

*G01N 3/20* (2006.01)  
*G01N 23/04* (2018.01)  
*G01N 23/046* (2018.01)

(19)  
 ČESKÁ  
 REPUBLIKA



ÚŘAD  
 PRŮMYSLOVÉHO  
 VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2018-28**  
 (22) Přihlášeno: **18.01.2018**  
 (40) Zveřejněno: **31.07.2019**  
**(Věstník č. 31/2019)**  
 (47) Uděleno: **19.06.2019**  
 (24) Oznámení o udělení ve věstníku: **31.07.2019**  
**(Věstník č. 31/2019)**

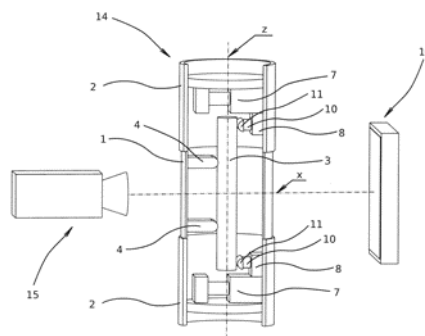
(56) Relevantní dokumenty:  
 RIESCH, J., a kol. Crack bridging in as-fabricated and embrittled tungsten single fibre-reinforced tungsten composites shown by a novel in-situ high energy synchrotron tomography bending test. Nuclear Materials and Energy, 2018, 15, 1-12, ISSN:2352-1791. DE 102010033923 A1; CN 206192772 U; CN 101706396 A.

(73) Majitel patentu:  
 Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR,  
 v.v.i., Praha 9, Prosek, CZ

(72) Původce:  
 Ing. Tomáš Fíla, Zadní Třebaň, CZ  
 prof. Ing. Miloš Drdáký, Dr.Sc., dr.h.c., Telč, CZ  
 Ing. Daniel Kytýř, Ph.D., Nymburk, CZ  
 Ing. Daniel Vavřík, Ph.D., Praha 8, CZ

(54) Název vynálezu:  
**Zařízení pro mechanické zkoušky čtyřbodovým ohybem během rentgenového zobrazování, zejména 4D výpočetní tomografií**

(57) Anotace:  
 Zařízení (14) pro mechanické zkoušky čtyřbodovým ohybem během rentgenového zobrazování, zejména 4D výpočtovou tomografií, zahrnující rám tvořený prostřední částí (1), dvojicí vnitřních podpor (4) vzorku (3) a dvojicí polohovacích prostředků (7), uspořádanou v krajních částech (2) rámu, pro pohyb dvojice zatěžovacích jednotek (8) s integrovanými vnějšími podporami (11) vzorku (3), přičemž podélná osa vzorku (3) je totožná s podélnou osou (z) zařízení (14), jedna příčná osa vzorku (3) je totožná s příčnou osou zařízení (x) a vzorek (3) je v zařízení uspořádán symetricky podél příčné osy (x) na dvojici vnějších podpor (11) a dvojici vnitřních podpor (4), přičemž dvojice vnějších podpor (11) je vůči dvojici vnitřních podpor (4) pootočená o 180° kolem osy (z) a zatěžování vzorku (3) je uskutečňováno posuvem polohovacích prostředků (7). Tímto uspořádáním je při tomografii pomocí zdroje (15) rentgenového záření a detektoru (16) rentgenového záření dosaženo rovnoměrného útlumu rentgenového záření vzorkem (3), a je umožněno detailní zobrazení střední části vzorku (3) bez zkreslení, způsobeného promítnutím podpor na detektor (16) rentgenového záření, při současném dodržení výhodného poměru průřezových rozměrů vzorku vůči jeho délce pro testování ohybem.



## Zařízení pro mechanické zkoušky čtyřbodovým ohybem během rentgenového zobrazování, zejména 4D výpočetní tomografií

### 5 Oblast techniky

Vynález se týká zařízení pro mechanické zkoušky vzorků materiálů čtyřbodovým ohybem při současném sledování experimentu pomocí metod rentgenového zobrazování. Rentgenové zobrazování se využívá pro vyobrazování měřených objektů a pro tvorbu digitalizovaných modelů vnitřní struktury měřených objektů, zejména pomocí výpočetní tomografie. Speciální varianta výpočetní tomografie, tzv. 4D výpočtová tomografie, umožňuje pomocí série tomografických měření sledovat vývoj vnitřní struktury měřeného objektu v čase. Spojení speciálně konstruovaného zatěžovacího stroje a metody 4D výpočtové tomografie umožňuje sledovat vývoj vnitřní struktury materiálu při mechanické zkoušce (např. vývoj šíření trhliny ve vzorku v závislosti na rostoucím zatížení).

### Dosavadní stav techniky

V současné době je široce rozvíjena možnost spojení metod rentgenového zobrazování, zejména výpočtové tomografie (CT - computed tomography), a mechanického zkoušení materiálů pro sledování a pokročilou analýzu změn ve vnitřní struktuře vzorku v průběhu zatěžování. Kombinace těchto metod umožňuje provádět velmi pokročilou analýzu deformačního chování materiálů a slouží jak pro potřeby základního a aplikovaného výzkumu, tak i pro potřeby podrobných analýz materiálů v průmyslovém prostředí. Pro spojení mechanických zkoušek s metodami CT se široce uplatňuje metoda tzv. 4D výpočtové tomografie. Principem této metody je pořízení série tomografických měření, z nichž lze následně zrekonstruovat a analyzovat vývoj vnitřní struktury zkoumaného objektu v čase (pro potřeby tohoto textu vývoj vnitřní struktury v průběhu mechanické zkoušky). Na základě takto získaných dat lze provádět další analýzy zkoumaného objektu. Principy 4D výpočtové tomografie se uplatňují v medicínských, vědeckých i průmyslových aplikacích.

