášky zaměřené na výzkum a vývoj ultra-jemnozrnných materiálů a jejich další využití. V rámci semináře bylo představeno několik metod využívajících velké plastické deformace, které slouží k přetvoření hrubozrnných kovů a slitin na ultrajemnozrnné materiály a vyhodnocování takto dosažených UFG materiálů. Na závěr byla prezentována aplikace těchto nekonvenčních tvářecích metod ve společnosti COMTES FHT a.s. a jejich další využití v průmyslové praxi.

## 2. ZPRACOVÁNÍ KOVŮ METODAMI SPD – VÝVOJ STRUKTURY A MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

### PROCESSING OF METALS BY SPD – STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES RESPOND

Jozef ZRNÍK <sup>a</sup>, S. V. DOBATKIN <sup>b</sup>, Ilia MAMUZIČ <sup>c</sup>

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

<sup>b</sup> MISiS-TU Moscow, Russia

<sup>c</sup> Faculty of Metallurgy, University of Zagreb, Sisak, Croatia

### Abstrakt

Metody velké plastické deformace (SPD) slouží k přetvoření hrubozrnných kovů a slitin na ultrajemnozrnné (UFG) materiály. UFG materiály pak získají zlepšené mechanické a fyzikální vlastnosti, které je předurčují pro široké komerční využití. Nicméně, jakýkoliv pokus o komerční použití SPD metod vyžaduje lepší vhled do mechaniky SPD procesů. Očekává se, že v blízké budoucnosti budou silně deformované materiály levně vyráběny ve velkém množství a získají potenciál pro konstrukční aplikace. Použití SPD techniky pro zlepšení konvenčních produktů se zdá nejslibnější cestu pro využití specializovaných produktů, které vyžadují homogenní jemné zrna a zlepšenou rovnováhu pevnosti a plasticity. Tento příspěvek v první části nabízí historický vývoj SPD procesů a jejich vliv na získání jemné krystalické struktury a v druhé části se zaměřuje na vývoj UFG struktury a její stabilitu v případě komerčně čistého hliníku v závislosti na deformaci a post-deformačního žíhání.

### Klíčová slova

Velká plastická deformace (SPD), ultrajemnozrnné materiály (UFG), hliník, vývoj mikrostruktury, žíhání, zotavení, mechanické vlastnosti.

## Abstract

The severe plastic deformation (SPD) methods are used to convert coarse grain metals and alloys into ultrafine grained (UFG) materials. Obtained UFG materials then possess improved mechanical and physical properties which destine them for a wide commercial use. However, any attempt to use SPD methods commercially requires a better insight into the mechanics and practicality of SPD processes. It is expected that in near future severely deformed materials would be cheaply produced in large quantities and become potential for structural applications. Using SPD techniques to improve conventional products appears most promising route for exploitation of specialized products requiring fine scale grain homogeneity and improved strength ductility balance. This paper, in one direction, looks into historical development of SPD processes and their effect at obtaining fine crystalline structure, and on the other side also partially focuses on development of UFG structure and its stability in commercial pure aluminum as a function of strain and post-deformation annealing applied.

## Keywords

Severe plastic deformation, ultrafine grained materials, aluminum, microstructure evolution, annealing, recovery, mechanical properties.

## 2.1 INTRODUCTION

Severe plastic deformation (SPD) is one of the methods of obtaining very fine crystalline structure in different bulk metals and alloys, which possess different crystallographic structure. SPD causes the formation of micrometer and sub-micrometer sized subgrains in the initially coarse grain materials. As a result of that enhanced mechanical performance is observed. The mechanism responsible for this effect is still under investigation, however, it is believed that short and long-range intersecting shear bands produced by plastic deformation play a major role at grain subdivision and local dynamic recovery and recrystallization processes contribute to grain refinement [1,2]. Sufficiently large deformation leads to a distinct structure of dislocation-free and highly misoriented fine grains. When defining a submicron grain structure the important parameters, which are matter of concern, are average spacing of high angle grain boundaries (HAGB) and proportion of HAGB area [3,4].

The structural changes caused by SPD are reflected in improved mechanical properties of metals. The reported effects include increased hardness and yield stress, both featuring tendency to saturation. The drawback of ultrafine grained structure materials is their limited ductility [5,6]. Some other research revealed increased ductility and toughness as well as improved damping and physical properties. The fine grained structure of UFG materials obtained by SPD leads to superplastic behaviour of these materials at lower temperatures and yet with higher deformation rates.

Various aspects of structural changes caused by SPD have been the research goals in laboratories worldwide. Hundreds of papers are published each year in distinguished journals and conference proceedings (see proceedings of two TMS conferences on UFG structure development and properties evaluation [7,8]). Today the most effort is paid to the study of the mechanics of material flow and grain subdivision when low strains ( $\epsilon_{ev} < 3$ ) and high strains ( $\epsilon_{ev} > 3$ ) are considering at the SPD. Usually, in dependence of the applied deformation methods (processing conditions) when different strain (von Mises) at deformation is developed the various structure can be found in deformed materials. At low strain the orientation splitting and microshear banding are mechanisms, which contributes to grain subdivision and cell bands structure dominates within deformed bands. When medium and higher strain are effective the lamellar HAGB structure, ribbon grains and formation of submicron grains structure dominates in deformed materials. The repetition of the straining process is required to obtain a large strain and desired structural changes.

When studying microstructure in SPD materials the evolution and the character of the new interfaces appears as very important property with respect to evaluation their influence on the mechanical properties. Considering the deformation processing condition the heterogeneity in microstructure formation was often observed across the bulk specimen in dependence of the strain introduced [9]. Anticipating commercialization attempts, this work addresses the processing issues. First, a choice of major SPD processes will be presented, but not analyzed in details. Latter in the paper, the contribution to ductility improvement of severely deformed aluminum will be presented shortly.

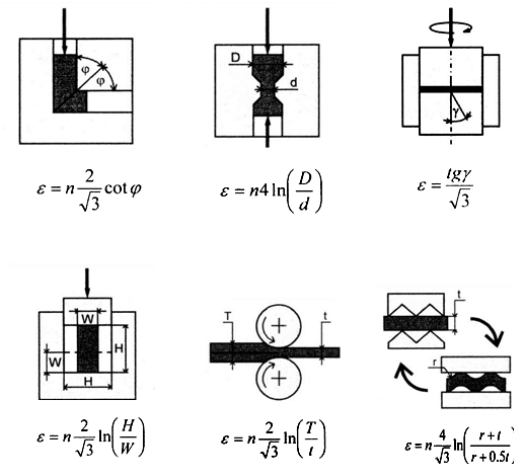
## 2.2 SPD EXPERIMENTAL Processes

Obtaining large plastic deformation is a difficult task since in most metal forming processes it is limited by either material or tool failure. Few processes such as accumulative rolling and multi-pass drawing enable large plastic deformation to be achieved; however, metal foils or micro wires produced by these processes are not necessary the billet forms required. Therefore, special metal forming processes, capable for producing SPD without a major change in the billet should follow:

a) simple concept; b) how do you do it; c) does it really work; c) is it any use. Among these can be included the following major SPD processes:

- Equal channel angular pressing (ECAP, Segal, 1977);
- High pressure torsion (HPT, Valiev at al., 1989);
- Accumulative roll bonding (ARB, Saito, Tsuji, Utsunomiya, Sakai, 1998);
- Reciprocating extrusion-compression (REC, J. and M. Richert, Zasadzinski, Korbel, 1979);
- Cyclic close die forging (CCDF, Ghosh, 1988);
- Repetitive corrugation and straightening (RCS, Zhu, Lowe, Jiang, Huang, 2001).

The major SPD processes are presented in Fig. 1.



**Fig. 1 Schematic representation of major SPD processes.**

### 2.3 Equal Channel Angular Pressing

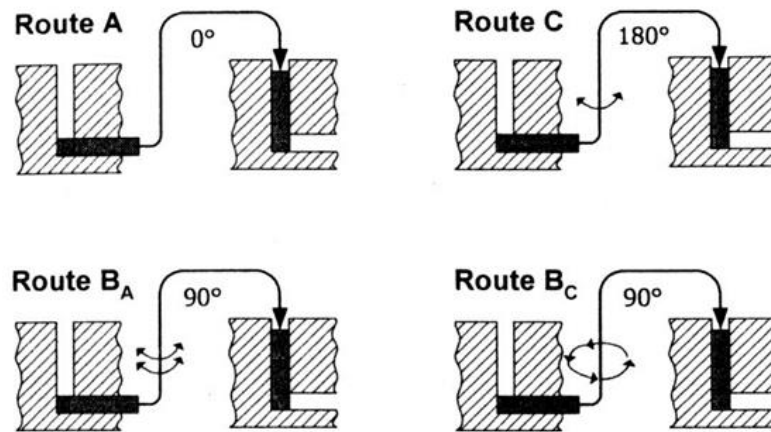
Equal channel angular pressing (ECAP) was invented by Segal [10, 11] in 1977 in Russia. ECAP is based on simple shear taking place in a thin layer at the crossing plane of the equal channels. ECAP has become the most frequently used SPD process. This is due to its low force requirement (small press can be used) and the resulting low tool pressure. This together with the simple tool geometry makes laboratory tooling easily attainable. In many laboratories the researchers found ECAP method as convenient tool to investigate the relationship between the strain applied and structure development.

The basic mechanics of ECAP was described by Segal in [11] where he derived an expression for shear strain  $\gamma$  and the process pressure  $p$ .

$$\gamma = \sqrt{3} \quad (1)$$

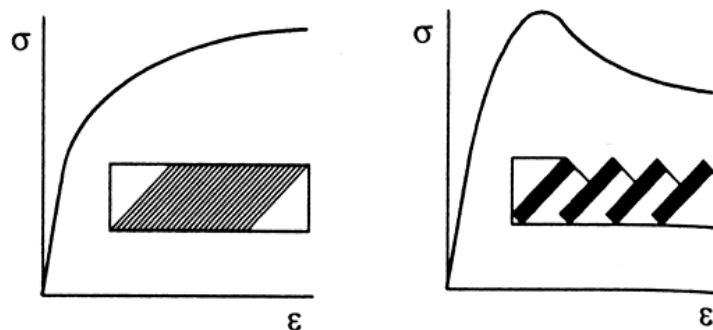
Recently he concluded that the strain distribution depended mainly on friction uniformity in the channels and the details of the channel geometry (sharp vs. round corner). Backpressure appeared to have only small effect. In work [12], he demonstrated advantages of simple shear produced by ECAP over pure shear present in other processes.

In order to achieve the required strain in ECAP, the billet is processed repeatedly in the same die. The billet can rotate about its axis between each pass. The four basic options for this rotations are called A, C, BA, BC, Fig. 2. These options have been then classified and assessed in terms of their ability to control the structure and texture of processed materials. From these tests Langdon et al. [13] established that for obtaining homogeneous microstructures of equiaxed grains separated by high angle boundaries the best route is B<sub>C</sub>.



**Fig. 2 Options for billet rotation between consecutive passes through ECAP die.**

ECAP method does not involve high pressure which is advantageous from the machine and tooling point of view. This may turn into a disadvantage when processing brittle materials. Even ductile materials may require a bit higher pressure to avoid damage accumulation and substantially reduced ductility in further metal forming operations. It is possible to process brittle materials at a smaller pressure provided the temperature is high enough. This, however, may change the material behaviour by making it prone to unstable flow and fracture. What is observed resembles a serrated or cyclic chip sometimes produced in metal cutting, Fig. 3.



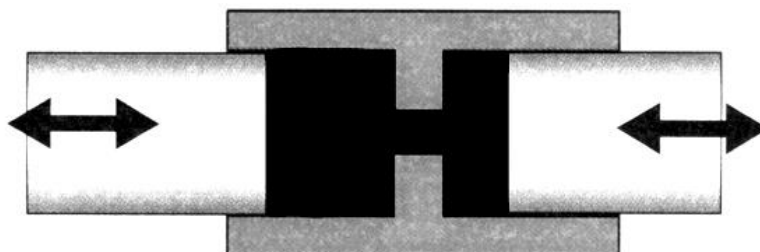
**Fig. 3. Schematic representation of stable and localized flow in ECAP depending on the material hardening –softening [14].**

The classical ECAP inspired many further developments in ECAP tool in order to process difficult-to-work alloys described in [15]. There are also attempts of designing a continuous system in which workpiece by friction or by rolls support is fed to the die [16-19]. In order to avoid buckling the force required to feed the billet has to be low. ECAP is low-force process by nature. Nevertheless, reducing the amount of deformation in one pass, reducing friction by leaving a clearance between the billet and the die and increasing process temperature may be necessary.



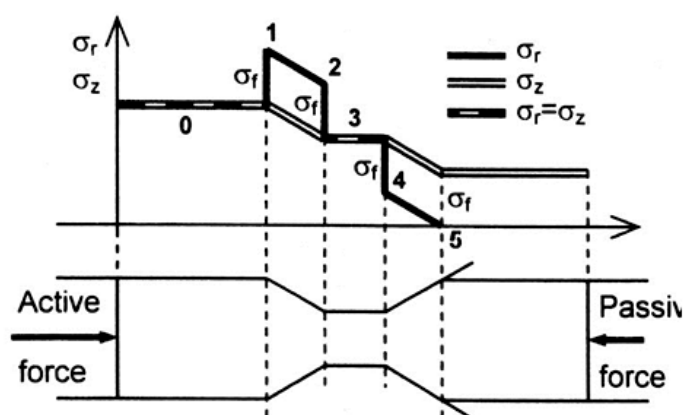
## 2.4 Reciprocating Extrusion Compression

J. Richert et al. came with the idea of cyclic reciprocating extrusion compression (RE) [20, 21]. RE involves the cyclic flow of metal between the alternating extrusion and compression chambers, Fig. 4. The deformation effect could obviously be achieved with the frame/die fixed and the movable punches or vice versa.



**Fig. 4 Reciprocating extrusion compression method.**

While the microstructural results of RE have been published widely, the mechanics of the process received less attention. Some results for RE of cylindrical billets are available in [22], where a simplified stress analysis as well as closer to real conditions Finite Element Method (FEM) simulation shed some light on the deformation process. Results obtained from these analyses revealed that some sections with a hydrostatic stress state (section 0 and 3) and other sections (1-2 and 4-5) where the yield condition is met, Fig. 5. This means that there is an elastic unloading in the transition zone between the two chambers of the die.

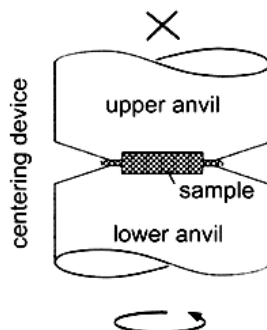


**Fig. 5 Schematic distribution of radial and axial stresses in reciprocal extrusion process [22].**

## 2.5 High Pressure Torsion

High pressure torsion was (HPT) first investigated by Bridgman [23]. Bridgman's experiment did not bring much light on the microstructural changes taking place in severely deformed metals. It was Erbel seems to be the first who carried out HPT experiments for copper [24].

He described and interpreted the grain structure evolution towards a structure of dislocation free subgrains with high angles of misorientation and submicrometer size. He also directed out the increase and eventual saturation of the mechanical properties of severely deformed materials.



**Fig. 6 Principle of HPT experiment.**

Numerous papers prove capability of HPT to achieve UFG structure [25, 26, 27]. For this method, a coin-shape sample is pressed between two anvils under hydrostatic pressure ( $\sim 7$  GPa). During the build-up of the pressure, the sample is pressed into the cavities in the anvil and a burr is formed at the edge of the sample. Then one anvil is rotated with respect to the other one and the rotation speed can be varied over a large range. This leads to a deformation of the sample by almost simple shear. The burr prevents a contact between the two anvils and upholds the hydrostatic pressure. Due to the high pressure, in most metals the formation of cracks is suppressed and therefore it is possible to apply very high strain without failure of the deformed material.

