

NEW EXPERIMENTAL SETUP FOR STUDY OF PHYSICAL PROCESSES PRECEDING SPECIMEN FAILURE

D. Vavřík*, J. Bryscejn*, T. Holý†, J. Jakůbek†, M. Jakůbek†, J. Valach*, Z. Vykydal†

Summary: *Failure of a high ductile specimen usually precedes a decrease of the loading force (material softening) under the condition of displacement control in the monotonic loading. This phenomenon is usually induced by a large plastic deformation and eventually by a related dynamic development of voids and micro-cracks inside the specimen (damage process). The experimental investigation of this highly interesting stage can be made accessible only under very well controlled loading. Unfortunately, the elastic energy stored in the loading equipment can result in sudden failure within very short time corresponding to the loading instability. We can follow this time interval with real fast readout system or, alternatively, we can prolong this time interval by reducing the elastic energy in the loading equipment or both. The proposed new loading frame fulfils the indicated requirements and enables extraordinary precise displacement loading control even beyond the maximal loading force. Plastic deformation on a surface is investigated by the optical Method of Interpolated Ellipses and together with damage processes inside of the specimen are simultaneously observed by the X-ray Dynamic Defectoscopy method.*

1. Úvod

Častou úlohou experimentální mechaniky je sledování mechanicky namáhaných vzorků vyrobených z vysoce plastizujících materiálů. Při monotónním zatěžování posuvem většinou porušení takových vzorků předchází pokles zatěžující síly (změkčování materiálu). Tento jev je doprovázen intenzivní plastickou deformací, případně i dalšími poškozujícími procesy jako jsou dynamický rozvoj dutin a mikrotrhlin uvnitř zatěžovaného vzorku. Sledování této nejzajímavější fáze je možné pouze při precizním řízení zatěžujícího posuvu. V běžném zatěžovacím stroji trvá naneštěstí nejzajímavější etapa zkoušky, odpovídající poklesu zatěžující síly, jen velmi krátce, a to z důvodů elastické energie akumulované ve stroji. To platí pro mechanické i hydraulické stroje. Tato energie je často tak vysoká, že vyústí v náhlé porušení vzorku. Pro studium etapy poklesu síly musíme mít k dispozici velmi rychlé záznamové zařízení, a/nebo můžeme prodloužit časový interval poklesu síly redukcí

* Ing. Daniel Vavřík, PhD., Ing. Jan Bryscejn, Ing. Jaroslav Valach, PhD.: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Prosecká 76, 190 00 Praha 9; tel.: +420 286 882 121, e-mail: vavrik@itam.cas.cz;

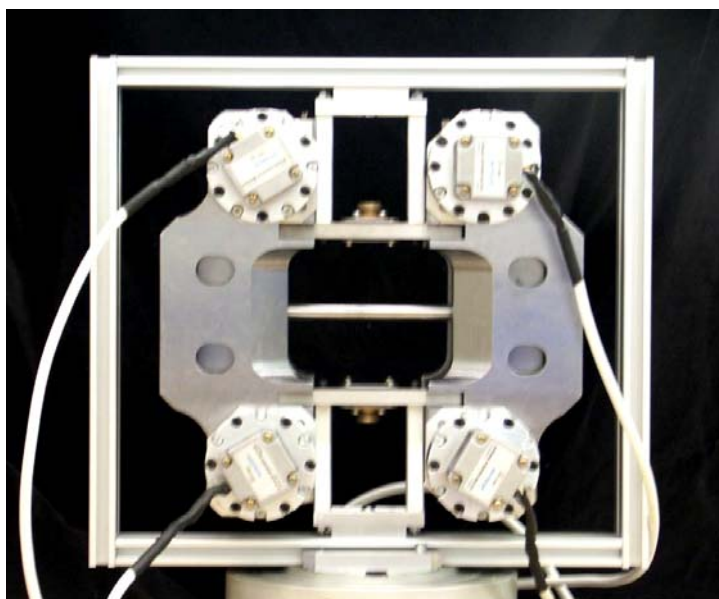
† Ing. Tomáš Holý; Ing. Jan Jakůbek, PhD.; Ing. Martin Jakůbek; Zdeněk Vykydal: Ústav technické a experimentální fyziky ČVUT, Horská 3a/22, 128 00 Praha 2; tel. +420 224 359 290

akumulované elastické energie v zatěžovacím stroji minimalizací jeho hmoty a rozměrů při maximalizaci jeho tuhosti.