Spojení metod rentgenového zobrazování a mechanického zkoušení materiálů vyžaduje konstrukci speciálních zatěžovacích zařízení umožňujících nasazení přímo v CT skenerech popř. v ostatních zařízeních pro rentgenové zobrazování (metody tzv. in-situ testování). Požadavky na tato zařízení zahrnují zejména: malé celkové rozměry a nízká hmotnost zařízení pro umístění ve skeneru, prostor na umístění vzorku vyznačující se nízkým útlumem rentgenového záření, vysoká tuhost zařízení a přesnost zatěžovacích mechanismů. V současné době existuje několik typů zařízení pro provádění mechanických experimentů in-situ v tomografickém skeneru. Podstata funkce a technický popis těchto zařízení jsou uvedeny v literatuře dle referencí [1-12], a v patentech jako např.: CN 202101953, CN 104215526, CN 102323279, CN 104237266. Podobné principy lze identifikovat i u zařízení pro jiné testování in-situ, např. v elektronovém mikroskopu (SEM - scanning electron microscopy) dle patentu US 5606168. Uvedená zařízení umožňují testovat různými módy namáhání, nejčastěji tahem a tlakem. Uváděna jsou ale i zařízení pro testování tri-axiální zkouškou, krutem a se schopností zatěžovat třibodovým i čtyřbodovým ohybem.

In-situ testování ohybem v tomografu s sebou přináší významné komplikace a současná, zde uváděná, zařízení jsou schopna překonat tyto složitosti pouze částečně. Hlavní omezení spočívá v orientaci vzorku v zatěžovacím zařízení, která je nevhodná pro zkoumání výpočtovou tomografií. U výše uváděných zařízení schopných provádět mechanické zatěžování třibodovým nebo čtyřbodovým ohybem [5, 8, 9, 12] je podélná osa vzorku umístěna kolmo k ose rotace v tomografu (k ose otáčení rotačního stolku, popř. k ose otáčení zdroje a detektoru rentgenového záření). Toto uspořádání je pro tomografická měření nevhodné, protože útlum rentgenového záření vzorkem se v průběhu skenování významně mění. Během rotace při skenování dochází

k tomu, že rentgenové záření je v jednom extrémním případě tlumeno pouze průchodem přes průřezové rozměry vzorku a ve druhém extrémním případě průchodem přes celou délku vzorku. Zmíněné uspořádání způsobuje rozdíl v útlumu měřeného signálu, který je u delších vzorků příliš vysoký pro provedení kvalitní tomografické rekonstrukce. Toto uspořádání zatěžovacích zařízení navíc při prodlužování zkoumaných vzorků vyžaduje zvětšování průřezových rozměrů zatěžovacího zařízení, a tím snižování dosažitelného rozlišení tomografické rekonstrukce. Tyto faktory významně limitují použitelné rozměry vzorku. Vzhledem k faktu, že pro minimalizaci vlivu smykových sil ve vzorku při ohybu je zpravidla třeba volit délku vzorku významně vyšší než průřezové rozměry, umožňují výše uváděná řešení provádět in-situ měření pouze rozměrově velmi omezených vzorků, často nedosahující reprezentativního objemu zkoumaného materiálu. Další nevýhodou popisovaného uspořádání je skutečnost, že ve svazku rentgenového záření se nachází podpory vzorku, které kvůli rozbíhavému tvaru svazku zkreslují informaci o vnitřní struktuře v blízkosti podpor i v celém objemu vzorku. Uváděná řešení neumožňují se pomocí konvenčních zobrazovacích metod výpočtové tomografie zaměřit na střední část vzorku, ve které dochází k porušení materiálu ohybovým namáháním a která je z hlediska analýzy deformačního chování nejdůležitější.

Dokument DE 102010033923 A1 uvádí zařízení pro mechanické zatěžování vzorku během rentgenové výpočtové tomografie, kde v jednom provedení je zařízení uzpůsobeno pro provádění zkoušky čtyřbodovým ohybem. Zařízení je symetrické podle svislé osy, přičemž symetrický element, kterým kolmo na svislou osu prochází svazek záření, je vyroben z materiálu prostupného pro rentgenové záření. Elementem prochází rovnoběžně se svislou osou zkoumaný vzorek, který je uchycen mezi dvojjici vnitřních opor a o 180° otočenou dvojjici vnějších opor. Zásadní nevýhodou zařízení podle DE 102010033923 A1 je skutečnost, že zatěžování vzorku při ohybu je realizováno pouze v jednom místě, a to utahováním šroubů a z vnější strany zařízení. Zatěžování je prováděno diskretně v jednotlivých zatěžovacích krocích (otáčením šroubů 6a a 6b), přičemž jsou nabírány tomografie jednotlivých zatěžovacích stavů. Zatěžování je přitom nerovnoměrné. To znamená, že zařízení neumožňuje nepřerušovanou řadu skenů při kontinuálním zatěžování, ani polohování vnějších podpor. Zařízení proto není vhodné pro 4D výpočetní tomografii.

Zařízení dle vynálezu překonává svým řešením výše uvedené nedostatky pro in-situ testování ohybem v tomografickém skeneru. Umožňuje provádět spolehlivá měření čtyřbodovým ohybem při současném rentgenovém zobrazování zkoumaného objektu ve vysokém rozlišení. Zařízení je využitelné pro potřeby základního i aplikovaného výzkumu a pro pokročilé testování v průmyslových aplikacích.

[1] Bésuelle, P., Viggiani, G., Lenoir, N., Desrues, J., Bornert, M., X-ray Micro CT for Studying Strain Localization in Clay Rocks under Triaxial Compression, (2010) Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, pp. 35-53.