The reached shear strain  $\gamma$  is a function of the twist angle  $\phi$ , the radius  $r$  (of the site of investigation) and the thickness  $t$ . The strain can be expressed in terms of an equivalent von Mises strain by dividing the shear strain by  $\sqrt{3}$ . The equivalent von Mises strain  $\epsilon_{eq}$  as a function of the number of turns  $n$  is then given by

$$\epsilon_{eq} = \frac{2\pi n r}{t\sqrt{3}} \quad (2)$$

The expression was criticized as giving unreasonable results for higher shear angles  $\gamma$  and therefore replaced in some publications by a logarithmic measure ( $\epsilon = 2\ln(\tan \gamma / 3^{0.5})$ ). On the other hand in a paper [28] the authors claim that the logarithmic measure is inappropriate for simple shear (present in torsion) because it does not take into account the incremental rotations of the principal axes of the strain tensor. A logarithmic measure is the right one for pure shear though.

HPT of pure metals leads to a grain refinement until an equilibrium between the fragmentation of large structural elements and grain restoration processes leads to a saturation of the refinement process. Parallel to the refinement of the structure, the mechanical strength

increases until it saturates, too. UTS of  $\sim 1500$  MPa for pure iron and  $\sim 450 - 500$  MPa for pure copper were measured after HPT. From comparison of the in-situ measured torque of nickel with iron and copper, the UTS of nickel can be estimated to be  $\sim 1300$  MPa [29].

## 2.6 CONCLUSIONS

Structural changes in materials subjected to SPD and their effect on properties have been investigated for more than twenty years. In the last ten years, our knowledge of the governing phenomena has been largely extended. However, there is still work to be done in order to understand and control SPD effect.

It is clear from literature survey of the SPD technology that there are a great variety of possible SPD processes. No doubt new and improved processes will still be developed. The main technical problems are the same as in traditional metal forming operations. Thus one of them is the integrity of material deformed. Different materials show different deformation ability. The increased temperature may negate the structural effects of SPD by recovery and recrystallization and help in deformation of more brittle materials. Another problem related with increased processing temperature is flow softening of the material which may lead to plastic flow localization and to fracture.

## 2.7 References

- [1] S. V. DOBATKIN, "Severe Plastic Deformation of Steels: Structure, Properties and Techniques" in Investigation and Applications of Severe Plastic Deformation, Ed. by T. C. Lowe and R. Valiev (Kluwer, Netherlands), 3 (2000) 13-22.
- [2] R. Z. VALIEV, I. V. ALEXANDROV, Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation, Logos, Moscow, 2000.
- [3] R. Z. VALIEV, Y. V. ALEXANDROV, Y. T. YHU, T.C. LOVE, J. Mater. Res. 17 (2002) 5
- [4] R. Z. VALIEV, R. K. ISLAMGALIEV, Y. V. ALEXANDROV, Progr. Mater. Sci. 45 (2000) 103
- [5] N. TSUJI, R. UJELI, Y. ITO, H. W. KIM, Ultrafine Grained Materials IV., Ed. by Y. T. Zhu, T. Langdon, Y. Horita, M. J. Zehetbauer, S. I. Semiatin, T. C. Lowe, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) 2006, 81
- [6] H. MIYAMOTO, K. OTA, T. MIMAKI, Scripta Materialia, 54 (2006) 1725
- [7] T. C. LOWE, R. Z. VALIEV (Eds.), Investigation and Applications of Severe Plastic Deformation (Kluwer, Dodrecht, 2000)
- [8] TMS zbornik
- [9] J. ZRNIK, Metallic Materials, 44 (2006) 5, 243
- [10] V. M. SEGAL, Patent No. 575892, 1977
- [11] V. M. SEGAL, V. I. REZHNIKOV, A. E. DOBRYSHESVSKY, V. I. KOPYLOV, Russ. Metall. (Engl. Transl.) 1 (1981) 99
- [12] V. M. SEGAL, Mat. Sci. Eng. A 345 (2003) 36
- [13] T. G. LANGDON, M. FURUKAWA, M. NEMOTO, Z. HORITA, JOM, 52 (2000) 4, 30
- [14] D. P. DELO, S. L. SEMIATIN, Metall. Mater. Trans. A, 30 (1999) 2473

- [15] S. L. SEMIATIN, D. P. DeLO, U.S. Patent No. 5904062, 1999
- [16] V. M. SEGAL, U.S. Patent No. 5400633, 1995
- [17] M. V. MARKUSEV, V. N. SLOBODA, O. A. KAIBYShEV, Russian Patent No. 2146571, 2000
- [18] Y. SAITO, H. UTSUNOMIYA, H. SUZUKI, in M. Geiger (Ed.), Advanced Technology of Plasticity, (Springer, 1999) 2459
- [19] J. C. LEE, H. K. SEOK, J. H. HAN, Y. H. CHUNG, Mater. Res. Bull., 36 (2001) 997
- [20] J. RICHERT, M. RICHERT, J. ZASADZINSKI, A. KORBEL, Patent PLR No. 123026, 1979
- [21] A. KORBEL, M. RICHERT, J. RICHERT, Proc. 2nd Riso Int. Symp. on Metall. and. Mat. Sci. Roskilde, 1981, 445
- [22] A. ROSOCHOWSKI, R. RODIET, P. LIPINSKI, Proc. of the 8th Int. Conf. Metalforming 2000, Krakow, Sept. 2000, 235
- [23] P. W. BRIDGMAN, Physical Review, 48 (1935) 825
- [24] S. ERBEL, Met. Technol., (1979) 482
- [25] R. Z. VALIEV, N. A. KRASILNIKOV, N. K. TSENEV, Mat. Sci. Eng. A, 137 (1991) 35
- [26] R. Z. VALIEV, Mat. Sci. Eng. A, 234-235 (1997) 59
- [27] O. N. SENKOV, F. H. FROES, V. V. STOLYAROV, R. Z. VALIEV, J. LIU, Scripta Mater., 39 (2001)
- [28] C. SHRIVASTAVA, J. J. JONAS, G. CANOVA, J. Mech. Phys. Solids, 30 (1982) 75

### **3. VÝVOJ A KONSTRUKCE NÁSTROJE PRO ECAP PRO PRÁCI V ROZMEZÍ TEPLOT -40 – 500°C**

#### **DEVELOPMENT AND DESIGN OF ECAP TOOL FOR WORK AT TEMPERATURE INTERVAL - 40 – 500°C**

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

#### **Abstrakt**

Článek popisuje konstrukci nástroje ECAP a princip jeho činnosti. 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.

#### **Klíčová slova**

ECAP, MKP, nanostruktura, intenzivní plastická deformace (SPD).

## Abstract

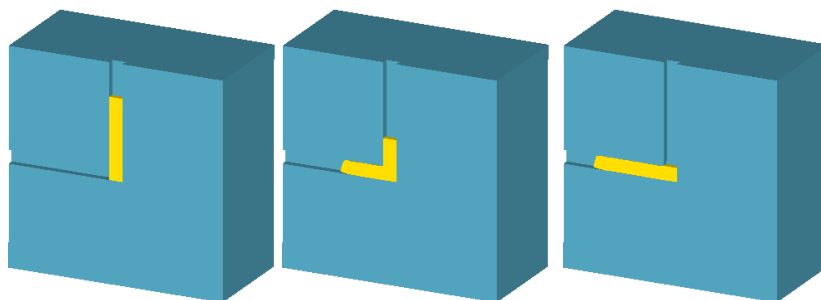
This paper describes the design of ECAP tool and the principle of its work. The tool is dedicated for work at temperature interval  $-40 - 500^{\circ}\text{C}$ . Heating is provided by heating cartridges while cooling is provided by distribution of overcooled nitrogen. There are described FEM simulations dedicated for validation of the design and the consecutive production of this unit as well.

## Keywords

ECAP, FEM, nanostructured, severe plastic deformation (SPD).

### 3.1 ÚVOD

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. Úhel kanálu se obvykle volí  $90^{\circ}$  nebo  $120^{\circ}$ . Byl zvolen úhel  $90^{\circ}$  a to z toho důvodu, že při něm dochází k maximální efektivní deformaci. Na Obr. 1 je znázorněn princip protlačování.



Obr. 1 Princip technologie ECAP.

Zadání:

- Velikost vzorku: 20 x 20 x 12 mm (hranol)
- Tvářecí teplota:  $-40 - 500^{\circ}\text{C}$
- Síla lisu: 3 MN
- Rychlost lisování: 40 mm/s
- Možnost lisování s protitlakem

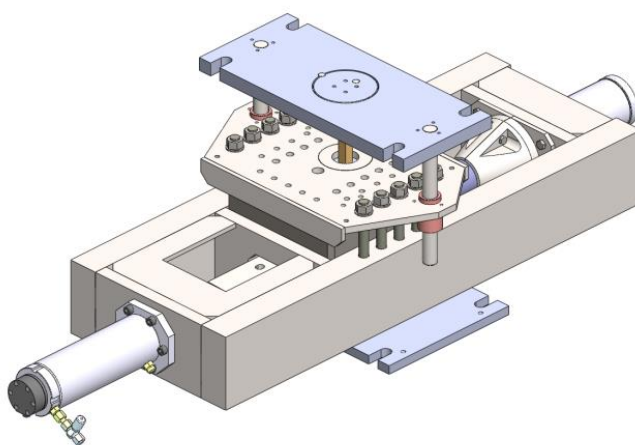
### 3.2 Konstrukce

Nástroj se skládá ze dvou hlavních částí:

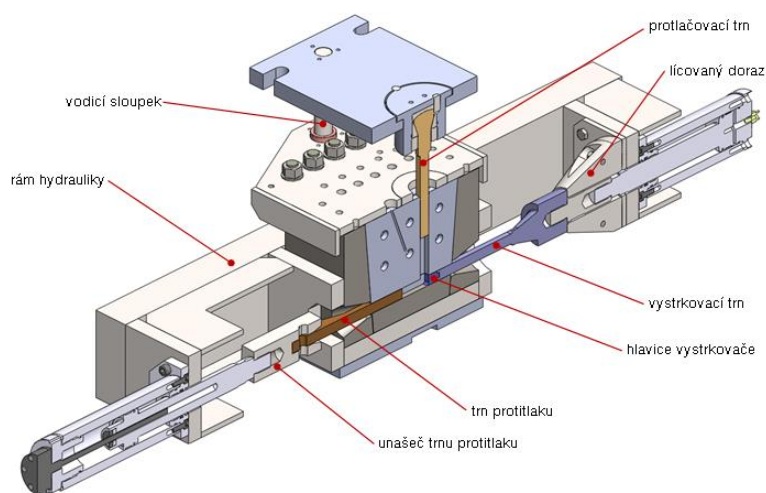
- Horní část tvoří protlačovací trn, který je přichycen pomocí objímky k upínací desce. Tato deska má čtyři vybrání pro šrouby M20, pomocí nichž se upíná k horní desce lisu.

- Spodní část pak tvoří skládaná zápustka uchycená na upínací desku. Také tato deska má rovněž čtyři vybrání pro šrouby M20, pomocí nichž se upíná ke spodní desce lisu. Na upínací desce je rám hydrauliky, který nese hydraulické válce. Tato hydraulika slouží k vyvození protitlaku vůči protlačovanému vzorku a k samotnému vystrčení protlačovaného vzorku.

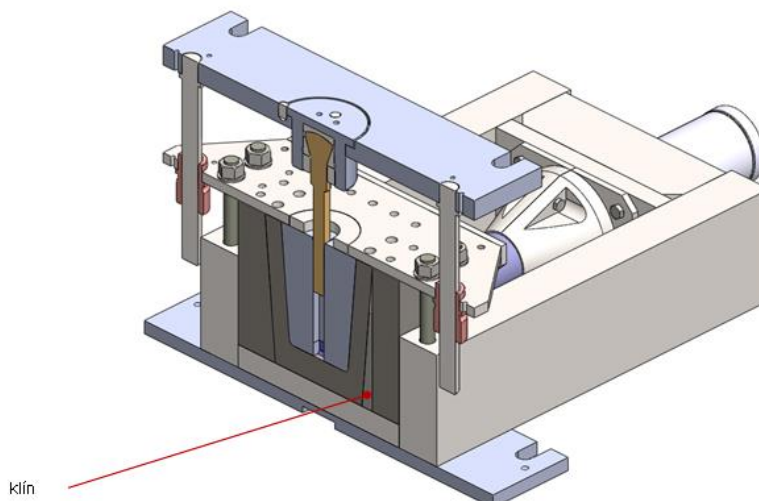
Horní a spodní část je vzájemně vystředěna pomocí dvou vodicích tyčí, které zajíždějí do lícovaných pouzder. Celkový pohled na celý nástroj je na následujících obrázcích (Obr.2- Obr.4). Na nástroji je použitý pevnostní spojovací materiál obvyklé jakosti (ISO - metrické šrouby a matice) a běžné dostupnosti.



**Obr. 2 celkový pohled na nástroj ECAP**



**Obr. 3 podélný řez nástrojem ECAP**



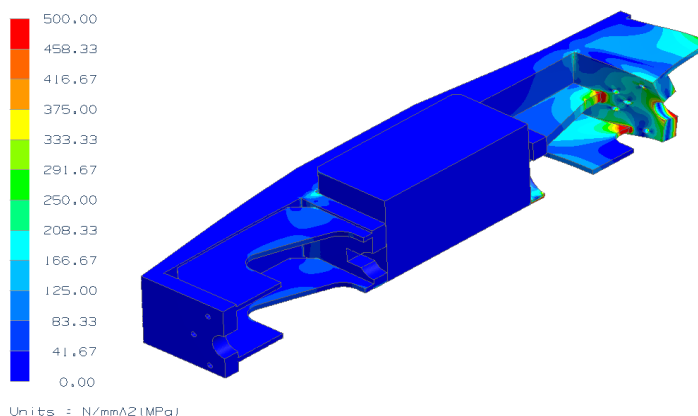
**Obr. 4 příčný řez nástrojem ECAP**

Matrice nástroje je navržena deseti děrami, do kterých jsou vloženy topné patrony. Tyto topné patrony jsou ve voděodolném provedení. Dvě prostřední patrony obsahují navíc termočlánek typu K (NiCr-Ni), který je možné měřit přehřátí topných patron. Měřící bod je středu topné délky. Patrony mají parametry:  $\varnothing 12,5\text{mm} \times 200\text{mm}$ , 230V, 1250W, povrchové zatížení:  $19.65\text{W}/\text{cm}^2$ .

Matrice nástroje je navržena dvaceti děrami  $\varnothing 8\text{mm}$ . Do těchto otvorů vyúsťuje soustava nerezových trubiček. Tyto trubičky jsou připojeny na jedinou přívodní hadici. Přívod tekutého dusíku je ovládán cryoventilem (24V/50Hz). Tento cryoventil je napojen hadicí na elektrické přečerpávací zařízení, které zajišťuje dodávku kapalného dusíku z Dewarovy nádrže (KL32).