S tímto záměrem byl vyvinut unikátní zatěžovací stroj pro tahové vzorky, jehož hmotnost je pouze 25 kg při silové kapacitě 100 kN. Jeho princip byl nastíněn v práci Vavříka et al. (2002). Stroj je zavěšen v podpůrném rámu a spolu s ním připevněn na počítačově řízený stůl se dvěma osami posuvu a jednou rotací, které dovolují precizní prostorové polohování zatíženého vzorku. Celkové vnější rozměry jsou i s podpůrným rámem 377x343x190 mm. Stroj je připraven pro tahové zkoušky plochých, kruhových a případně i CT vzorků. Zatěžování lze realizovat v kvazistatickém i kontinuálním režimu. Maximální prodloužení vzorku je omezeno na 7 mm.

2. Popis zatěžovacího stroje

Na obr. 1 je fotografie zatěžovacího stroje spolu s podpůrným rámem. Stroj se skládá ze dvou párů posuvných příčnic, které tvoří čelisti a jsou orientované vertikálně (na fotografii vlevo a vpravo). Pohyb každé čelisti je realizován jedním párem servopohonů. Mezi čelisti jsou rozepřené dvě bočnice. Přes tyto bočnice je celý stroj pověšen do podpůrného rámu. Na fotografii je patrný testovací tyčový vzorek o kruhovém průřezu, který je orientován horizontálně.



Obr. 1: Fotografie zatěžovacího stroje zavěšeného v podpůrném rámu

Obě čelisti se při zatěžování pohybují symetricky. Díky tomu zůstává u geometricky symetrického vzorku jeho střed v prostoru relativně nehybný. Tím se liší od běžných zatěžovacích strojů, které jsou obvykle konstruované tak, že jeden konec vzorku je fixován a druhý je upevněn do zatěžující (pohybující se) čelisti. Sledované místo vzorku se v takovém případě během zatěžování posunuje ve směru zatížení.

Tím, že na každé čelisti jsou dva servopohony, spolehlivě se u osově symetrického vzorku zamezuje parazitnímu ohybovému momentu, který se obvykle vyskytuje při použití standardních svěrných čelistí. U standardního zatěžovacího stroje se tento parazitní moment odstraňuje aktivními čelistmi, ve kterých jsou integrované přídavné hydromotory

vyrovnávající tento moment. Takové řešení je ovšem značně nákladné a není proto zdaleka běžné.

Servopohony čelistí jsou řízené počítačem přes univerzální USB 2 rozhraní. Servopohon sestává z krokového motoru s 200 kroky na otáčku (počet kroků na otáčku lze zvýšit) a z miniaturní harmonické převodovky s převodovým poměrem 1:100. Spolu s připojeným šroubem a přidruženým klínovým mechanismem dostáváme celkový převodový poměr zhruba 1:14 000, což dovoluje použití velmi malého krokového motoru s nízkým kroutícím momentem 0,22 Nm. Tento extrémně velký převodový poměr zároveň dovoluje velmi přesné řízení zatěžování posuvem. Při nejvyšší projektované rychlosti krokování 1 impuls za 1 μ s je maximální rychlost zatěžování 0,01 mm/s.

Zatěžovací síla je odečítána ze siloměrů, tvořených bočnicemi stroje. Jedná se vlastně o tlakově namáhané ploché tyče s centrálním otvorem, uvnitř kterého jsou nalepené měřicí tenzometry. Na obr. 1 jsou na siloměrech vidět konektory pro tenzometrické můstky. Oba siloměry mají svůj měřicí můstek. Hodnoty měření jsou do počítače přenášeny opět přes USB rozhraní. Závěsy, za které je stroj přes bočnice pověšen do podpůrného rámu, neovlivňují měřicí vlastnosti siloměrů. Posuv čelistí je měřen optoelektronickými úchylkoměry, které mají zaručenou přesnost lepší než 1 μ m (z pohledu na obr. 1 jsou z druhé strany stroje než servopohony, proto na něm nejsou vidět). Měřené údaje o posuvu jsou opět přenášeny přes USB rozhraní do řídicího počítače.