[2] Buffiere, J.-Y., Maire, E., Adrien, J., Masse, J.-P., Boiler, E., In situ experiments with X ray tomography: An attractive tool for experimental mechanics, (2010) Proceedings of the Society for Experimental Mechanics, Inc., 67, pp. 289-305.

[3] Hufenbach, W., Böhm, R., Gude, M., Berthel, M., Hornig, A., Ručevskis, S., Andrich, M., A test device for damage characterisation of composites based on in situ computed tomography, (2012) Composites Science and Technology, 72 (12), pp. 1361-1367.

[4] Brault, R., Germaneau, A., Dupré, J. C., Doumalin, P., Mistou, S., Fazzini, M., In-situ Analysis of Laminated Composite Materials by X-ray Micro-Computed Tomography and Digital Volume Correlation, (2013) Experimental Mechanics, 53 (7), pp. 1143-1151.

[5] Vavřík, D., Jandajsek, I., Fila, T., Veselý, V., Radiographic observation and semi-analytical reconstruction of fracture process zone in silicate composite specimen, (2013) Acta Technica

ČSAV, 58 (3), pp. 315-326.

- [6] Jang, A.T., Lin, J.D., Seo, Y., Etchin, S., Merkle, A., Fahey, K., Ho, S.P., In situ compressive loading and correlative noninvasive imaging of the bone-periodontal ligament-tooth fibrous joint, (2014) Journal of Visualized Experiments, (85), art. no. e51147
- [7] Singh, S.S., Williams, J.J., Hrubý, P. et al. In situ experimental techniques to study the mechanical behavior of materials using X-ray synchrotron tomography, Integrating Materials (2014) 3: 9.
- [8] Kumpova, I., Fila, T., Vavrik, D., Kersner, Z., X-ray dynamic observation of the evolution of the fracture process zone in a quasi-brittle specimen, (2015) Journal of Instrumentation, 10 (8), art. no. C08004.
- [9] Kumpova, I. et al., On-the-fly fast X-ray tomography inspection of the quasi-brittle material three point bending test, 2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD), Strasbourg, 2016, pp. 1-3.
- [10] Mazars, V., Caty, O., Couégnat, G., Bouterf, A., Roux, S., Denneulin, S., Pailhès, J., Vignoles, G. L., Damage investigation and modeling of 3D woven ceramic matrix composites from X-ray tomography in-situ tensile tests, (2017) Acta Materialia, 140, pp. 130-139.
- [11] Yang, Z., Ren, W., Sharma, R., McDonald, S., Mostafavi, M., Vertyagina, Y., Marrow, T. J., In-situ X-ray computed tomography characterisation of 3D fracture evolution and image-based numerical homogenisation of concrete, (2017) Cement and Concrete Composites, 75, pp. 74-83.
- [12] Vavro, L., Souček, K., Kytýř, D., Fila, T., Keršner, Z., Vavro, M., Visualization of the Evolution of the Fracture Process Zone in Sandstone by Transmission Computed Radiography, (2017) Procedia Engineering, 191, pp. 689-696.

### Podstata vynálezu

Zařízení pro mechanické zkoušky čtyřbodovým ohybem během rentgenového zobrazování, zejména 4D výpočtovou tomografií, zahrnuje rám zařízení tvořený ve své prostřední části materiálem vyznačujícím se nízkým útlumem rentgenového záření, dvojicí polohovacích prostředků, uspořádanou v krajních částech rámu, pro pohyb dvojice zatěžovacích jednotek s integrovanými vnějšími podporami vzorku (zatěžovací jednotky s vnějšími podporami čtyřbodového ohybu) a dvojicí pevných podpor vzorku umístěných v prostřední části rámu (vnitřní podpory čtyřbodového ohybu), případně v krajních částech rámu mezi vnějšími podporami a prostřední částí rámu, přičemž podélná osa zkoumaného vzorku je totožná s podélnou osou zatěžovacího zařízení. Zároveň je podélná osa zatěžovacího zařízení totožná s osou rotace tomografu. Osou rotace tomografu je označena osa rotace rotačního stolku tomografu, na němž je zatěžovací zařízení uspořádáno, popř. osa rotace zdroje a detektoru rentgenového záření, pokud zdroj a detektor rentgenového záření obíhají kolem stacionárně uspořádaného zatěžovacího zařízení. Vzorek je v zařízení umístěn symetricky vůči ose svazku rentgenového záření na dvojici vnitřních podpor a dvojici vnějších podpor, přičemž dvojice vnitřních podpor je vůči dvojici vnějších podpor pootočena o 180° kolem podélné osy zařízení.

50

Podstata vynálezu spočívá ve skutečnosti, že podélná osa zkoumaného vzorku je totožná s podélnou osou zatěžovacího zařízení. Zatěžovací zařízení je tvořeno rámem skládajícím se ze tří částí, jehož prostřední část je alespoň v místech označovaných rentgenovým svazkem realizována z materiálu vyznačujícím se nízkým útlumem rentgenového záření. V prostřední části rámu,

případně v krajních částech rámu mezi vnějšími podporami a prostřední částí rámu, je navzájem nezávisle uspořádána dvojice podpor sloužících jako vnitřní podpory pro mechanickou zkoušku čtyřbodovým ohybem. Podpory jsou uspořádány tak, že se v podélné ose nestýkají a je mezi nimi v podélném směru volný prostor pro průchod svazku rentgenového záření. V krajních částech rámu je separátně a navzájem nezávisle uspořádána dvojice polohovacích prostředků, z nichž každý polohovací prostředek je osazen zatěžovací jednotkou s integrovanou podporou. Polohovatelné zatěžovací jednotky tvoří vnější podpory pro mechanickou zkoušku čtyřbodovým ohybem a zároveň pomocí polohování zajišťují zatěžování vzorku během testu.