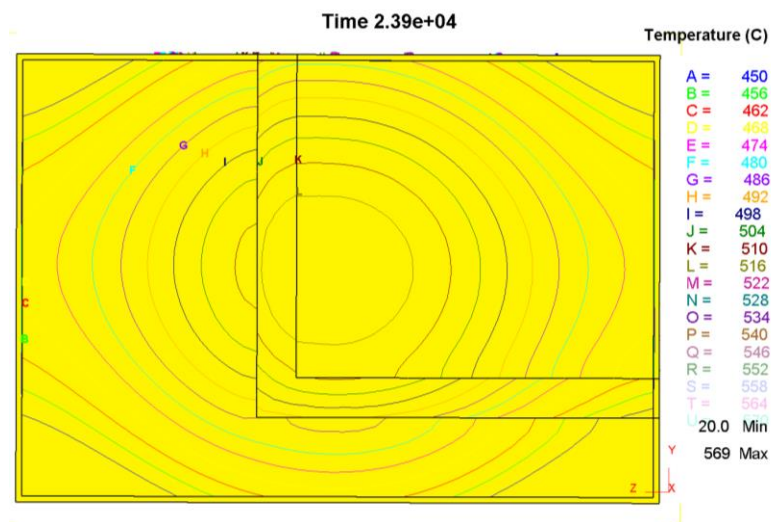
### 3.3 VÝPOČET A REALIZACE

Konstrukce nástroje probíhala s podporou numerické simulace. V programu MSC Marc byl proveden statický výpočet zatížení rámu viz Obr. 5.



**Obr. 5 MKP výpočet zatížení rámu**

Numerickou simulací (Obr. 6.) bylo spočteno rozložení teplot v matici. Dle tohoto rozložení pak bylo navrženo a zhotoveno optimální umístění regulačního termočláčku do místa se spočtenou nejvyšší teplotou.



**Obr. 6 rozložení teplot v matici – řez v místě protlačovacího kanálu**

Odhadovaná doba ohřevu na 500°C je tři hodiny. Připojení topných patron je realizováno pomocí průmyslového konektoru.

Po ukončení vývojových prací následovali další činnosti vedoucí k výrobě a předání nástroje:

- Výběr materiálu
- Výrobní výkresy
- Výroba
- Montáž
- Zkoušení
- Předání

### 3.4 ZÁVĚR

V této práci byl popsán princip technologie ECAP a konstrukce nástroje dle konkrétního zadání. Konstrukce byla podpořena výpočty a následně byl nástroj vyroben. Praxí bylo odzkoušeno, že konstrukce funguje dle daného zadání.



#### 4. VÝVOJ A KONSTRUKCE NÁSTROJE PRO HPT ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT

##### DEVELOPMENT AND DESIGN OF HIGH TEMPERATURE HPT TOOL

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

##### Abstrakt

Článek popisuje konstrukci nástroje HPT a princip jeho činnosti. Nástroj je určen pro práci v rozmezí teplot 20 – 500°C. Ohřev je zabezpečen topnými patrony. Dále jsou popsány MKP simulace pro ověření konstrukce a následná výroba tohoto zařízení.

##### Klíčová slova

HPT, MKP, nanostruktura, intenzivní plastická deformace (SPD).

##### Abstract

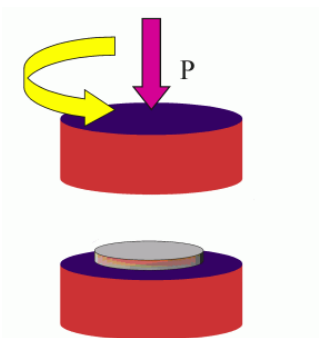
This paper describes the design of HPT tool and the principle of its work. The tool is dedicated for work at temperature interval 20 – 500°C. Heating is provided by heating cartridges. There are described FEM simulations dedicated for validation of the design and the consecutive production of this unit as well.

##### Keywords

HPT, FEM, nanostructured, severe plastic deformation (SPD).

#### 4.1 ÚVOD

Princip tvářecí technologie HPT spočívá v působení tlaku a krutu současně na materiál, který je vložen do dutiny nástroje. Do materiálu je tedy vnášena vícenásobná deformace a tím materiál získává novou strukturu a mechanické vlastnosti. Na následujícím obrázku (Obr. 1) je znázorněn princip technologie.



Obr. 1 Princip technologie HPT

**Zadání:**

- Velikost vzorku:  $\varnothing 20 \times 5$  mm (váleček)
- Tvářecí teplota: 20-500°C
- Síla lisu: 3 MN
- Tlak na vzorek: 8 GPa
- Krut: 20 kNm
- Rychlost otáčení: 20 rpm

**4.2 Konstrukce**

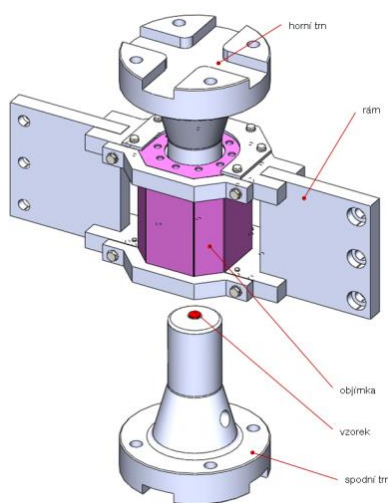
Nástroj se skládá ze tří hlavních částí:

- **Horní trn.** Tento trn je otočný a slouží k vyvození torzního napětí v materiálu. Trn je přichycen k unášeci lisu pomocí čtyř šroubů M20.
- **Spodní trn.** Tento trn je posuvný a slouží k vyvození tlakového napětí v materiálu. Trn je přichycen k unášeci lisu pomocí čtyř šroubů M20.
- **Objímka.** Tato objímka slouží k osovému vystředění obou trnů. Součástí objímky jsou také topné patrony a tepelná izolace. Objímka je k lisu přichycena pomocí rámu.

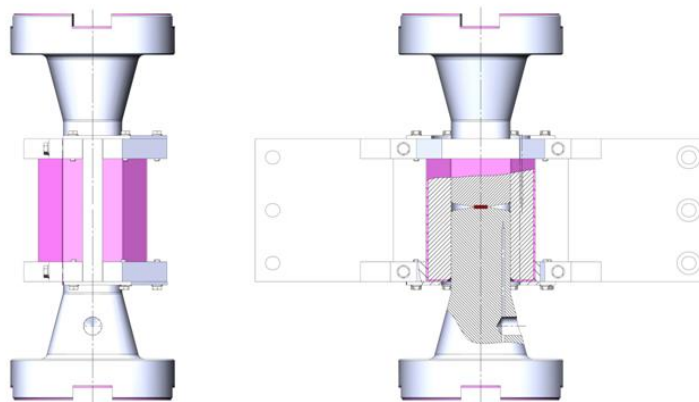
Celkový pohled na nástroj je na následujících obrázcích. (Obr. 2 a Obr. 3)

Pro případ tváření vzorku za vyšších teplot je nástroj opatřen ohřevem. Ohřev se provádí deseti topnými patronami dimenzovanými pro ohřev nástroje na max. 500°C.

Objímka je navrtána deseti děrami ( $\varnothing 12,5$  mm H7), do kterých jsou vloženy topné patrony. Tyto topné patrony jsou ve standardním provedení. Dvě patrony obsahují navíc termočlánek typu K (NiCr-Ni), kterým je možné měřit přehřátí topných patron. Měřicí bod je ve středu topné délky. Patrony mají parametry:  $\varnothing 12,5$  mm x 200 mm, 230 V, 1250 W, povrchové zatížení:  $19,65 \text{ W/cm}^2$ .



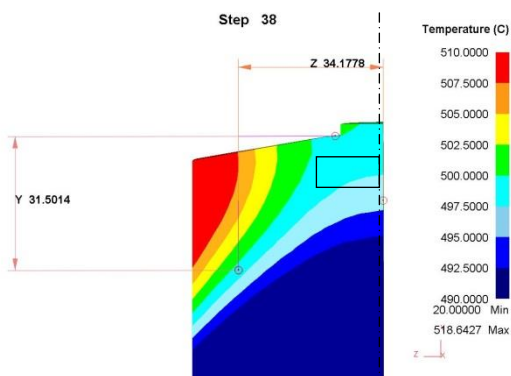
**Obr. 2 celkový pohled na nástroj HPT**



Obr. 3 Podélný řez nástrojem HPT

#### 4.3 VÝPOČET A REALIZACE

Konstrukce nástroje probíhala s podporou numerické simulace. Numerickou simulací, viz Obr. 4, bylo spočteno rozložení teplot v nástroji.



Obr. 4 rozložení teplot v spodním trnu – řez

Dle tohoto rozložení pak bylo navrženo a zhotoveno optimální umístění regulačního termočlásku. Regulační termočlásek je plášťovaný typu K (NiCr-Ni) a vkládá se do otvoru ve spodním trnu. Orientační doba ohřevu na 500°C je dvě hodiny. Připojení topných patron je realizováno pomocí průmyslového konektoru.

Po ukončení vývojových prací následovali další činnosti vedoucí k výrobě a předání nástroje: výběr materiálu, výrobní výkresy, výroba, montáž, zkoušení, předání.

#### 4.4 ZÁVĚR

V této práci byl popsán princip technologie HPT a konstrukce nástroje dle konkrétního zadání. Konstrukce byla podpořena výpočty a následně byl nástroj vyroben. Praxí bylo odzkoušeno, že konstrukce funguje dle daného zadání.

### 5. ZJEMŇOVÁNÍ MIKROSTRUKTURY METODOU ASR

#### Microstructure refinement by ASR

Zbyšek NOVÝ<sup>a</sup>, Daniela HAUSEROVÁ<sup>a</sup>, Jaromír DLOUHÝ<sup>a</sup>

<sup>a</sup> COMTES FHT a.s., Průmyslová 995, 33441 Dobřany, Česká republika, comtes@comtesfht.cz

#### Abstrakt

Pro dosahování velmi dobrých mechanických vlastností uhlíkových ocelí se středním obsahem uhlíku je příznivé, pokud při jejich žíhání dochází ke zjemnění mikrostruktury a ke sferoidizaci cementitických lamel. Mikrostruktura s jemnými zrny a sferoidizovanými karbidy vykazuje sama o sobě velice dobrou kombinaci pevnosti, houževnatosti a tažnosti. Po jejím případném zakalení se jemná mikrostruktura přenáší i do základního stavu a přispívá rovněž k výborné kombinaci vlastností. Během posledních pěti let byl popsán jev nazvaný ASR (Accelerated Spheroidization and Refinement), který umožňuje rychle a efektivně dosáhnout obou efektů – zjemnění mikrostruktury i sferoidizace karbidů. Na základě tohoto jevu byla nově vyvinuta technologie termomechanického zpracování, která sestává z ohřevu materiálu na teplotu pod hodnotu Ac1 s následnou plastickou deformací. Energie vložená do materiálu plastickou deformací vede ke krátkodobému zvýšení teploty nad Ac1 do interkritické oblasti. Především v oblastech perlitických kolonií vzniknou na krátkou dobu austenitické ostrůvky obklopené feritickou maticí. Cementitické lamely se částečně rozpustí v austenitu, ztratí svou celistvost a po následném ochlazení jsou ve struktuře sferoidizované cementitické částice, jejichž výskyt přesahuje hranice původních perlitických kolonií.

#### Klíčová slova

žíhání na měkko, sferoidizace, uhlíková ocel, mechanické vlastnosti, zjemnění zrna, kování

#### Abstract

Favourable processes contributing to attractive mechanical properties in medium-carbon steels include grain refinement and cementite spheroidisation during annealing. As such, fine-grained microstructures with globular carbides offer very good combinations of strength, toughness and ductility. If quenched, they retain their fine-grained nature and the inherently good properties. In recent five years, the ASR phenomenon (Accelerated

Spheroidisation and Refinement) has been reported, which allows both effects, grain refinement and carbide spheroidisation, to be achieved rapidly and effectively. Based on this phenomenon, a new thermomechanical treatment process was developed, which consists of heating to a temperature below  $A_{c1}$  and the subsequent plastic deformation. The energy input into the material through plastic deformation causes a short-term increase in temperature above  $A_{c1}$ , in the intercritical range. As a result, austenite islands form within the ferritic matrix momentarily, mainly in the pearlite colonies. Cementite lamellae partially dissolve in austenite and lose their integrity. Upon cooling, spheroidised cementite particles can be found in the microstructure, even outside the prior pearlite colonies. Thanks to the plastic deformation applied at a relatively low temperature, the resulting ferrite grain becomes much finer.

### Keywords

soft annealing, spheroidisation, carbon steel, mechanical properties, grain refinement, forging

## 5.1 ÚVOD

Stávající procesy, které u ocelí vedou ke sferoidizaci karbidů, jsou založeny na difuzi uhlíku v materiálu, který je ohřátý na teplotu těsně pod  $A_{c1}$ [1]. Difuzní procesy jsou obvykle časově náročné, výdrže na teplotě mohou trvat podle typu oceli jednotky, ale i desítky hodin [2]. Dlouhá doba žíhání proces prodražuje a komplikuje logistiku výroby.

Při dlouhodobém žíhání dochází v materiálu vedle sferoidizace karbidů rovněž k snižování tvrdost, v některých případech k zotavení i rekrytalizaci, ale nedochází ke zjemnění zrna [3]. Pevnost a tvrdost materiálu se snižují, tažnost a plastické vlastnosti rostou. Nově navržený proces s efektem ASR několikanásobně zkracuje čas potřebný na sferoidizaci karbidů, přitom zajistí rovněž vysokou tažnost. Pevnostní vlastnosti klesnou méně – díky zjemnění zrna, ale významně se zlepší houževnatost. V předkládaném článku je sledován vliv intenzity plastické deformace a následné teplotní výdrže na proces sferoidizace karbidů [4].

## 5.2 Experiment

Experimentální program byl proveden na uhlíkové oceli C45 s chemickým složením uvedeným v tabulce 1. Výchozí mikrostruktura byla tvořena feritem a lamelárním perlitem s výraznou texturou. Počáteční tvrdost byla 180 HV, smluvní mez kluzu  $R_{p0.2} = 378$  MPa, mez pevnosti  $R_m = 673$  MPa, tažnost  $A = 29$  % a vrubová houževnatost  $KCV=42$  J/cm<sup>2</sup>. Zpracování bylo provedeno za účelem zjištění vlivu intenzity deformace a teplotní výdrže na sferoidizaci karbidů a mechanické vlastnosti. Režimy zpracování jsou podrobně popsány v sekci 2.1. Vzorky byly zpracovány v peci bez ochranné atmosféry a plasticky deformovány pod hydraulickým lisem mezi plochými kovádky. Na všech zpracovaných vzorcích byla provedena metalografická analýza v podélném řezu vzhledem k původní ose válcování. Mikrostruktura byla analyzována na světelném a elektronovém mikroskopu. Na všech vzorcích byla proměřena tvrdost, dále byly měřeny zkoušky tahem a zkoušky vrubové houževnatosti na mini vzorcích.

## Režimy zpracování

### Konvenční žíhání na měkko

Pro porovnání s nově navrženým termomechanickým zpracováním bylo nejprve provedeno konvenční žíhání na měkko. Tepelné zpracování spočívalo v 12 hodinové výdrži na teplotě 710 °C a pomalém chladnutí v peci po dobu 30 hodin (vzorek HT).

### Termomechanické zpracování – režimy 1, 2, 3, 4

Polotovary o průměru 50 mm a délce 70 mm byly tepelně zpracovány v atmosférické peci a následně deformovány na hydraulickém lisu pomocí rovných kovadel o rychlosti beranu lisu 25 mm za sekundu. Režim se skládal z ohřevu polotovaru v celém průřezu na teplotu těsně pod  $A_{c1}$ , hodinové výdrže na této teplotě a následné plastické deformace na lisu. V případě režimů 1, 2, 3 byla deformace vložena v jednom směru (pěchování), u režimu 4 ve dvou na sebe kolmých směrech. Vzorek 1 byl pěchován na 2/3 své výšky, vzorek 2 na 1/2 výšky, vzorek 3 na 1/3 výšky. Vzorek 4 byl nejprve pěchován na 1/3 své výšky a poté deformován v kolmém směru na 1/2 výšky. Vložená celková efektivní deformace  $\bar{\varepsilon}$  u jednotlivých režimů byla spočtena dle numerické simulace (tab. 2). Po deformaci chladl polotovary na vzduchu. Teplota ohřevu polotovaru byla 710 °C.