Základní řízení mechanismu stroje se odehrává zadáním rychlosti krokování motorů, případně počtem kroků do zastavení posuvu čelistí. Zároveň lze užít zpětnou vazbu na základě údajů z úchylkoměrů nebo siloměrů, případně i z tenzometrů nalepených přímo na vzorek. Typ použité zpětné vazby závisí na geometrii zkoumaného vzorku a požadované dráze zatěžování.

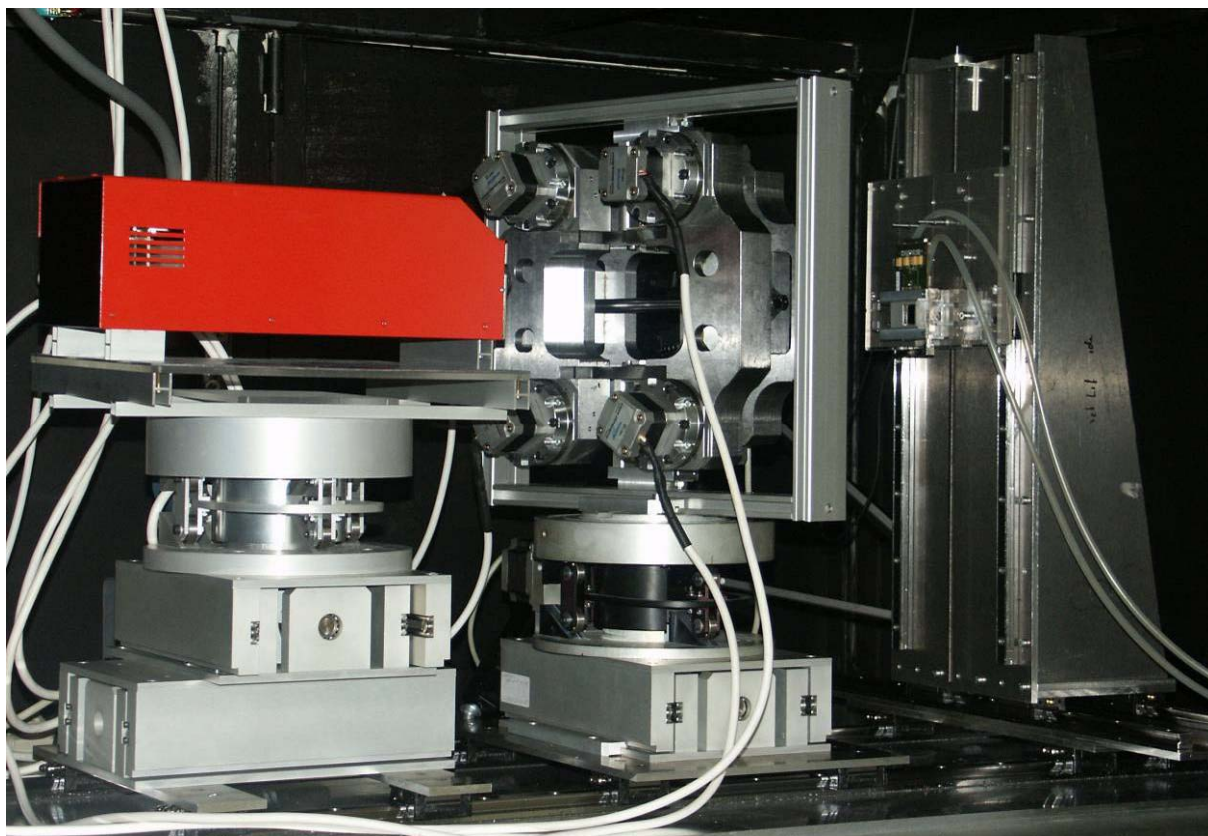
Díky nízké hmotnosti a rozměrům stroje bylo možné jej namontovat na přesný počítačově řízený polohovací stolek. Použité lineární osy stolku mají opakovatelnou přesnost polohování lepší než 10 μ m, rotační osa má přesnost polohování na úrovni dvou úhlových vteřin. Servopohony stolků jsou rovněž řízené počítačem přes USB-2 rozhraní.