Výhody řešení spočívají v uspořádání dvojice polohovatelných zatěžovacích jednotek a dvojice pevných vnitřních podpor ve směru podélné osy zařízení dle schématu zatěžovací jednotka - vnitřní podpora - vnitřní podpora - zatěžovací jednotka, přičemž vnitřní podpory zařízení jsou umístěny v prostřední části rámu, případně v krajních částech rámu mezi vnějšími podporami a prostřední částí rámu, a jsou uspořádány tak, aby mezi nimi byl volný prostor pro průchod rentgenového svazku. Podélná osa vzorku materiálu je totožná s podélnou osou zatěžovacího zařízení. Toto uspořádání zajišťuje rovnoměrný útlum rentgenového záření vzorkem během rotace při tomografickém skenování. Dále toto uspořádání umožňuje do zatěžovacího stroje umístit vzorek s výhodným poměrem průřezových rozměrů a délky pro provádění relevantních ohybových mechanických zkoušek, a to i s ohledem na rozměry reprezentativního objemu zkoumaného materiálu. Zároveň toto uspořádání umožňuje navyšovat délku zkoumaného vzorku bez nutnosti zvětšování průřezových rozměrů zatěžovacího zařízení, které by bylo spojeno se snížením dosažitelného rozlišení tomografického zobrazení. Ve volném prostoru mezi vnitřními podporami je umístěna prostřední část vzorku, která je z hlediska analýzy deformačního chování a porušení při ohybu klíčová. Rentgenový svazek prochází prostřední částí rámu s nízkým útlumem rentgenového záření, střední částí zkoumaného vzorku a volným prostorem mezi podporami, kde není nijak ovlivněn.

V dalším výhodném provedení jsou krajní části rámu opatřeny mechanismem (např. vsuvným prstencem s tvarovým spojením s drážkou) pro ustavení polohovacích prostředků v podélné ose zařízení a pro jejich snadnou demontáž z rámu zařízení a opakovatelnou zpětnou montáž do rámu zařízení. Vsuvný prstenec tvoří pevnou referenci v rámu, do níž je vkládán polohovací prostředek se zatěžovací jednotkou. Toto uspořádání umožňuje snadnou manipulaci se vzorkem uvnitř rámu zařízení. Vnitřní podpory jsou opatřeny mechanismem pro jejich polohování v podélné i příčné ose zařízení (např. dvojicí kolmo uspořádaných tvarových spojení s drážkami) a vnější podpory jsou opatřeny mechanismem pro jejich polohování v podélné i příčné ose zařízení (např. dvojicí kolmo uspořádaných tvarových spojení s drážkami). Tato uspořádání slouží pro nastavování geometrie experimentu a lze je použít pro nastavení poměru délek mezi vnitřními a vnějšími podporami, přizpůsobit vnitřní uspořádání zařízení podélným i průřezovým rozměrům vzorku a přesně ustavit podélnou osu vzorku do podélné osy zařízení.

V dalším jiném výhodném provedení jsou prostřední část rámu a dvojice krajních částí rámu opatřeny spojovacími prvky pro montáž a demontáž prostřední části rámu, čímž lze prostřední část rámu ze zařízení vyjmout a nahradit ji jinou prostřední částí rámu s výhodněji zvolenými rozměry a parametry pro daný experiment. Vnější rozměry, materiál a tloušťku stěny prostřední části rámu lze optimalizovat pro daný experiment a vzorek, čímž může být dosaženo výhodných užitečných vlastností např. většího rozlišení rekonstruovaného tomografického obrazu, nižšího útlumu rentgenového svazku v prostřední části rámu, prodloužení celého rámu pro testování delších vzorků nebo zvýšení únosnosti a tuhosti prostřední části rámu.

V dalším jiném výhodném provedení jsou polohovací prostředky zatěžovacích jednotek motorizovány a zatěžovací jednotky opatřeny prostředky pro určení své polohy vůči pevným referencím polohovacích prostředků a vybaveny snímači pro měření sil, kterými působí na vzorek vnitřní podpory uspořádané na zatěžovacích jednotkách. Vybavení zatěžovacích jednotek motorizací se schopností číslicového řízení polohy polohovacího prostředku spolu s vybavením zatěžovací jednotky siloměrem umožňuje provádět plnohodnotné mechanické zkoušky

čtyřbodovým ohybem řízené silou nebo posuvem. Při vybavení zatěžovacího zařízení vhodným systémem řízení lze provádět i záznam měřených mechanických veličin a synchronizovat pohyby obou zatěžovacích jednotek.

- 5 V dalším jiném výhodném provedení jsou krajní části zařízení vybaveny mechanismem (např. tvarovým zámekem), na němž jsou uspořádány sběrací kroužky, do nichž jsou svedeny vodiče pro napájení polohovacích prostředků a snímačů mechanických veličin, čímž je umožněna kontinuální rotace zařízení při provádění série tomografických měření bez rizika namotání kabeláže na rám zařízení.

10

Výhodou zařízení pro mechanické zkoušky čtyřbodovým ohybem během rentgenového zobrazování, zejména 4D výpočtovou tomografií, oproti ostatním systémům je dosažení rovnoměrného útlumu rentgenového záření při tomografii vzorku, detailní zobrazení střední části vzorku (klíčové pro analýzu deformačního chování vzorku při ohybu) bez zkreslení způsobeného promítnutím podpor na detektor rentgenového záření, výhodný poměr průřezových rozměrů vzorku vůči jeho délce pro testování ohybem, větší rozměry vzorků při stejných půdorysných rozměrech zařízení, variabilita nastavení geometrie a větší rozlišení rekonstruovaných modelů s ohledem na velikost vzorku. Nevýhodou zařízení pro mechanické zkoušky čtyřbodovým ohybem během rentgenového zobrazování, zejména 4D výpočtovou tomografií, je vyšší složitost systému a náročnost technického řešení, pokud by bylo požadováno zobrazit celý vzorek včetně podpor čtyřbodového ohybu.