### Termomechanické zpracování – režimy 1, 2, 3, 4 + žíhání

Pro zjištění vlivu následné teplotní výdrže po vložené deformaci na modifikaci struktury byly navrženy režimy 1, 2, 3+, které se skládaly z ohřevu polotovaru na teplotu 710 °C, hodinové výdrže na této teplotě, plastické deformace na lisu (jako u vzorků zpracovaných režimy 1, 2, 3, 4) a následnou hodinovou výdrž na teplotě 710 °C. Poté vzorky chladly na vzduchu.

**Tab. 1** Režimy zpracování s mechanickými vlastnostmi a hodnotami spočtenými numerickou simulací ve středu vzorku.

|              | Hodnoty po první deformaci |        | Hodnoty po druhé deformaci |        | Teplotní výdrž po deformaci | HV30 | Rp0,2 [MPa] | Rm [MPa] | A5 [%] | KCV [J/cm <sup>2</sup> ] |
|--------------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|-----------------------------|------|-------------|----------|--------|--------------------------|
|              | $\varepsilon$ [-]          | T [°C] | $\varepsilon$ [-]          | T [°C] |                             |      |             |          |        |                          |
| Výchozí stav |                            |        |                            |        |                             | 180  | 378         | 673      | 29     | 42                       |
| HT           |                            |        |                            |        |                             | 148  | 298         | 541      | 33     | 45                       |
| 1            | 1,0                        | 737    | -                          | -      | Ne                          | 179  | 470         | 642      | 18     | 47                       |
| 2            | 1,7                        | 752    | -                          | -      | Ne                          | 182  | 476         | 613      | 26     | 53                       |
| 3            | 2,9                        | 770    | -                          | -      | Ne                          | 181  | 483         | 596      | 27     | 46                       |
| 1+           | 1,0                        | 737    | -                          | -      | Ano                         | 170  | 415         | 580      | 20     | 47                       |

|    |     |     |     |     |     |     |     |     |    |    |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|
| 2+ | 1,7 | 752 | -   | -   | Ano | 175 | 421 | 575 | 22 | 57 |
| 3+ | 2,9 | 770 | -   | -   | Ano | 175 | 432 | 570 | 23 | -  |
| 4  | 2,9 | 770 | 4,0 | 741 | Ne  | 176 | 482 | 611 | 24 | 51 |
| 4+ | 2,9 | 770 | 4,0 | 741 | Ano | 145 | 385 | 539 | 30 | 55 |

### 5.3 VÝSLEDKY a DISKUZE

Experimentální program byl prováděn na oceli C45 obsahující ve výchozím stavu po válcování lamelární perlit (obr. 8). U této morfologie cementitu je přeměna na globulární formu relativně obtížná, což dokumentuje referenční vzorek, žíhaný po dobu 12 hodin v peci na teplotě 710 °C a následným chladnutím v peci po dobu 30 hodin. Došlo pouze k částečnému fragmentování cementitických lamel v celém objemu vzorku. Tvrdost konvenčně vyžíhaného vzorku poklesla oproti výchozímu stavu ze 180 HV30 na 148 HV30. Ostatní mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 2. Mez pevnosti klesla na 541 MPa a tažnost stoupla na 33%. Vrubová houževnatost stoupla na 45 J/cm<sup>2</sup>.



Obr. 1 Vzorek 1, střed

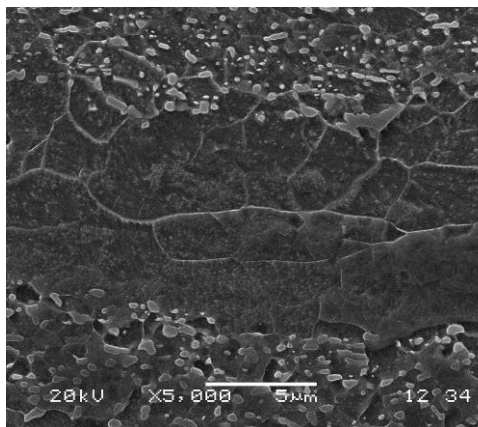
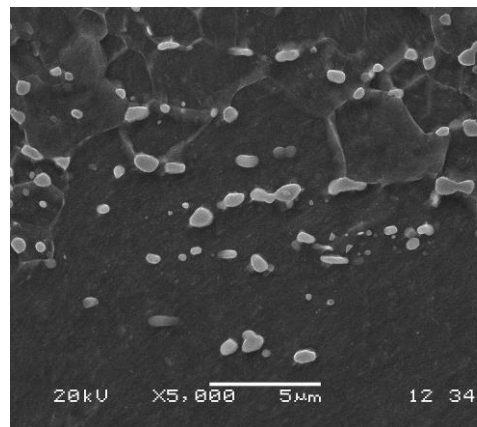


Obr. 2 Vzorek 2, střed



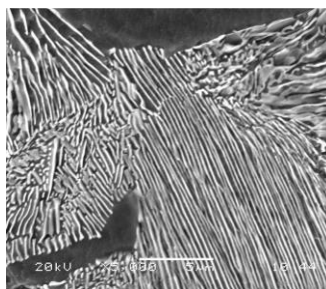
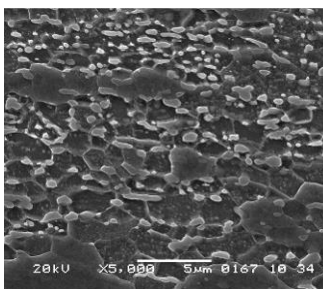
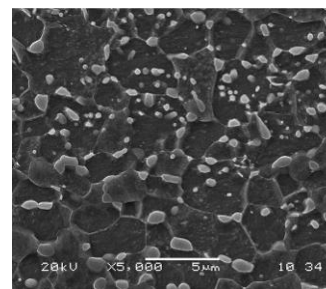
Obr. 3 Vzorek 3, střed

Struktury termomechanicky zpracovaných vzorků vykazují výrazně dokonalejší sferoidizaci karbidů. Ve středu vzorků 1, 2 a 3 je možné pozorovat homogenizaci rozložení karbidů se vzrůstající hodnotou plastické deformace (obr. 3, 4, 5). Sferoidizace lamel cementitu ve středu vzorku 1 byla pouze částečná. Pro dokonalejší sferoidizaci je potřeba vložení vyššího stupně plastické deformace. Již ve vzorku 2 bylo dosaženo podstatně vyššího stupně sferoidizovaných karbidů. Pozorovatelné byly pouze izolované malé oblasti s částečně fragmentovanými lamelami (obr. 6). U vzorku 3 proběhla téměř dokonalá sferoidizace spojená se zhomogenizováním hustoty karbidů v materiálu. Současně došlo ke zjemnění feritického zrna jak ve feritických oblastech (na 4 až 20 μm), tak v místech s vysokou hustotou karbidů (na 1 až 3 μm).

**Obr. 4 Vzorek 2, střed****Obr. 5 Vzorek 2+, střed**

Ve vzorcích 1 až 3 byly pozorovány velké rozdíly mezi strukturou středu vzorku a strukturou v polovině vzdálenosti mezi středem a povrchem. Mikrostruktura mimo střed byla téměř beze změny oproti výchozímu stavu. Docházelo pouze k částečné rekrystalizaci či vzniku subzrn ve feritu a k menšinové sferoidizaci karbidů.

Mechanické vlastnosti těchto třech vzorků vykazovaly zřejmý trend (Tab. 2). Se zvyšující se intenzitou vložené plastické deformace se zvyšuje mez kluzu v tahu, snižuje mez pevnosti v tahu a zvyšuje tažnost. Zvýšení meze kluzu je pravděpodobně způsobeno celkovým zjemněním feritického zrna a snížení meze pevnosti sferoidizací karbidů. Vrubová houževnatost nevykazovala jasný trend, hodnoty jsou zobrazeny v Tab. . Tvrdost se pohybovala okolo 180 HV.

**Obr. 8 Výchozí stav****Obr. 9 Vzorek 4, střed****Obr. 10 Vzorek 4+**

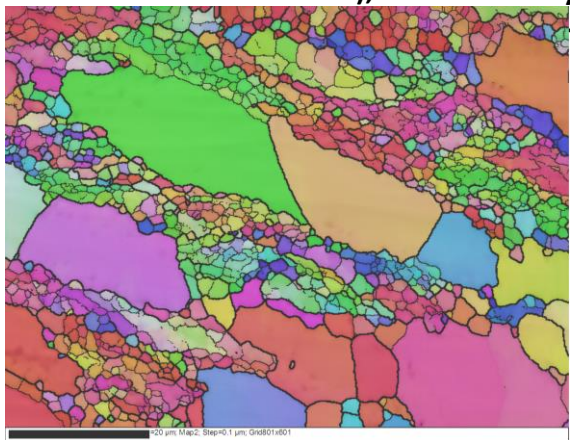


Režimy s následnou hodinovou teplotní výdrží na 710 °C (1+, 2+, 3+) byly navrženy za účelem homogenizace struktury a dalšího odpevnění struktury. Nebyla pozorována významná homogenizace vzorku po jeho průřezu, ani sferoidizace karbidů nebyla významně podpořena (Obr. 7). Vlivem teplotní výdrže došlo pouze k dalšímu odpevnění feritické matrice a ke zhrubnutí feritického zrna. Opět jako u vzorků 1,2,3 je u těchto vzorků s teplotní výdrží zřejmý trend. Se zvyšující se intenzitou vložené plastické deformace se zvyšuje mez kluzu v tahu, snižuje mez pevnosti v tahu a zvyšuje tažnost. To je dáno mírou zjemnění feritického zrna a sferoidizace karbidů. Tvrdost se pohybovala okolo 170HV.

U vzorku 4 a 4+ byla kromě světelné a elektronové mikroskopie provedena EBSD analýza (Electron Back Scattered Diffraction). Výsledek je na obr. 11.

U vzorku 4 došlo stejně jako u vzorků 2 a 3 ke sferoidizaci karbidů a ke zjemnění feritického zrna (obr. 9). Druhá deformace výrazně přispěla ke sferoidizaci karbidů i mimo střed vzorku. I u povrchu byla pozorována přibližně 50% sferoidizace cementitu.

**Obr. 6 EBSD mapa orientace zrn vzorku 4+. Každá barva odpovídá určité orientaci feritické mřížky. Tlusté čáry odpovídají velkoúhlovým hranicím zrn (odchylka orientace mřížek >15°), tenké čáry**



Hodinová výdrž na teplotě 710 °C vložená po plastické deformaci měla na tomto vzorku 4+ vliv jak na velikost feritického zrna, tak i na tvar cementitických částic (obr. 10). Feritické zrna v oblastech bez karbidů zhrublo na velikost přibližně odpovídající výchozímu stavu (20 až 30 μm). V oblastech s vysokou hustotou karbidů však zůstaly hranice jemných feritických zrn těmito karbidy fixovány a ke zhrubnutí zrna nedošlo. Vlivem hodinové výdrže u tohoto vzorku 4+ došlo k významnému celkovému odpevnění.

## 5.4 ZÁVĚR

Podařilo se nalézt proces termomechanického zpracování (ASR – Accelerated Spheroidization and Refinement), kdy došlo ke sferoidizaci karbidů během velice krátké doby vlivem plastické deformace. V důsledku plastické deformace nastanou zároveň se sferoidizací karbidů rekrytalizační procesy, při kterých se zásadně mění velikost zrna. Se zvyšující se intenzitou vložené plastické deformace v jednom směru se zvyšuje mez kluzu v tahu, snižuje mez pevnosti a zvyšuje tažnost, a to v důsledku zjemnění feritické matrice a míry sferoidizace karbidů. Teplotní výdrž vložená bezprostředně po deformaci způsobila další celkové odpevnění struktury. Došlo ke zhrubnutí zrna ve feritických oblastech, v oblastech se zvýšenou hustotou karbidů si zrna a subzrna udržela velikost kolem 3 μm získanou v průběhu plastické deformace.

## 5.5 Literatura

- [1] Ghosh, S. Rate-controlling parameters in the coarsening kinetics of cementite in Fe–0.6C steels during tempering. Scripta Materialia, 2010, Vol. 63, No. 3, 273-276. ISSN 1359-6462.
- [2] Ata, K. G., Meisam, S. A. Spheroidizing kinetics and optimization of heat treatment parameters in CK60 steel using Taguchi robust design. Journal of Iron and Steel Research, 2010, Vol. 17, No. 4, 45-52, ISSN 1006-706X.
- [3] Nam, W. J., Bae, C. M. Coarsening behavior of cementite particles at a subcritical temperature in a medium carbon steel. Scripta Materialia, 1999, Vol. 41, No. 3, pp. 313-318, ISSN 1359-6462.
- [4] Zhang, S. L., Sun, X. J., Dong, H. Effect of deformation on the evolution of spheroidization for the ultra high carbon steel. Materials Science and Engineering, 2006, Vol. 432, No. 1- 2, 324-332, ISSN 0921-5093.

## 6. ZJEMŇOVÁNÍ MIKROSTRUKTURY POVRCHOVÝCH OBLASTÍ OCELOVÉHO PASU

### Refinement of surface areas microstructure of a steel strip

Zbysek NOVÝ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> COMTES FHT a.s., Průmyslová 995, Dobřany 33441, info@comtesfht.cz

#### Abstrakt

Článek prezentuje vývoj a výzkum přípravku na povrchové zjemnění mikrostruktury plochých polotovarů. Technika využívá mechanismu deformačního zjemnění, které nastává při dosažení vysokého stupně deformace v nerekrystalizované mikrostruktuře. V uvedené práci je představena technika, která deformuje povrchové vrstvy plochého polotovaru opakovanými průchody nástroje, který povrch materiálu tváří. Nástroj, který plochý polotovar tváří, přiléhá funkční plochou k deformovanému pasu a posunuje se po něm. Funkční plocha nástroje je tvořena rovinou, ze které vystupuje žebro ve tvaru elipsy v příčném řezu. Toto žebro je hlavním deformačním elementem, který vstupuje do zpracovávaného pasu a při vzájemném pohybu ho významně deformuje. Povrchové vrstvy tvářeného pasu jsou při vzájemném pohybu nástroje a polotovaru nuceny obtékat žebro a vracet se přibližně do svojí výchozí polohy. Výsledná geometrie polotovaru se průchodem žebra nemění, je proto možné provádět více průchodů, pokud to plasticita materiálu umožní. Při realizaci více průchodů pod teplotou rekrystalizace se v materiálu kumuluje stupeň deformace a nastávají podmínky pro velmi intenzivní deformační zjemnění zrna.

#### Klíčová slova

Zjemnění mikrostruktury, deformační zjemnění, extrémní deformace, povrchová oblast

#### Abstract

The paper presents the research and development of a jig for surface microstructure refinement of flat semi-products. The technique uses the mechanism of deformation refinement which occurs when reaching a high degree of deformation in non-recrystallized microstructure. In this paper the technique which deforms the surface layers of flat semi-products by repeated tool passes forming material surface is introduced. The tool, which forms the flat semi-product, abuts by its functional area to the deformed strip and moves on it. The functional tool area is formed by a plane which an elliptical rib in cross section emerges from. This rib is the main deformation element which enters into the processed strip and deforms the strip significantly during mutual movement. Surface layers of the formed strip are during mutual movement of the tool and semi-product forced to bypass the rib and return approximately to its initial position. The resulting geometry of the semi-product does not change by rib passing, it is therefore possible to make multiple passes, if the material plasticity permits. When implementing multiple passes below the recrystallization temperature the degree of deformation accumulates and conditions for severe deformation of grain refinement occur.