Celková koncepce zajišťuje stabilní polohu sledovaného místa zatěžovaného vzorku v prostoru. Dosažená přesnost polohování zatěžovaného vzorku je zcela vyhovující pro defektoskopická měření poškození vzorků s vysokým rozlišením a v perspektivě i pro použití interferometrických metod.

3. Celkové uspořádání experimentální sestavy

Na obr. 2 je fotografie celkového uspořádání nové experimentální sestavy. Na levé straně je na polohovacím stolku umístěna mikrofokusová rentgenka firmy Hamamatsu. Uprostřed sestavy je na polohovacím stolku umístěn vlastní zatěžovací stroj. Chlazený detektor RTG záření Medipix-2 (<http://www.cern.ch/MEDIPIX/>) je připevněn k svislému posuvnému vozíku na stolku vpravo. Rentgenka, zatěžovací stroj se stolky i stojan s detektorem RTG záření jsou připevněny na vodorovné posuvné vozíky, které dovolují nastavit jejich vzájemnou vzdálenost. Digitální kamera (nebo fotoaparát) pro optické pozorování deformací, která přes zrcátko snímá stejné místo, jako je sledováno radiograficky, je z tohoto pohledu skrytá za zatěžovacím rámem. Díky tomuto zrcátku je možné všechny plánované experimentální zobrazovací metody svázat do jednoho souřadného systému.

Všechny řídicí i měřené veličiny týkající se zatěžovacího stroje i ostatních součástí experimentální sestavy budou mít společnou časovou základnu. Jmenovitě se jedná o řízení servopohonů stroje, měření posuvu čelistí a průběhu zatěžovací síly, případně i tenzometrických měření. Se stejnou časovou základnou budou probíhat i všechny plánované experimentální metody. Po osazení dalších servopohonů bude zapojeno i ustavování poloh rengenky, stolku se strojem a detektoru.



Obr. 2: Celkové uspořádání experimentální sestavy. RTG lampa je umístěna na manipulačním stolku vlevo, zatěžovací stroj zavěšený v podpůrném rámu na stolku uprostřed a detektor RTG. záření na stojanu vpravo. Optická kamera je v pozadí sestavy a není z tohoto úhlu viditelná.

4. Experimentální zobrazovací metody

Experimentální sestava bude využívána ke rentgenografickému zkoumání úrovně vnitřního poškození zatěžovaných těles spolu s optickým pozorováním jejich přetvoření. Úroveň vnitřního poškození bude sledována radiografickou X-ray dynamickou defektoskopií (Vavřík et al., 2005). Komplexní obraz 3D přetvoření vzorku bude získán kombinací měření povrchových deformací optickou metodou interpolovaných elips (Vavřík et al. 2004) a mimorovinných deformací analyzovaných fotometrickou stereo metodou (Drdácký et al., 2004). Kombinace těchto dvou optických metod vyžaduje pouze jednu kameru, zároveň ale minimálně tři osvětlovače. Pro měření rovinného přetvoření bude alternativně použita metoda fotometrického sterea.

Radiografické sledování rozvoje poškození v zatěžovaném vzorku je umožněno umístitelností celé sestavy do skříně, která musí být plně odstíněna vůči X-záření z rentgenové lampy. Rotace polohovacího stolku kolem svislé osy zpřístupňuje užití tomografických metod. Použitá RTG lampa je unikátní tím, že emisní skvrna na anodě, ze které vychází RTG záření, má průměr pouze 5 μm . Malý rozměr skvrny zaručuje velmi vysoké rozlišení transmisních RTG obrázků. Svazek RTG záření má tvar divergentního kužele s ostrým vrcholem, o prostorovém úhlu 39°, což umožňuje zvětšení zkoumané oblasti na rentgenogramech. Úroveň zvětšení a velikost pozorované oblasti závisí na vzájemných vzdálenostech „rentgenka-zkoumaný objekt-detektor RTG záření“.