15

20

#### Objasnění výkresů

25

Obr. 1 - základní schéma vynálezu v řezu v pohledu z boku

Obr. 2 - základní schéma vynálezu v částečném řezu v axonometrickém pohledu

30

Obr. 3 - základní schéma pohybů pro ustavení vnitřní geometrie vynálezu v řezu v pohledu z boku

Obr. 4 - axonometrický pohled celé sestavy vynálezu v částečném řezu

35

40

Vynález bude blíže objasněn na výkresech, kde obr. 1 vyobrazuje schematický bokorysný pohled vynálezu v řezu s vyznačením základních částí vynálezu, vztažných geometrických os a principu funkce, obr. 2 vyobrazuje schematický pohled na vynález v axonometrickém pohledu v částečném řezu s vyznačením základních částí vynálezu a vztažných geometrických os, obr. 3 vyobrazuje schematický pohled vynálezu v řezu s vyznačením pohybů pro ustavení vnitřní geometrie vynálezu, obr. 4 vyobrazuje celou sestavu příkladu provedení vynálezu v částečném řezu a axonometrickém pohledu.

45

#### Příklady uskutečnění vynálezu

45

50

Rozumí se, že dále popsané a zobrazené konkrétní příklady uskutečnění vynálezu jsou představovány pro ilustraci, nikoli jako omezení příkladů uskutečnění vynálezu na uvedené případy. Odborníci znalí stavu techniky najdou nebo budou schopni zjistit za použití rutinního experimentování větší či menší počet ekvivalentů ke specifickým uskutečněním vynálezu, které jsou zde speciálně popsány. I tyto ekvivalenty budou zahrnuty v rozsahu následujících patentových nároků.

55

Principiální schematické znázornění zařízení dle vynálezu je vyobrazeno na obr. 1 a obr. 2. Na obr. 3 je znázorněno schéma zařízení dle vynálezu s vyznačením výhodných pohybů pro ustavení vnitřní geometrie vynálezu. V tomto textu uváděná výhodná řešení realizovaná na příkladu

uskutečnění vynálezu jsou znázorněna v rozšířeném axonometrickém pohledu vynálezu v částečném řezu na obr. 4.

5 Znázornění zatěžovacího zařízení 14 pro mechanické zkoušky čtyřbodovým ohybem během rentgenového zobrazování, zejména 4D výpočtovou tomografií, na obr. 1, obr. 2, obr. 3 a obr. 4 vyobrazuje osu z, která reprezentuje podélnou osu zatěžovacího zařízení 14 a zároveň osu rotace tomografu. Osou rotace tomografu je označena osa rotace na obrázcích nezobrazeného rotačního stolku, na němž je zatěžovací zařízení 14 uspořádáno, popř. osa rotace na obr. 2 vyobrazeného zdroje 15 rentgenového záření a detektoru 16 rentgenového záření, pokud zdroj a detektor 10 rentgenového záření obíhají kolem stacionárně uspořádaného zatěžovacího zařízení 14. Dále je na obrázcích znázorněna osa x reprezentující příčnou osu zatěžovacího zařízení 14 a definující rovinu zahrnující osu svazku rentgenového záření, která prochází prostřední částí 1 rámu zatěžovacího zařízení 14 a, v tomto zařízení umístěným, vzorkem 3, jehož podélná osa je uspořádána totožně jako osa z zatěžovacího zařízení, a jehož jedna příčná osa je uspořádána 15 totožně jako příčná osa x zatěžovacího zařízení.

Zařízení 14 dle vynálezu se sestává z nosného rámu tvořeného prostřední částí 1, která je alespoň v oblasti ozařované rentgenovým svazkem vyrobena z materiálu vyznačujícím se nízkým 20 útlumem rentgenového záření při zachování dostatečné tuhosti rámu (s výhodou např. kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny, pro nižší zatížení s výhodou polymethylmethakrylát - PMMA apod.). Rám zařízení 14 je dále tvořen dvojicí krajních částí 2 rámu, v nichž je pomocí dvou vsuvných prstenců 6 vybavených aretační drážkou pro směrově definované uložení pevně uspořádána dvojice polohovacích prostředků 7 pohybujících se ve směru osy x. Vsuvné prstence 25 6 jsou s výhodou vybaveny mechanismem (na obr. 4 tvarová spojení s drážkami fixovaná šrouby) pro ustavení ve směru osy z. Polohovací prostředky 7 jsou s výhodou tvořeny motorizovanými lineárními aktuátory. Na dvojici polohovacích prostředků 7 je uspořádána dvojice zatěžovacích jednotek 8, které jsou opatřeny vnějšími podporami 11 vzorku 3. S výhodou jsou zatěžovací jednotky 8 navíc opatřeny mechanismy 9 pro ustavení vnějších podpor vzorku ve směru os x a z (na obr. 4 tvarová spojení s drážkami fixovaná šrouby) a dále snímači 10 síly pro měření síly, 30 kterými působí zatěžovací jednotky 8 na vzorek 3. Zatěžovací jednotky 8 jsou s výhodou vybaveny snímači 12 polohy (na obr. 4 znázorněném v částečném řezu pouze pro jednu zatěžovací jednotku, druhá zatěžovací jednotka je snímačem vybavena ekvivalentně) vůči pevným referencím polohovacích prostředků 7. Krajní části 2 rámu jsou s výhodou opatřeny mechanismem 13 (na obr. 4 tvarovým zámkem) pro připojení na obrázcích nevyobrazené dvojice 35 sběracích kroužků. Do sběracích kroužků je svedena kabeláž polohovacích prostředků 7, snímačů 10 síly a snímačů 12 polohy, čímž sběrací kroužky umožňují kontinuální rotaci zatěžovacího zařízení 14 kolem podélné osy z bez rizika namotání kabeláže.