### Keywords

Microstructure refinement, deformation refinement, severe deformation, surface area

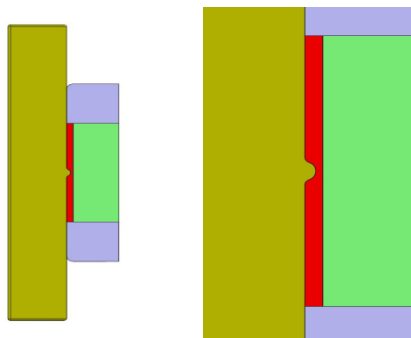
## 6.1 ÚVOD

Zjemňování mikrostruktury kovových objemových materiálů pod hranici jednoho mikrometru přináší významné příznivé změny především v oblasti mechanických vlastností. Základním přínosem je velmi výhodná kombinace pevnosti a houževnatosti, neboť zjemnění zrna je jediným zpevňujícím mechanismem, který zároveň přináší i zlepšení anebo alespoň zachování hodnot vrubové nebo lomové houževnatosti. Technologická realizace zjemňování objemových kovových materiálů zůstává i po desítkách let výzkumu obtížnou úlohou. Pro rozměrnější polotovary a vzorky je dosažitelné několika málo technologiemi, které vždy mají svá omezení použitelnosti. Pro zlepšení mechanických a dynamických vlastností kovových materiálů může být účelně využito deformační zjemnění povrchových vlastností rozměrného polotovaru nebo vzorku. V tomto případě nemusí extrémní deformaci prodělat celý objem polotovaru, ale jen jeho povrchové oblasti do určité definované hloubky pod povrch.

## 6.2 Experimentální zařízení

Nástroj, který plochý polotovar tváří, přiléhá funkční plochou k deformovanému pasu a posunuje se po něm. Funkční plocha nástroje je tvořena rovinou, ze které vystupuje žebro ve tvaru elipsy v příčném řezu. Toto žebro je hlavním deformačním elementem, který vstupuje do zpracovávaného pasu a při vzájemném pohybu ho významně deformuje. Povrchové vrstvy tvářeného pasu jsou při vzájemném pohybu nástroje a polotovaru nuceny obtékat žebro a vracet se přibližně do svojí výchozí polohy. Výsledná geometrie polotovaru se průchodem žebra

nemění, je proto možné provádět více průchodů, pokud to plasticita materiálu umožní. Při realizaci více průchodů pod teplotou rekrytalizace se v materiálu kumuluje stupeň deformace a nastávají podmínky pro velmi intenzivní deformační zjemnění zrna.

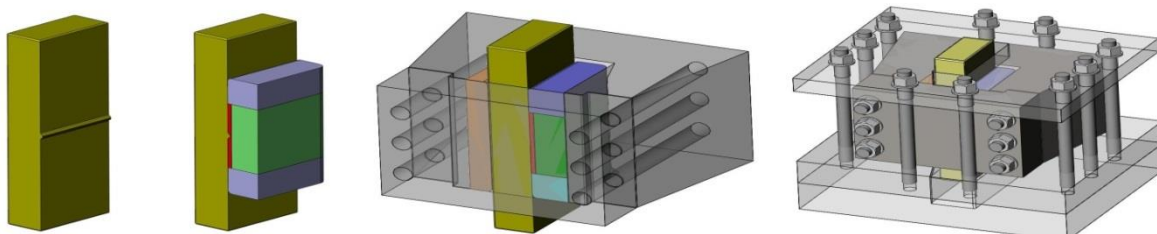


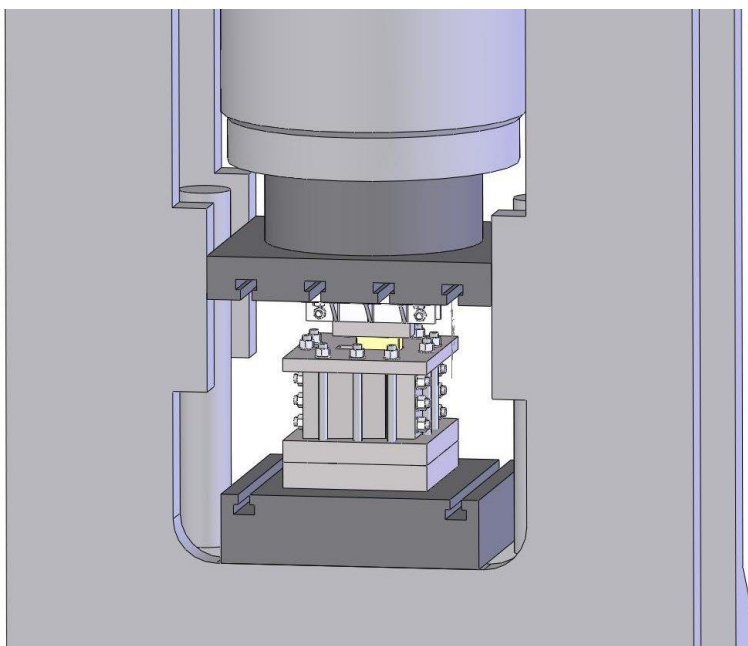
**Obr. 1 Nástroj pro tváření povrchových vrstev plochého polotovaru. Vzorek je znázorněn červenou barvou.**

Nástroj a tvářený polotovar jsou uzamčeny ve speciální objímce s vysokou tuhostí. Tato objímka umožňuje pouze obousměrný vzájemný pohyb v jedné přímce, neposkytuje žádný druhý stupeň volnosti. Je vhodné, aby výchozí tvar polotovaru byl čtvercový, pak je možné mezi opakovanými průchody žebra čtverce pootáčet o devadesát stupňů. Tím je aktivován pohyb dislokací ve větším počtu systémů rovin, což je pro deformační zjemňování zrna příznivější. Intenzivní deformace materiálu probíhá jen v povrchových vrstvách, hloubka deformace závisí na geometrii žebra. Samotný pohyb nástroje je realizován pod hydraulickým lisem. Po vylisování jednoho průchodu se přípravek obrátí o 180° a je možné lisovat další průchod. Tato reverzace procesu zajišťuje možnost opakovaných průchodů a kumulace deformace v povrchových vrstvách materiálu. Popsaná metoda tváření plochých polotovarů byla nazvána ASF (Acumulative Surface Forming).

### 6.3 Konstrukce zařízení

Byl zkonstruován tvářecí přípravek pro rozměry polotovaru 120 x 120 x 7 mm. Princip konstrukce je znázorněn na obrázku 2. Objímka, které fixuje vzájemnou polohu tvářeného polotovaru a nástroje s žebrem, je tvořena ze čtyř částí spojených dohromady dvěma soustavami šroubů. První soustava stahuje díly, které fixují vzájemnou polohu nástroje a polotovaru v radiálním směru, druhá soustava fixuje objímku v axiálním směru působení síly.

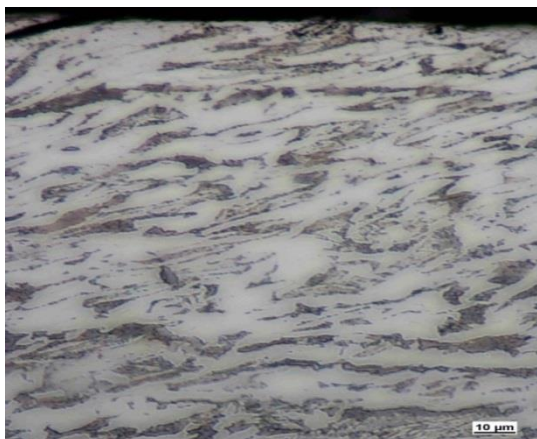


**Obr. 2a Přípravek pro tváření metodou ASF****Obr. 2b Umístění přípravku v prostoru hydraulického lisu**

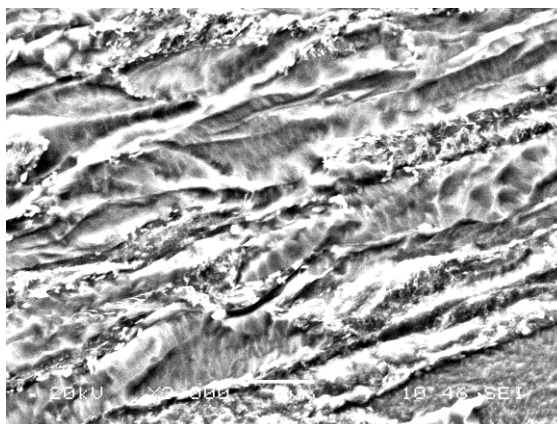
Pro příznivý průběh procesu jsou velmi důležité kontaktní podmínky mezi nástrojem a tvářeným polotovarem. Styčná plocha trnu a vzorku byla před montáží ošetřena grafitovým mazadlem GRASIMETH BAZ 15 od výrobce Fuchs Lubritech GmbH. Maximální napětí zjištěné numerickou simulací na trnu při vzájemné rychlosti pohybu nástroje a polotovaru 10 mm/s bylo spočteno simulací FEM programem DEFORM 1200 MPa. Maximální lisovací síla byla predikována 310kN.

#### 6.4 Experiment

Destička o rozměrech 120 x 120 x 7 mm byla vyrobena z oceli ČSN EN 11300 a následně vyžehána na měkko. Připravený vzorek byl vsazen do tvářecího přípravku a fixován. Následně byl tvářen deseti průchody žebra po povrchu experimentálního materiálu. Deformace vzorku byla na metalografickém snímku zřetelná do hloubky cca 500 μm. Při detailní analýze mikrostruktury je možné pozorovat ve feritické matici útvary subzrn, vzniklých vlivem kumulované deformace povrchu vzorku.



**Obr. 3a Feriticko perlitická mikrostruktura vzorku oceli ŠN EN 11300 po intenzivním tváření**



**Obr. 3b Detailní snímek tvářené mikrostruktury vzorku. Lze pozorovat členění tvářených feritických zrn do struktury subzrn vlivem kumulované deformace. Nebyla pozorována nová jemná zrna s velkoúhlovými hranicemi.**

## 6.5 Závěr

Byla vyvinuta nová technika dosahování vysokého stupně deformace na povrchu plochých vzorků za účelem získání velmi jemné mikrostruktury a speciálních vlastností polotovaru na jeho povrchu. Navržená metoda byla numericky počítána, byl proveden konstrukční návrh tvářecího přípravku s nástrojem, přípravek byl vyroben a otestován. Bylo ověřeno funkčnost návrhu na vzorcích z oceli ČSN EN 11300, které byly před tvářením vyžehány na měkko. Zpracované vzorky byly podrobeny metalografické analýze. Vzorky zpracované desetinásobným průchodem nástroje po povrchu tvářeného materiálu vykazují značné protažení původní rovnoosé feriticko perlitické mikrostruktury do jednoho směru až do hloubky 500 μm. Na optickém mikroskopu není patrné další zjemňování zrna vlivem deformačního ovlivnění. Na detailnější analýze mikrostruktury provedené na řádkovacím elektronovém mikroskopu jsou patrné hranice subzrn, které vznikly vlivem deformace v proeutektoidních feritických zrnech.

## 6.6 Literatura

- [1] V. M. Segal, V. I. Reznikov, V. I. Kopylov, et al., Plastic Structure Formation in Metals (Nauka i Tekhnika, Minsk, 1994) [in Russian]
- [2] R. Z. Valiev and I. V. Aleksandrov, Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation (Logos, Moscow, 2000) [in Russian]
- [3] S. V. Dobatkin, "Severe Plastic Deformation of Steels: Structure, Properties, and Techniques," in Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation, Ed. by T. C. Lowe and R. Z. Valiev (Kluwer, Netherlands, 2000), Vol. 3/80, pp. 13-22.
- [4] J. Kim, I. Kim, and D. H. Shin, "Development of Deformation Structures in Low Carbon Steel by Equal Channel Angular Pressing," *Scr. Mater.* 45, 421-426 (2001).
- [5] Y. Fukuda, K. Oh-ishi, Z. Horita, and T. Langdon, "Microstructures and Mechanical Properties of Low Carbon Steel Processed by Equal Channel Angular Pressing," in Proceedings of the International Symposium on Ultrafine Grained Steels, 2001 (2001), pp. 156-159.

## 7. POSUZOVÁNÍ VLASTNOSTÍ OBJEMOVÝCH NANOMATERIÁLŮ

### Bulk nanomaterials properties evaluation

Ján Džugan <sup>a</sup>, Radek PROCHÁZKA <sup>a</sup>, Pavel KONOPÍK <sup>a</sup>

<sup>a</sup> COMTES FHT, Průmyslová 995, 334 41 Dobřany, ČR, E – jan.dzugan@comtesfht.cz

### Abstrakt

Výzkum v oblasti nanomateriálů umožňuje dosažení materiálů s velmi zajímavými mechanickými vlastnostmi, což umožňuje rozšíření sféry použití již známých materiálů v nových oblastech. Při vývoji nových materiálů, jsou obvykle vyráběny pouze ve velmi omezeném objemu. Pokud mají být vyhodnoceny mechanické vlastnosti těchto materiálů, speciální techniky, využívající miniaturní vzorků musí být použity. Metoda Small Punch Test (SPT) je inovativní technika použitelná v případech, kdy je k dispozici omezené množství experimentálního materiálu. Její nevýhodou je způsob zatěžování, který není jednoosý jako v případě zkoušky tahem, na níž se výsledky SPT většinou převádějí. Neexistuje přímý vztah pro přepočítání zkoušky SPT na výsledky zkoušky tahem a přepočítání se provádí na základě zjištěných empirických korelací. Tuto korelaci je třeba vždy ověřit předtím, než ji je možno aplikovat na nový materiál vzhledem k její omezené platnosti.

Vzhledem k velikosti SPT vzorků je možno vyrobit mikro - tahové (M-TT) vzorky ze stejného objemu materiálu a provést skutečnou zkoušku tahem na těchto mikro - vzorcích. Tento typ zkoušek zachovává minimální požadavky na objem experimentálního materiálu, při zachování shodného způsobu zatěžování jako v případě standardních tahových zkoušek. Výsledky získané na základě měření miniaturních tahových vzorků jsou přímo srovnatelné s výsledky naměřených na standardních vzorcích.

První část článku se zabývá vývojem zkušební metody M-TT, návrhem geometrie vzorku, způsobu upnutí a měření deformace vzorku pomocí mechanického extensometru.

Druhá část článku se zabývá vyhodnocením zkoušek s měřením deformace vzorku pomocí mechanického extensometru a dále pak využitím optických metod měření deformací a ověření souhlasu mezi M-TT a standardními vzorky pro širokou škálu kovových materiálů.

### **Klíčová slova**

Objemové nanomateriály, mechanické vlastnosti, zkouška tahem.

### **Abstract**

Contemporary research in the field of nanomaterials produces materials with very interesting mechanical properties, allowing extended application for already known materials or completely new application areas. In the course of materials research the materials are usually produced in very limited volumes. If mechanical properties of materials investigated are to be evaluated, special techniques using miniature samples have to be applied. The small punch test (SPT) method is an innovative technique applicable in cases when limited amount of the experimental material is available. Its disadvantage is the way of loading, which is not uni-axial like in the case of tensile test into which SPT results are mostly converted. There is no direct relation between tensile test and SPT thus conversion of a small punch tests data into tensile test terms is usually performed on the basis of established correlations. These correlations must be always verified, if new material is going to be investigated.

Considering SPT samples size, there is chance to machine micro-tensile (M-TT) samples from the same material volume and perform a real tensile test on such micro-samples. This kind of tests maintains minimal material requirements, while the same loading mode of samples as in the case of standard tensile tests is kept. Moreover direct results conversion into standard terms is possible. The applicability of both techniques SPT and micro-tensile tests for mechanical properties evaluation on nano-materials is presented here.

The first part of the paper deals with M-TT development and strain measurements with mechanical extensometer.

The second part of the paper deals with evaluation of M-TT test with the strain measurement using mechanical extensometer and subsequently application of the optical methods for the strain measurement. Additionally, performance of the M-TT method is demonstrated for a wide range of tensile tests of metallic materials.

### **Keywords**

Bulk nanomaterials, mechanical properties, tensile test.



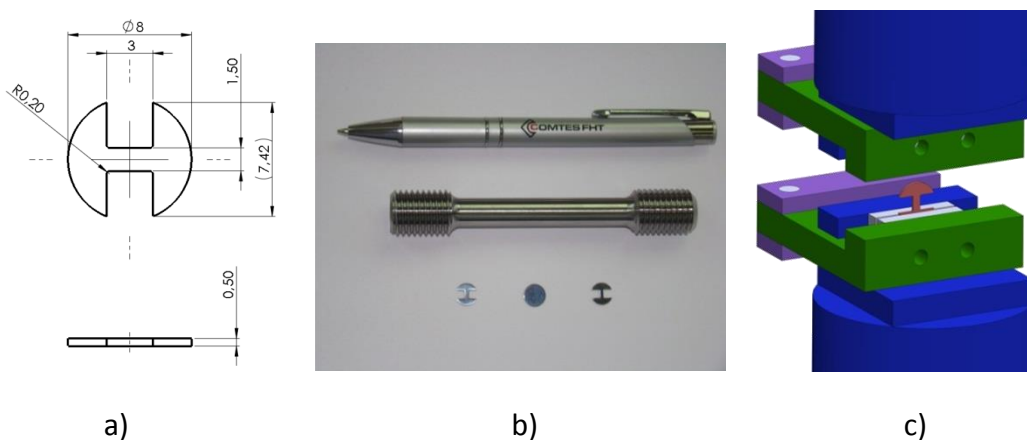
## 7.1 ÚVOD

V případě vývoje technologie výroby nanostrukturních objemových materiálů např. metodami ECAP, CONFORM, rotačního kování, High Torsion Pressure, je k dispozici velmi omezené množství experimentálního materiálu, na němž mohou být vyhodnoceny mechanické charakteristiky takto vyrobených materiálů. Vzhledem k těmto omezením je nezbytné použití zkušebních technik založených na zkouškách miniaturních zkušebních těles. Jednou z nejčastěji používaných metod je penetrační zkouška small punch test, kdy se do vzorku diskového tvaru vtlačuje kulička a měří se záznam síly na posuvu zatěžující síly. Z této závislosti se následně s využitím korelačních vztahů vyhodnocují uvažované mechanické charakteristiky. Velkým omezením této metody je nutnost znalosti korelačních vztahů, jež se liší pro jednotlivé materiály a jejich přenositelnost mezi jednotlivými zkušebními laboratořemi je také velmi omezená.

Pro vyhodnocení tahových vlastností materiálů, kdy je k dispozici pouze minimální objem experimentálního materiálu je vyvinuta zkouška Mikro Tensile Test (M-TT), umožňující realizaci zkoušky tahem na miniaturních vzorcích. Rozměry vycházejí z vnějších rozměrů zkušebních vzorků pro metodu SPT. Metody SPT a M-TT nejsou v současné době standardizovány, nicméně v případě SPT došlo alespoň k úmluvě „Code of Practice“ (dále jen CoP) vypracované v rámci aktivit pracovní skupiny CEN. Výchozí vzorky tedy odpovídají rozměrům uvedeným v pracovním postupu metody SPT pro vnější průměr 8 mm. [1]

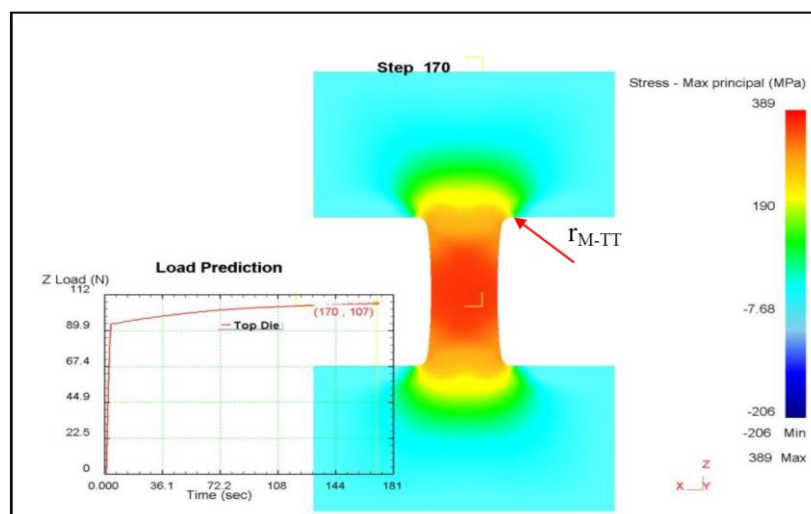
## 7.2 Micro-Tensile Test

Pro určení tahových vlastností kovových materiálů a při současném zachování výhody spotřeby velmi malého množství experimentálního materiálu byla na základě velikosti a tvaru SPT navržena geometrie pro mikro-tahové těleso, viz Obr. 1a. Srovnání velikosti mezi standardním a mikro-tahovým tělesem je vyobrazeno na Obr. 1b. Pro takový typ tělesa bylo nutné navrhnout čelisti pro uchycení do univerzálního zkušebního stroje, viz Obr. 1c.



**Obr. 1 a) Mikro-tahové těleso, b) porovnání se standardním tělesem, c) model čelistí navržených pro uchycení mikro-tahového tělesa do zkušebního stroje**

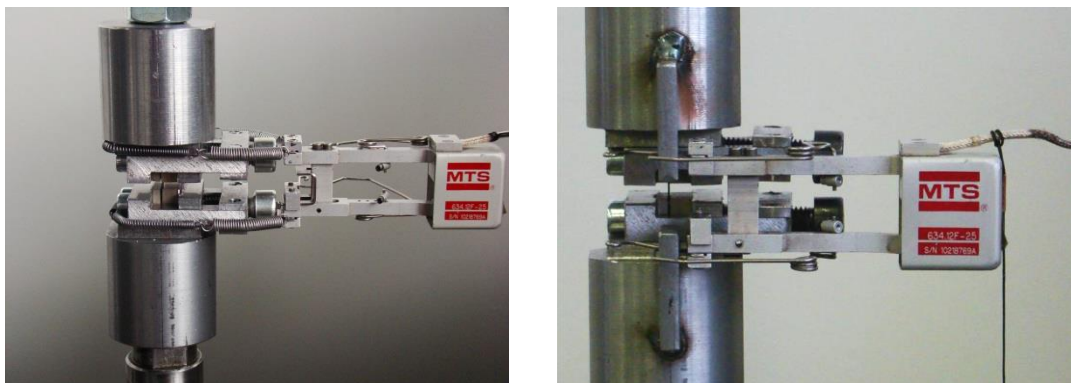
Tvar zkušební tělesa byl navržen i s ohledem na vyrobiteľnosť a reprodukovateľnosť tvaru při výrobě a v neposlední řadě i kvůli možnosti vyrobit ho již z existujících SPT disků (např. pokud již byly vystaveny tepelné expozici nebo ozáření, např. jako svědečné vzorky v elektrárnách). Délka tělíčka 3 mm a radius 0,2 mm jsou negativní tvary obráběcího nástroje (řezné destičky). Následně byla geometrie M-TT verifikována za použití metody konečných prvků (MKP) v programu DEFORM. Bylo sledováno rozložení napětí mezi tělem a hlavou zkušební tělesa. Na **Obr. 2** je zobrazena analýza rozložení napětí v M TT tělese při maximálním zatížení. Z této analýzy vyplývá, že největší napětí při maximálním zatížení je uprostřed těla tělesa a provedené experimenty tento předpoklad potvrzují – tělesa z velké části praskají uprostřed.



**Obr. 2** Rozložení napětí v M-TT tělese při maximálním zatížení [2]

### 7.3 Měření deformací mechanickým snímačem deformace

Vlastní zkouška M-TT probíhá ve stejném módu zatěžování a při stejných deformačních rychlostech jako standardní zkouška tahem prováděná dle normy [3]. Při prvních testech byl k měření deformace těles použit mechanický extenzometr připevněný na čelistech, viz **Obr. 3**.



**Obr. 3** Dva možné způsoby chycení extenzometru na čelisti

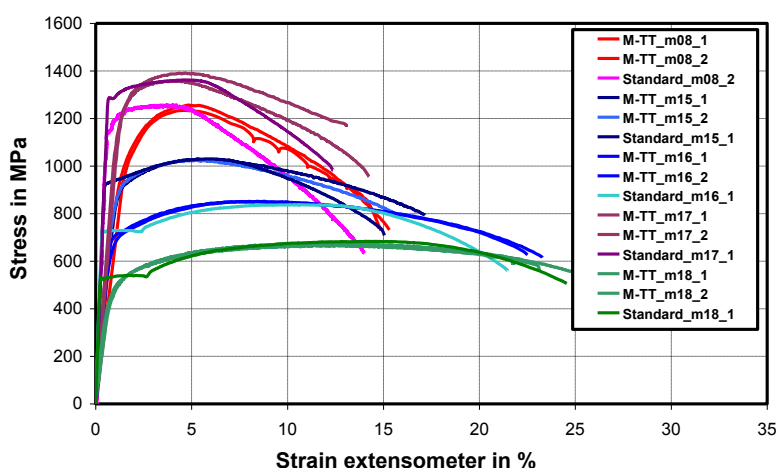
Vhodnost takto navržené zkoušky byla ověřena na skupině ocelí (vzorky označené m08, m15, m16, m17 a m18). Stejně jako v případě standardní zkoušky tahem byly zaznamenány hodnoty síly v N a deformace v mm, které se převedly na souřadnice smluvní napětí – poměrná deformace.

#### 7.4 Vyhodnocení zkoušek M-TT s použitím mechanického extenzometru.

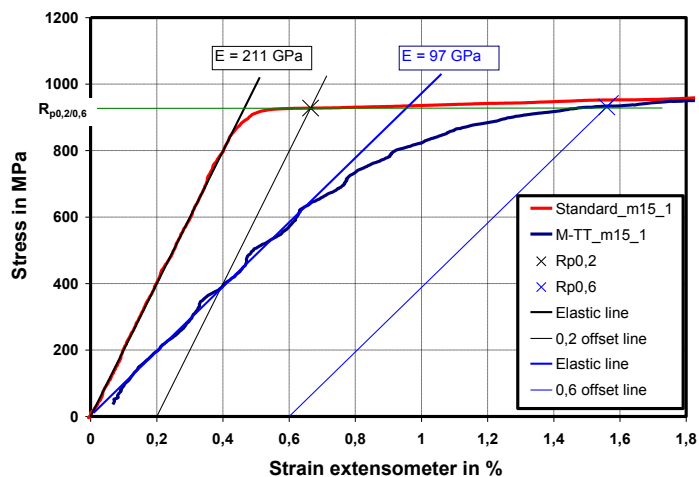
Získané záznamy z těchto zkoušek jsou na **Obr. 4** spolu se záznamy ze standardních tahových testů. Získané záznamy z M-TT tedy již není třeba korelovat pomocí empirických vztahů, mají stejný průběh jako standardní tahové testy a lze z nich vyhodnotit všechny standardní tahové charakteristiky:  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ,  $A_g$ ,  $A$  a  $Z$ . Zároveň požadavek na 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. Ukázka počátečního rozdílu v záznamu s vyhodnocením meze kluzu je vyobrazena na **Obr. 5**. Na tomto obrázku je zároveň ukázáno, že pro získání stejné meze kluzu u M-TT jako v případě standardní zkoušky je nutné posunout rovnoběžku (offset line) s počáteční přímkovou částí (elastic line) o 0,6 % poměrné deformace (místo o obvyklých 0,2%).

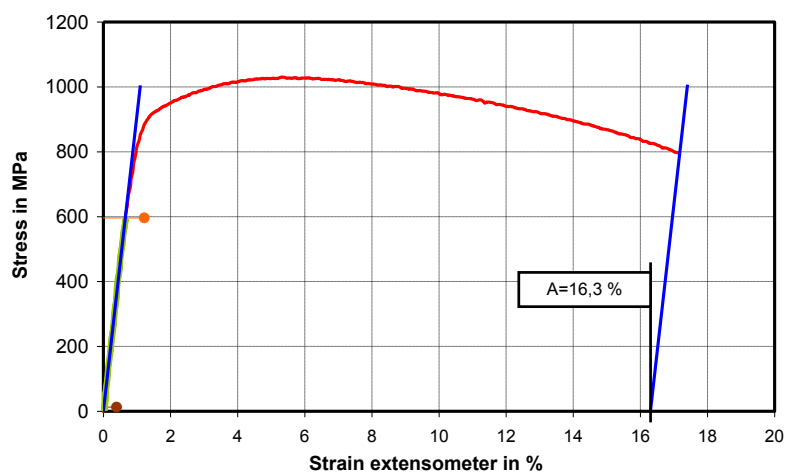
Vyhodnocení tažnosti je možné provést na základě vyhodnocení přímo z grafu (viz **Obr. 6**) nebo měření na stereomikroskopu s digitálním zpracováním záznamu (viz **Obr. 7**). Oba přístupy vedou k téměř stejným výsledkům. Vyhodnocení kontrakce je prováděno na základě měření nejužších míst po zkoušce, viz **Obr. 7**. Výsledky měření jsou shrnuty v **Tab. 1** a porovnání M-TT se standardní tahovou zkouškou včetně výpočtu relativní chyby (error) v **Tab. 2**. Pevnostní hodnoty byly vyhodnoceny s relativní chybou do 5%, tažnost do 10% a kontrakce do 15%.