V prostřední části 1 rámu, případně v krajních částech 2 rámu mezi vnějšími podporami 11 a 40 prostřední částí 1 rámu, jsou umístěny vnitřní podpory 4 vzorku 3, které jsou s výhodou opatřeny mechanismem 5 (na obr. 4 tvarová spojení s drážkami fixovaná šrouby) pro ustavení vnitřních podpor 4 ve směru os x a z. Prostřední částí 1 rámu a vzorkem 3 prochází svazek rentgenového záření vyzařovaný zdrojem 15 rentgenového záření. Osa svazku rentgenového záření se nachází 45 ve stejné rovině jako osa x. Svazek rentgenového záření po průchodu zařízením 14 dopadá na detektor 16 rentgenového záření, kde je zaznamenán a převeden do formy obrazu.

Pohybem zatěžovacích prostředků 7 v zatěžovacím směru u (rovnoběžně s osou x) jsou na vzorek 3 v místech podpor 4 a 11 generovány síly F.

50 Vsuvné prstence 6 a ustavovací mechanismy 5 a 9 slouží s výhodou pro nastavování geometrie experimentu a lze je použít pro nastavení poměru délek mezi vnitřními podporami 4 a vnějšími podporami 11, přizpůsobit vnitřní uspořádání zařízení velikostí vzorku 3 v podélném i příčném směru a přesně ustavit podélnou osu vzorku 3 do podélné osy zařízení z.

55 Zařízení 14 dle vynálezu je vyrobeno z oceli, kompozitních materiálů, polymerů a slitin

neželezných kovů. Polohovací prostředky 7 jsou řízeny číslicově pomocí zde nezobrazeného systému počítače a řídicích obvodů. Mechanické veličiny měřené snímači 10 síly a snímači 12 polohy jsou pomocí řídicího systému zaznamenávány v měřicím počítači.

5

### Průmyslová využitelnost

Zařízení dle vynálezu lze použít pro provádění pokročilých měření kombinujících mechanickou zkoušku čtyřbodovým ohybem se zobrazováním vnitřní struktury metodou rentgenové radiografie a výpočtové tomografie. Vynález umožňuje provádět např. pokročilou analýzu deformačního chování materiálů za ohybu, inspekci materiálů a výrobků určených pro namáhání ohybem pod zatížením, záznam a digitalizaci vývoje porušení ve vzorku materiálu, tvorbu a experimentální ověřování numerických modelů a simulací materiálů a výrobků zatížených ohybem nebo diagnostiku únavového poškození.

15

## PATENTOVÉ NÁROKY

20 1. Zařízení (14) pro mechanické zkoušky čtyřbodovým ohybem během rentgenového zobrazování, zejména 4D výpočtovou tomografií, zahrnující rám tvořený prostřední částí (1), která je alespoň v části ozařované svazkem rentgenového záření vyrobena z materiálu vyznačujícím se nízkým útlumem rentgenového záření, dvojici vnitřních podpor (4) vzorku (3) umístěných v prostřední části (1) rámu, nebo v krajních částech (2) rámu mezi vnějšími podporami (11) a prostřední částí (1), přičemž podélná osa vzorku (3) je totožná s podélnou osou (z) zařízení (14), jedna příčná osa vzorku (3) je totožná s příčnou osou (x) zařízení a vzorek (3) je v zařízení uspořádán symetricky podél příčné osy (x) na dvojici vnějších podpor (11) a dvojici vnitřních podpor (4), přičemž dvojice vnějších podpor (11) je vůči dvojici vnitřních podpor (4) pootočená o 180° kolem podélné osy (z), **vyznačující se tím**, že zařízení dále zahrnuje dvojici polohovacích prostředků (7), uspořádanou v krajních částech (2) rámu, pro pohyb dvojice zatěžovacích jednotek (8) s integrovanými vnějšími podporami (11) vzorku (3), polohovací prostředky (7) jsou uzpůsobeny pro zatěžování vzorku (3) ve směru (u), krajní části (2) rámu jsou opatřeny vsuvnými prstenci (6) opatřenými aretační drážkou pro opakovatelné směrově definované uložení polohovacích prostředků (7), vsuvné prstence (6) jsou v krajních částech (2) rámu posuvné v podélné ose (z) zařízení a jsou opatřeny prostředkem pro fixaci v nastavené pozici vůči krajní části (2) rámu, polohovací prostředky (7) zatěžovacích jednotek (8) jsou motorizovány a zatěžovací jednotky (8) jsou opatřeny snímači (12) polohy vůči pevným referencím polohovacích prostředků (7) a zatěžovací jednotky (8) jsou opatřeny snímači (10) síly pro měření sil působících na vzorek (3) v místě vnějších podpor (11) a krajní části (2) rámu jsou opatřeny mechanismy (13) pro připojení sběracího kroužku, do něhož jsou svedeny vodiče pro napájení polohovacích prostředků (7), snímačů (10) síly a snímačů (12) polohy.

2. Zařízení podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vnitřní podpory (4) jsou opatřeny posuvovým mechanismem (5) ustavování vnitřní podpory pro posuv a pevnou fixaci vnitřních podpor (4) ve směru podélné osy (z) a/nebo příčné osy (x) a že vnější podpory (11) jsou opatřeny posuvovým mechanismem (9) ustavování vnější podpory pro posuv a pevnou fixaci vnějších podpor (11) ve směru podélné osy (z) a/nebo příčné osy (x).

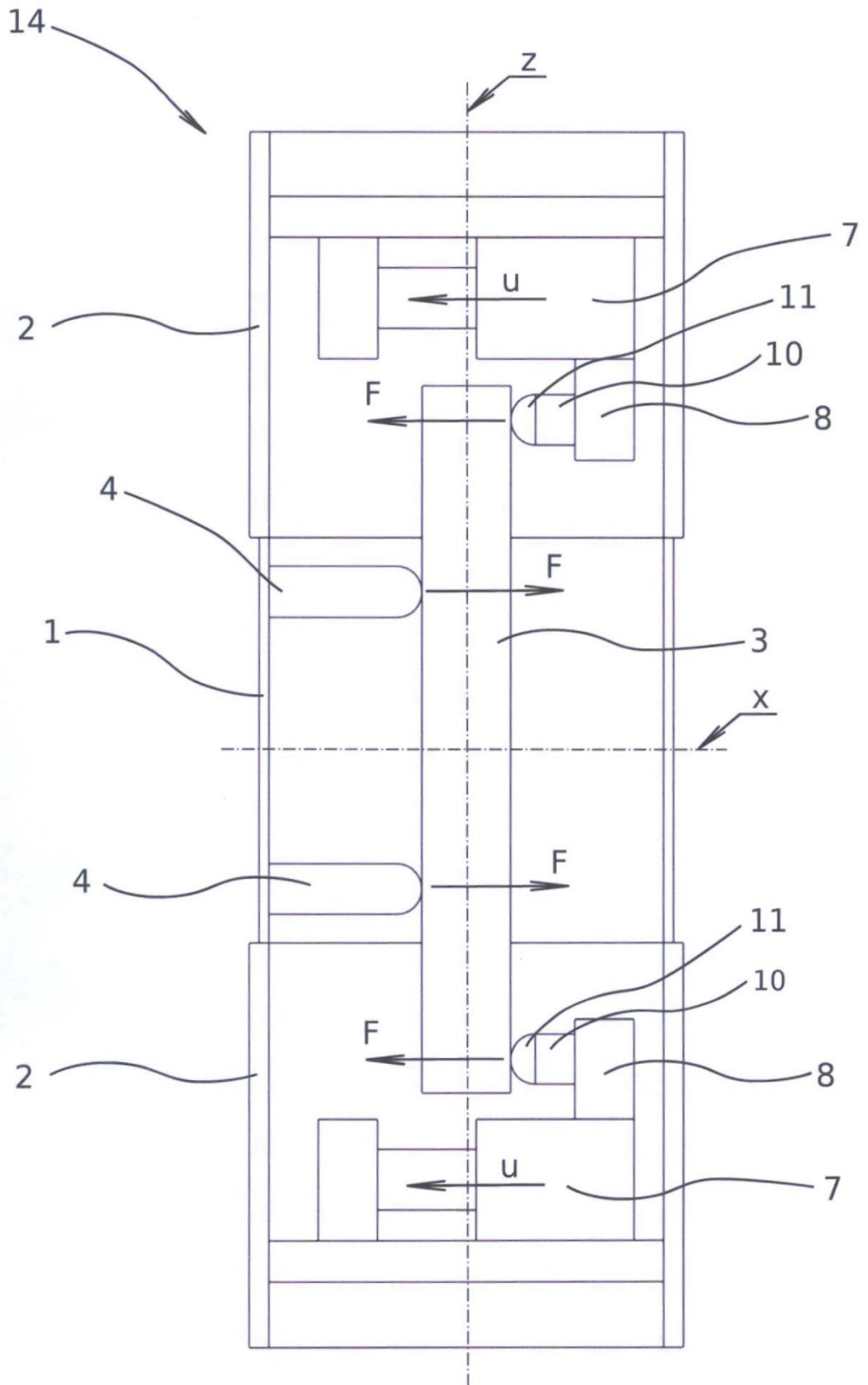
3. Zařízení podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že prostřední část (1) rámu a dvojice krajních částí (2) rámu jsou opatřeny spojovacími prvky pro montáž a demontáž prostřední části (1) z rámu uspořádanými tak, že prostřední část (1) lze nahradit jinou prostřední částí rámu (1) s odlišnými vnějšími rozměry a/nebo materiálem a/nebo tloušťkou stěny.