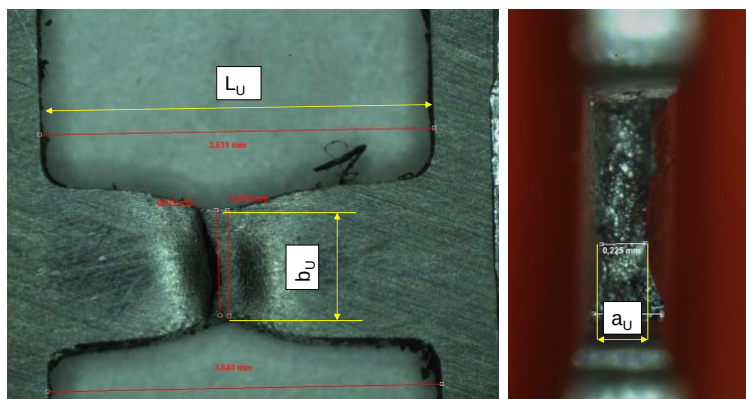
**Obr. 4** Záznamy M-TT spolu se záznamy standardní zkoušky tahem pro materiály m08, m15-m18. [5]



Obr. 5 Záznamy M-TT\_m15\_1 a standardního tahového testu m15\_1, ukázka vyhodnocení meze kluzu [5]



Obr. 6 Příklad vyhodnocení tažnosti ze záznamu M-TT\_m15\_1 [5]



Obr. 7 Příklad vyhodnocení tažnosti a kontrakce na stereomikroskopu [5]

Tab. 1 Výsledky měření M-TT [5]

| Vzorek        | a <sub>0</sub><br>[mm] | b <sub>0</sub><br>[mm] | a <sub>u</sub><br>[mm] | b <sub>u</sub><br>[mm] | S <sub>0</sub><br>[mm <sup>2</sup> ] | S <sub>u</sub><br>[mm <sup>2</sup> ] | R <sub>p0,6</sub><br>[MPa] | R <sub>m</sub><br>[MPa] | A <sub>g</sub><br>[%] | A <sub>3</sub><br>[%] | Z<br>[%]    |
|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| M-TT m08 1    | 0,48                   | 1,39                   | 0,18                   | 1,06                   | 0,67                                 | 0,19                                 | 1074,0                     | 1257,0                  | 3,4                   | 14,5                  | 71,4        |
| M-TT m08 2    | 0,47                   | 1,41                   | 0,25                   | 0,97                   | 0,66                                 | 0,24                                 | 1124,0                     | 1234,0                  | 2,7                   | 13,7                  | 63,8        |
| <b>průměr</b> | <b>0,48</b>            | <b>1,40</b>            | <b>0,21</b>            | <b>1,02</b>            | <b>0,66</b>                          | <b>0,22</b>                          | <b>1099,0</b>              | <b>1245,5</b>           | <b>3,0</b>            | <b>14,1</b>           | <b>67,6</b> |
| M-TT m15 1    | 0,49                   | 1,50                   | 0,24                   | 1,10                   | 0,73                                 | 0,26                                 | 926,6                      | 1030,6                  | 4,2                   | 16,3                  | 64,3        |
| M-TT m15 2    | 0,47                   | 1,52                   | 0,23                   | 1,15                   | 0,72                                 | 0,26                                 | 931,4                      | 1026,0                  | 4,2                   | 15,1                  | 63,8        |
| <b>průměr</b> | <b>0,48</b>            | <b>1,51</b>            | <b>0,23</b>            | <b>1,12</b>            | <b>0,73</b>                          | <b>0,26</b>                          | <b>929,0</b>               | <b>1028,3</b>           | <b>4,2</b>            | <b>15,7</b>           | <b>64,1</b> |
| M-TT m16 1    | 0,50                   | 1,53                   | 0,21                   | 1,12                   | 0,77                                 | 0,23                                 | 706,9                      | 850,0                   | 7,5                   | 21,9                  | 69,4        |
| M-TT m16 2    | 0,47                   | 1,58                   | 0,21                   | 1,07                   | 0,74                                 | 0,23                                 | 714,3                      | 852,0                   | 8,0                   | 22,8                  | 69,1        |
| <b>průměr</b> | <b>0,48</b>            | <b>1,55</b>            | <b>0,21</b>            | <b>1,10</b>            | <b>0,75</b>                          | <b>0,23</b>                          | <b>710,6</b>               | <b>851,0</b>            | <b>7,8</b>            | <b>22,4</b>           | <b>69,3</b> |
| M-TT m17 1    | 0,51                   | 1,45                   | 0,26                   | 0,99                   | 0,74                                 | 0,26                                 | 510,8                      | 665,9                   | 11,8                  | 22,6                  | 64,6        |
| M-TT m17 2    | 0,51                   | 1,47                   | 0,20                   | 0,97                   | 0,74                                 | 0,20                                 | 525,1                      | 676,8                   | 11,5                  | 26,1                  | 73,3        |
| <b>průměr</b> | <b>0,51</b>            | <b>1,46</b>            | <b>0,23</b>            | <b>0,98</b>            | <b>0,74</b>                          | <b>0,23</b>                          | <b>518,0</b>               | <b>671,3</b>            | <b>11,6</b>           | <b>24,4</b>           | <b>68,9</b> |
| M-TT m18 1    | 0,50                   | 1,36                   | 0,39                   | 1,03                   | 0,68                                 | 0,40                                 | 1298,5                     | 1358,6                  | 2,9                   | 13,3                  | 41,5        |
| M-TT m18 2    | 0,50                   | 1,54                   | 0,38                   | 1,16                   | 0,77                                 | 0,44                                 | 1286,1                     | 1391,5                  | 3,4                   | 12,1                  | 43,0        |
| <b>průměr</b> | <b>0,50</b>            | <b>1,45</b>            | <b>0,38</b>            | <b>1,10</b>            | <b>0,73</b>                          | <b>0,42</b>                          | <b>1292,3</b>              | <b>1375,0</b>           | <b>3,2</b>            | <b>12,7</b>           | <b>42,3</b> |

Tab. 2 Porovnání výsledků měření M-TT a standardní zkoušky tahem [5]

| Materiál | R <sub>p0,2/0,6</sub><br>[MPa] |        | R <sub>m</sub><br>[MPa] |        | A <sub>g</sub><br>[%] |      | A<br>[%] |      | Z<br>[%] |      | error                    |                       |                       |          |          |
|----------|--------------------------------|--------|-------------------------|--------|-----------------------|------|----------|------|----------|------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|----------|
|          | Stand.                         | M-TT   | Stand.                  | M-TT   | Stand.                | M-TT | Stand.   | M-TT | Stand.   | M-TT | R <sub>p0,2</sub><br>[%] | R <sub>m</sub><br>[%] | A <sub>g</sub><br>[%] | A<br>[%] | Z<br>[%] |
| m08      | 1145,5                         | 1099,0 | 1252,1                  | 1245,5 | 2,5                   | 3,0  | 14,3     | 14,1 | 67,6     | 70,2 | 4,1                      | 0,5                   | 19,6                  | 1,7      | 3,8      |
| m15      | 932,0                          | 929,0  | 1034,2                  | 1028,3 | 5,4                   | 4,2  | 15,6     | 15,7 | 64,1     | 55,8 | 0,3                      | 0,6                   | 22,3                  | 0,7      | 13,0     |
| m16      | 726,8                          | 710,6  | 844,7                   | 851,0  | 10,0                  | 7,8  | 20,5     | 22,4 | 69,3     | 61,7 | 2,2                      | 0,8                   | 22,6                  | 8,8      | 10,9     |
| m17      | 528,4                          | 518,0  | 688,3                   | 671,3  | 13,7                  | 11,6 | 24,8     | 24,4 | 68,9     | 63,1 | 2,0                      | 2,5                   | 15,1                  | 1,8      | 8,4      |
| m18      | 1291,9                         | 1292,3 | 1373,9                  | 1375,0 | 3,8                   | 3,2  | 13,9     | 12,7 | 42,3     | 45,6 | 0,0                      | 0,1                   | 16,6                  | 8,8      | 7,9      |

## 7.5 Měření deformací pomocí optických metod

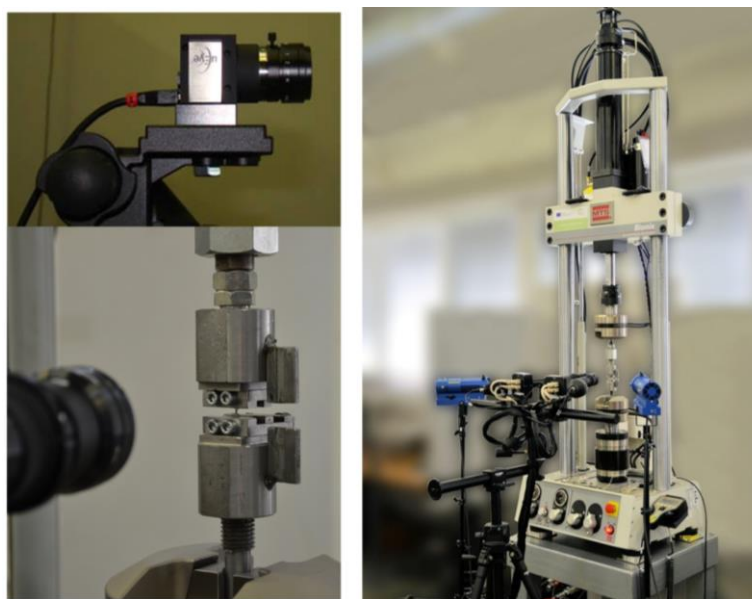
Velkou slabinou navržené zkoušky M-TT bylo měření deformace pomocí mechanického extenzometru, který umožňoval měření deformace během zkoušky jen nepřímou, a projevovalo se velké zkreslení zejména na začátku zkoušky. Pro přesnější měření deformací bylo navrženo měřit deformaci opticky. V podmínkách laboratoře bylo možno provést tato měření buď videoextenzometrem, **Obr.8**, nebo pomocí optického systému ARAMIS (viz **Obr. 9**).

Následně 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 nanášen 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 [4].

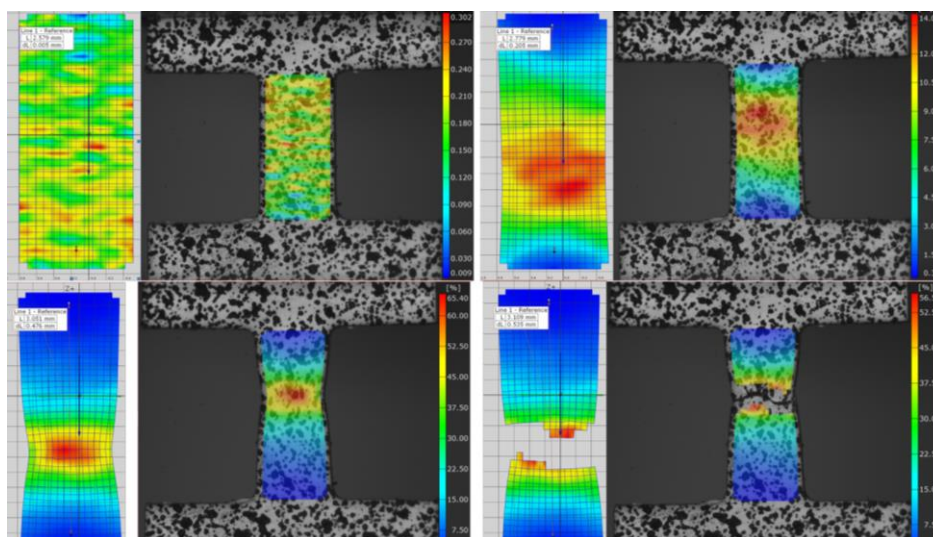
Pro snímání M-TT je použito 2D snímání a ARAMIS v tomto případě plní jen funkci videoextenzometru, kdy se měří vzdálenost dvou bodů na tělíčku tělesa, obvykle od sebe

vzdálených 2,6 mm. Příklad měření M-TT v systému ARAMIS je zobrazen na **Obr. 8**, na kterém je zároveň možné pozorovat rozložení lokálních deformací během zkoušky.

Pro vyhodnocení srovnatelnosti výsledků mezi M-TT a měřeními na vzorcích standardních rozměrů byla provedena maření pro oceli (LCS-nízko uhlíková ocel, Steel – středně uhlíková ocel, ocel P91 a ocel COST F), titan, hliník a měď. Záznamy z těchto zkoušek jsou znázorněny na Obr. 10. Ze záznamů je patrná shoda mezi záznamy naměřenými na miniaturních tělesech a tělesech standardních rozměrů. Tento výsledek potvrzuje aplikovatelnost navržené metodiky M-TT pro měření široké škály materiálu při zachování plné srovnatelnosti výsledků se standardními tělesy.

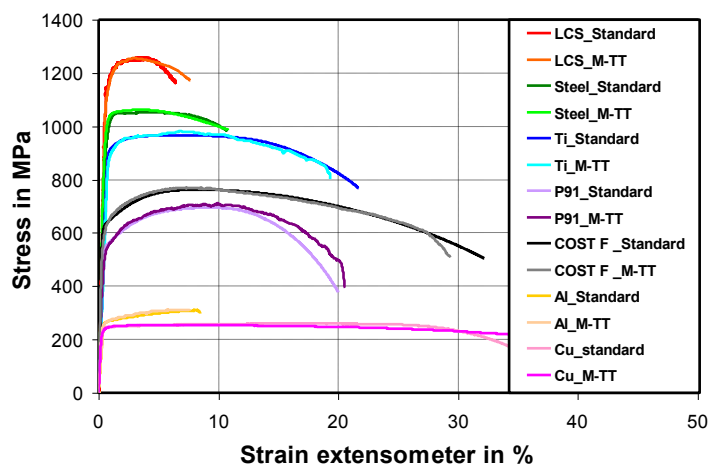


**Obr. 8** Videoextenzometr (vlevo nahoře) a ARAMIS pro měření deformací M-TT



**Obr. 9** Měření deformací vzorků pomocí DIC ARAMIS





**Obr. 10 Porovnání záznamů ze standardní zkoušky tahem a M-TT měřené ARAMISem**

## 7.6 Závěr

V předloženém článku je demonstrována metoda měření tahových vlastností na miniaturních vzorcích Micro Tensile Test (M-TT) pro využití při charakterizování objemových nanomateriálů. Tato metoda byla vyvinuta pro vyhodnocení tahových charakteristik pro případy, kdy je k dispozici omezené množství experimentálního materiálu. Jsou doporučeny způsoby měření a vyhodnocení základních charakteristik v tahu. Na závěr je demonstrován aplikační potenciál metody na široké škále kovových materiálů s širokým rozsahem vlastností a souhlas výsledků mezi miniaturními zkušebními tělesy a standardními vzorky. Získané křivky pro jednotlivé materiály jsou téměř identické při porovnání těles různých velikostí, potvrzující aplikovatelnost vyvinuté zkušební metodiky.

## 7.7 Literatura

- [1] CEN Workshop Agreement, Small Punch Test Method for Metallic Materials, CWA 15627:2007, December 2007
- [2] Procházka, R., Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů pomocí miniaturních zkušebních vzorků, Diplomová práce, ZČU Plzeň, 2013
- [3] ČSN EN ISO 6892-1: Kovové materiály – zkoušením tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty, únor 2010
- [4] GOM: ARAMIS System. [[online], [cit. 2013-08-28] <http://www.gom.com/3d-software/aramis-software.html>
- [5] Konopík P.: KOMPATIBILITA VÝSLEDKŮ HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ, disertační práce, KMM, ZČU Plzeň, 2014.

## 8. AKTIVITY VÝZKUMNÉ ORGANIZACE COMTES FHT A.S. V OBLASTI NANOMATERIÁLŮ

**Activities of COMTES FHT a.s. research organisation in the field of nanomaterials**

Libor KRAUS<sup>a</sup>

<sup>a</sup> COMTES FHT, Průmyslová 995, 334 41 Dobruška, ČR, E – libor.kraus@comtesfht.cz

## Abstrakt

Prezentace mapuje cestu od vzniku podnikatelského nápadu na založení výzkumné organizace poskytující služby ve výzkumu a vývoji kovových materiálů a jejich zpracování až po dnešní stav stabilního výzkumného ústavu na úrovni německých Fraunhoferových institutů. Součástí prezentace jsou důvody založení, postupné rozšiřování kapacit, podnikatelský záměr a strategie rozvoje, možnosti dnešního podnikání ve výzkumu vývoji a inovacích, struktura zaměstnanců a jejich vzdělání – zaměstnanecká politika. Závěrem je popsána spolupráce s výrobními firmami a výzkumnými institucemi, příležitosti v dnešní globalizované ekonomice pro absolventy vysokých škol.

## Klíčová slova

Projekty, laboratoře.

## Abstract

The presentation maps the path from the idea of business based on research organization establishment providing services in research and development of metallic materials and their treatment to the current state of a stable research institute at the level of German Fraunhofer Institutes. The presentation includes reasons for establishing, its capacity expansion, business plan and strategy development, current business opportunities in the research, development and innovations, the structure of staff and their education - employment policy. Finally, collaboration with industrial companies and research institutions, opportunities in today's globalized economy for graduates are described.