4 výkresy

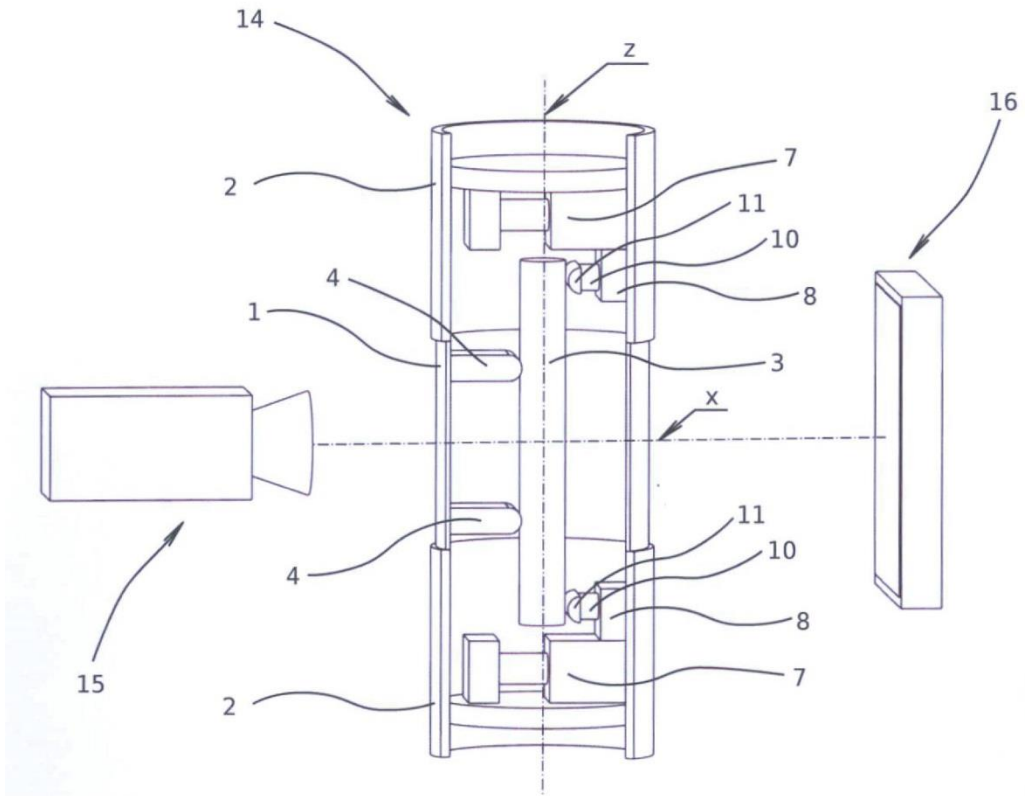


Seznam vztahových značek

- x příčná osa zatěžovacího zařízení
  - z podélná osa zatěžovacího zařízení
  - u směr zatěžování polohovacími prostředky
  - F síly působící na vzorek v podporách zatěžovacího zařízení
- 
- 1 prostřední část rámu zatěžovacího zařízení
  - 2 krajní část rámu zatěžovacího zařízení
  - 3 vzorek
  - 4 vnitřní podpora
  - 5 mechanismus ustavování vnitřní podpory
  - 6 vsuvný prstenec
  - 7 polohovací prostředek
  - 8 zatěžovací jednotka
  - 9 mechanismus ustavování vnější podpory
  - 10 snímač síly
  - 11 vnější podpora
  - 12 snímač polohy
  - 13 mechanismus pro připojení sběracího kroužku
  - 14 zatěžovací zařízení
  - 15 zdroj rentgenového záření
  - 16 detektor rentgenového záření

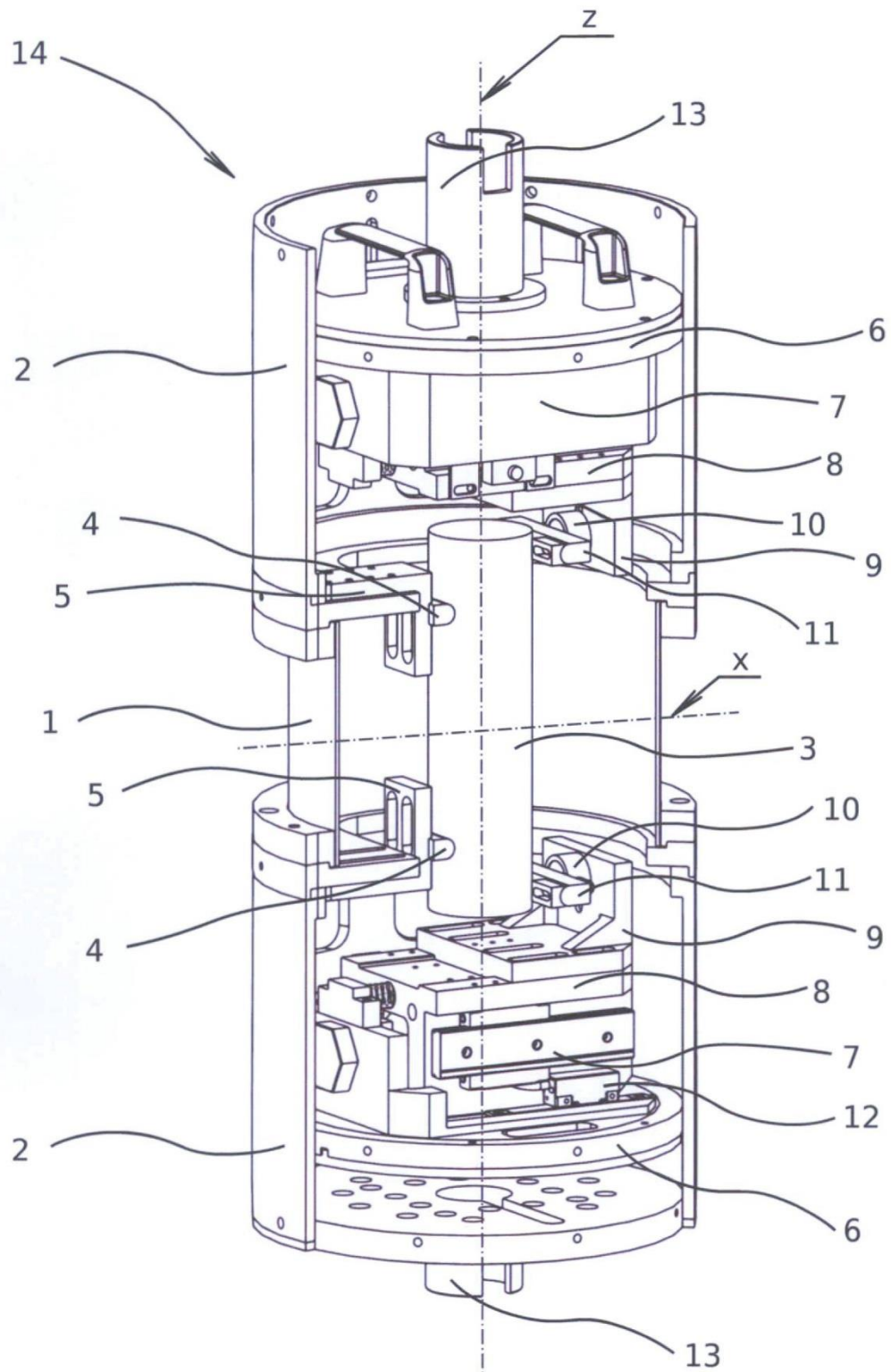


Obr. 1



Obr. 2





Obr. 4