## Keywords

Projects, laboratories

### 8.1 ÚVOD

COMTES se trochu liší od ostatních výzkumných organizací tím, že za prvé vznikl na „zelené louce“ a nemá za sebou žádný silný výrobní podnik ani univerzitu. Tím byly částečně sníženy naše možnosti při rozvoji, na druhou stranu nejsme omezováni v zaměření výzkumných projektů a řídíme se hlavně požadavky zákazníků a možnostmi uplatnění našich výsledků na trhu. Pro spolumajitele naší výzkumné organizace je její rozvoj a dnešní stav splněním „amerického snu“ v podnikání v oblasti výzkumu, vývoje a inovací.

### 8.2 Historie

COMTES FHT s.r.o. byl založen zápisem do Obchodního rejstříku 1. 12. 2000. Činnost byla zahájena 1. 1. 2001 se 7mi pracovníky, bývalými zaměstnanci společnosti ŠKODA VÝZKUM s.r.o. (Výzkumný a zkušební ústav ŠKODA HOLDING a.s.) a Západočeské Univerzity v Plzni.



Prvním impulsem k založení společnosti byla nespokojenost několika zaměstnanců ŠKODA VÝZKUM se zaměřením společnosti, které se čím dál, tím více odchylovalo od výzkumu a vývoje směrem ke zkušebnictví. Naše návrhy na zlepšení činností ve VaV směrem ke koncovým zákazníkům nebyly vyslyšeny, naopak přišla další omezení. Rozhodli jsme se tedy, že naše nápady zkusíme převést do podnikatelské praxe sami. Po absolvování konzultací v oblasti legislativy a účetnictví – na business jsme byli zvyklí – jsme provedli notářský zápis a právní a účetní úkony k založení společnosti. Hlavním záměrem již od založení společnosti bylo poskytování vysoce odborných služeb ve výzkumu a vývoji. Největším problémem pro firmu bez historie byly samozřejmě zdroje. Díky předchozí praxi jsme byli schopni sepsat jasný a proveditelný podnikatelský záměr, na základě kterého jsme přesvědčili jednu leasingovou společnost o naší perspektivě a financovala nám nákup počítačové sítě a softwarového vybavení. Toto byly na první tři roky jediné cizí zdroje do rozvoje. Prvním sídlem COMTESu byly pronajaté kanceláře v Borské ulici v Plzni, kde byly postupně zřízeny laboratoře numerické simulace a světelné mikroskopie.



**Obr. 1 Kanceláře v Borské ulici**

V roce 2004 přišel první významný mezník v historii společnosti. Od počátku roku bylo zahájeno řešení Výzkumného záměru podporovaného MŠMT ČR. Pro získání tohoto výzkumného projektu bylo nutné závažné rozhodnutí o neziskovosti organizace. Protože naším záměrem bylo od počátku vybudování výzkumné organizace s laboratorním zázemím, veškerý vytvořený zisk se vracel do společnosti pro podporu nových investic. Rozhodnutí o zachování tohoto stavu tedy pro nás nebylo těžké. Řešení si vyžádalo zvýšení počtu zaměstnanců, rozšíření kanceláří a laboratoří. Proto byl v polovině roku 2004 zakoupen vlastní areál v Lobežské ulici v Plzni. V novém areálu byly postupně vybudovány laboratoře tváření, tepelného zpracování, elektronové mikroskopie a zámečnická dílna pro výrobu vzorků.



**Obr. 2 Areál v Lobežské ulici**

Již koncem roku bylo 2006 jasné, že stávající výzkumný areál kapacitně nedostačuje a je nutné soustředění společnosti do jedné lokality. Opět jsme stáli před závažným rozhodnutím, zda a kde postavit nové sídlo. Když už jsme byli prakticky rozhodnuti, objevila se možnost koupě téměř nového areálu v Dobřanech, po krachující firmě na výrobu knoflíků. V polovině roku 2007 tedy COMTES s pomocí projektu v programu OPPI POTENCIÁL zakoupil v Dobřanech nový areál, který byl uveden do provozu v lednu 2008.



**Obr. 3 Areál v Dobřanech**

### **8.3 Současnost**

V roce 2008 byl rozvoj společnosti završen transformací na akciovou společnost a výzkumnou organizaci podle pravidel Rámce společenství EU. (Pravidly pro neziskové výzkumné organizace se však COMTES řídil již od svého vzniku).

Areál v Dobřanech umožnil v posledních čtyřech letech výrazné navýšení nových investic a rozšíření portfolia činností COMTESu. Po již téměř dvanácti letech činnosti je výzkumná organizace technicky a personálně vybavena pro výzkumně vývojové služby v oblastech kovových materiálů.

COMTES dnes zaměstnává 64 zaměstnanců, převážně výzkumných pracovníků a zajišťuje kompletní aktivity:

- v oboru tváření kovů (od návrhu materiálu výkovku přes měření materiálových vlastností, přes návrh a numerickou simulaci technologie tváření, návrh náradí a nástrojů a stanovení tepelného zpracování výkovku až po výrobu prototypu)
- v oblasti materiálového inženýrství kovových materiálů a technologií jejich zpracování (oceli, Ni slitiny, Al slitiny, slitiny Cu a Ti, a další...)
- v oblasti výzkumu a vývoje nových materiálů a jejich analýzy (mechanické vlastnosti, metalografické analýzy, fyzikální vlastnosti, technologické zkoušky)
- řešením inovačních i investičních projektů. Je řešitelem nebo spoluřešitelem 30 úspěšně ukončených a 25 probíhajících inovačních a výzkumných projektů v programech národních i mezinárodních.

Za dobu své činnosti si COMTES již získal stabilní postavení na výzkumném poli v ČR i v Evropě. Důkazem je např. exkluzivní smlouva o výzkumu a vývoji materiálů a technologií v oblasti výroby trub s firmou Benteler Steel Tube GmbH od roku 2006 nebo další rámcové

smlouvy o výzkumu a vývoji s firmami PILSEN STEEL s.r.o., PEWAG AG (Rakousko). Spolupracujeme s firmami a výzkumnými organizacemi po celém světě.

COMTES je členem amerických společností TMS International, ASM International, SAMPE, České společnosti pro nové materiály a technologie, Asociace výzkumných organizací, České technologické platformy Strojírenství a řady dalších profesních oborových a odborných sdružení a asociací.

Protože poskytování kvalitních služeb ve výzkumu a vývoji je velmi náročné i na kvalitní lidské zdroje, má COMTES uzavřeny smlouvy o spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni, Vysokou školou báňskou – Technickou univerzitou v Ostravě, TU Košice a s MISA Moskva. Studenti z těchto univerzit absolvují v COMTESu studijní pobyty a stáže, popř. zpracovávají zadaná témata v rámci svých absolventských a vědeckých prací. Kvalitní studenty se zájmem o obor a vlastní profesní rozvoj zaměstnáváme na dílčích pracích i při řešení výzkumných úkolů během jejich studia s perspektivou následného zaměstnání v COMTESu.

V poslední době se COMTES zaměřuje na výzkum a vývoj kovových materiálů s nanostrukturou. Podařilo se nám získat následující výzkumné projekty:

- GA106/02/1521 Ultrajemné struktury v kovových materiálech (2002-2004)
- MSM2631691901 Výzkum a vývoj ultrajemných materiálů připravených technologiemi velkých deformací (2004 – 2010)
- 2A-1TP1/061 Výzkum a vývoj simulace procesů tváření a tepelného zpracování (2006-2008)
- EA 4.2PT01/007 Výzkumný ústav tvářecích technologií (2007-2010)
- FR-TI1/415 Výzkum a vývoj nanostrukturních materiálů pro medicínské účely (2009-2012)
- ED2.1.00/03.0077 Západočeské materiálově metalurgické centrum (2011-2014)

V těchto projektech jsou řešeny jak vlastnosti nových materiálů, jejich speciální vlastnosti i výzkum a vývoj technologií jejich výroby a zpracování.

## 9. MOŽNOSTI SPOLEČNÝCH PROJEKTŮ V OBLASTI NANO

### Possibilities of common projects in the field of nano

Libor KRAUS<sup>a</sup>

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

#### Abstrakt

V následující prezentaci jsou zmapovány možnosti získání dotačních příspěvků na řešení vědeckovýzkumných projektů v oblasti nanomateriálů, jejich získávání, technologií výroby a

využití. Součástí prezentace jsou i zkušenosti společnosti COMTES FHT s přípravou a podáváním přihlášek projektů do různých národních i mezinárodních programů podpory.

### **Klíčová slova**

Nanomateriály, výzkumné projekty, programy podpory.

### **Abstract**

The following presentation maps possibilities of getting grants for investigation of research projects in the field of nanomaterials, their gaining, production technology and use. Part of the presentation includes experience of COMTES FHT company with the preparing and applying for projects in various national and international grant programmes

### **Keywords**

Nanomaterials, R and D projects, grant programmes.

## **9.1 ÚVOD**

COMTES FHT byl v roce 2008 transformován na akciovou společnost a výzkumnou organizaci podle pravidel Rámce společenství EU. (Pravidly pro neziskové výzkumné organizace se však COMTES řídil již od svého vzniku).

Areál v Dobřanech u Plzně umožnil v posledních čtyřech letech výrazné navýšení nových investic a rozšíření portfolia činností COMTESu. Po již téměř dvanácti letech činnosti je výzkumná organizace technicky a personálně vybavena pro výzkumné vývojové služby v oblastech kovových materiálů. V průběhu své existence COMTES řešil nebo řeší celou řadu inovačních a vědecko – výzkumných projektů podporovaných z veřejných prostředků nebo jako přímé zakázky smluvního výzkumu pro koncové zákazníky. Celkem do současnosti byl COMTES řešitelem nebo spoluřešitelem 30 úspěšně ukončených a 25 probíhajících inovačních a výzkumných projektů v programech národních i mezinárodních.



**Obr. 1 Areál**

**v Dobřanech**

## 9.2 VÝZKUMNÉ PROJEKTY

V následujícím přehledu je rozepsáno, jaké typy projektů COMTES dokázal získat z veřejných zdrojů. Bohužel řada smluv s koncovými zákazníky neumožňuje podávat informace o projektech financovaných přímo koncovými zákazníky, ale lze říci, že byly neméně zajímavé a jejich přínosy se projeví v nejrůznějších oborech činnosti od strojírenství přes stavebnictví, dopravu, energetiku až po zdravotnictví a zdravotní techniku nebo např. armádní zakázky a přímé vojenské uplatnění.

Získané projekty rozdělené podle poskytovatelů a popsané typy programů:

běžící – neuzavřený projekt, ještě probíhá řešení

ukončený – projekt již skončený závěrečným oponentním řízením

(v závorce názvy programů jednotlivých poskytovatelů)

### GAČR

6 STANDARD – ukončených

1 STANDARD - běžící

### MPO

17 – ukončené (Trvalá prosperita, Tandem, Impuls, TIP, Konsorcia)

3 - OPPI (Potenciál, Inovace) - ukončené

10 TIP – běžící

### TAČR

5 ALFA – běžící

### MŠMT

4 EUREKA – ukončené

1 výzkumná centra – ukončený

1 EUROSTARS – ukončený

1 výzkumný záměr - ukončený

1 VaVpl – běžící

2 EUREKA - běžící

### Evropská unie

3 projekty rámcových programů - ukončené

1 RFCS – běžící

### Programy podpory výzkumu nanomateriálů a nanotechnologií

GAČR

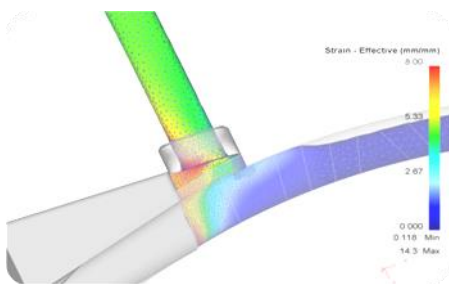
- TAČR – Alfa
- MŠMT – EUREKA, EUROSTARS, COST, EUPRO, KONTAKT (dvojstranné spolupráce)
- Strukturální fondy – MNT ERA Net (POTENCIÁL), Inovace, VaVpl,
- RFCS – pouze oceli
- Rámcové programy (7., Horizont)
- Částečně speciální programy – Norské fondy, Gesher, Nato – civilní výzkum

Při prezentaci rozebereme jednotlivé poskytovatele a typy podporovaných aktivit a programů z hlediska náročnosti podávání žádostí o podporu, administrativní náročnost zpracování žádosti a hlavně poskytování monitorovacích zpráv, složitosti vedení projektu, náležitosti jednotlivých programů, zda je nutné a vhodné podávat projekt samostatně, s partnery, v konsorciu partnerů. Dále kde je vhodnější podávat projekt jako navrhovatel a koordinátor řešení, kde je vhodnější jako přístupující partner v konsorciu řešitelů. V prezentaci budeme hovořit i o úspěšnosti projektových žádostí do určitých programů podpory, kde je větší procentní šance na přijetí žádosti, kde naopak je podáváno větší množství žádostí a projektová úspěšnost je procentně velmi malá. Dále rozebereme vhodnost programů pro základní výzkum a aplikovaný výzkum, většinou s nutností koncového uživatele výsledků řešení.

Abych pouze nerozebíral šedivou teorii, mohu doložit zkušenosti COMTESu na konkrétních příkladech v oblasti nanomateriálů, kde se podařilo získat v průběhu posledních 10 let následující výzkumné projekty:

- [GA106/02/1521](#) Ultrajemné struktury v kovových materiálech (2002-2004)
- [MSM2631691901](#) Výzkum a vývoj ultrajemných materiálů připravených technologiemi velkých deformací (2004 – 2010)
- [2A-1TP1/061](#) Výzkum a vývoj simulace procesů tváření a tepelného zpracování (2006-2008)
- [EA 4.2PT01/007](#) Výzkumný ústav tvářecích technologií (2007-2010)
- [FR-TI1/415](#) Výzkum a vývoj nanostrukturních materiálů pro medicínské účely (2009-2012)
- [ED2.1.00/03.0077](#) Západočeské materiálově metalurgické centrum (2011-2014)

V těchto projektech jsou řešeny jak vlastnosti nových materiálů, jejich speciální vlastnosti i výzkum a vývoj technologií jejich výroby a zpracování. Projekty jsou zaměřeny na kovové materiály počínaje ocelmi, přes Al slitiny, Cu slitiny až po slitiny Ti nebo Ni superslitiny.



**Obr. 2 Výroba polotovarů pomocí metody SPD (Severe Plastic Deformation)**



**Obr. 3 Výzkum a vývoj nanostrukturních materiálů**

### 9.3 SPOLUPRÁCE

COMTES má uzavřeny smlouvy o spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni, Vysokou školou báňskou – Technickou univerzitou v Ostravě, TU Košice a s MISA Moskva. Studenti z těchto univerzit absolvují v COMTESu studijní pobyty a stáže, popř. zpracovávají zadaná témata v rámci svých absolventských a vědeckých prací. Kvalitní studenty se zájmem o obor a vlastní profesní rozvoj zaměstnáváme na dílčích pracích i při řešení výzkumných úkolů během jejich studia s perspektivou následného zaměstnání v COMTESu.

V následujících letech COMTES předpokládá uplatnění výsledků výzkumu a vývoje v oblasti nanomateriálů a technologií jejich výroby a následného zpracování na trhu a možnost založení start-up firmy, která tyto výsledky bude uplatňovat a uvádět na trh.

### Poděkování

Tyto příspěvky byly vytvořeny 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.