Medipix-2 je polohově citlivý pixelový detektor, pracující v oboru RTG záření. Tato detekční struktura je organizována na jednom čipu jako matice 256x256 elementárních detektorů (pixelů) o rozteči 55 μm . Každý pixel je schopen s vysokou detekční účinností poskytnout údaj o počtu jednotlivých fotonů dané vlnové délky, které na něj dopadly. Detektor je schopen skutečně detekovat jednotlivé fotony s určením místa jejich dopadu s přesností 43 μm (1 σ).

Optická metoda interpolovaných elips je založena na sledování přetvoření hexagonální mřížky bodů, která je nanesená na povrch zkoumaného tělesa. Hlavní poloosy elips, které jsou interpolovány šesticemi bodů, nám definují přímo hlavní prodloužení. Image correlation metoda je postavena na pozorování nahodilé struktury povrchu vzorku. Ta se obvykle vytváří několikabarevnými sprejovými nástřiky. Měřená posunutí jsou pak dána jako vzdálenosti nalezených soběpodobných míst. Fotometrická stereo metoda využívá jednoznačného vztahu mezi sklonem plochy a světlem, které tato plocha nasvícená směrovým světlem odrazí směrem ke kameře. Při použití alespoň tří osvětlovačů je možné rekonstruovat topografii povrchu, nezávisle na jeho barevnosti.

5. Závěr

V souvislosti s experimentálním programem zkoumajícím tvárné materiály byl vyvinut unikátní zatěžovací stroj pro tahové vzorky, jehož hmotnost je při kapacitě 100 kN pouze 25 kg. Celkové vnější rozměry jsou i s podpurným rámem 377x343x190 mm. Stroj je připraven pro tahové zkoušky plochých, kruhových a případně i CT vzorků. Maximální prodloužení vzorku je omezeno na 7 mm.

Celou experimentální sestavu lze označit za komplexní ale i komplikovaný systém. Zatěžovací stroj zahrnuje čtyři servopohony řízené počítačem. Stroj je připevněn na polohovací stůl se třemi stupni volnosti. To znamená sedm servopohonů řízených přes USB rozhraní počítače. Přes totéž rozhraní budou čtena data ze dvou úchylkoměru a dvou siloměrů, případně i tenzometrů nalepených na vzorek. Přes USB rozhraní je také realizováno řízení a čtení dat z detektoru Medipix-2 a optické kamery (fotoaparátu). Celkově to představuje minimálně třináct počítačově svázaných procesů.

Perspektivně bude servopohony vybaveno i nastavování vzájemné vzdálenosti rengenky, stroje a detektoru. Servopohony bude řízeno i ustavení polohy a natočení RTG detektoru Medipix-2. Celkem tedy dalších sedm pohonů.

Během experimentů bude rentgenograficky sledováno vnitřní poškození zatěžovaných těles radiografickou X-ray dynamickou defektoskopií. Komplexní obraz 3D přetvoření vzorku bude získán kombinací měření povrchových deformací optickou metodou interpolovaných

elips a mimorovinných deformací analyzovaných fotometrickou stereo metodou. Všechny řídící i měřené veličiny budou mít společnou časovou základnu.

6. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory grantového projektu GA ČR 106/04/0567 a 101/03/0731, podpořena byla i výzkumnými záměry AV0Z20710524 a MSM210000019.

7. Literatura

Drdácký, M.; Jirovský, I.; Lesák, J.; Pospíšil, S.; Slížková, Z.; Valach, J.; Vavřík, D. (2004) Experimentální metody studia historických konstrukcí, *In: Česko- Slovenská konference Experiment '04*, Editor: Melcher, J. - Karmazínová, M.; Brno, s.73-80

Vavřík, D.; Jakůbek, J.; Visschers, J.; Pospíšil, S.; Zemánková, J. (2002) X-ray dynamic defectoscopy: A way to study damage processes. *Proceedings of the 14th European Conference on Fracture*, Cracow, Poland.

Vavřík, D.; Zemánková, J. (2004) Crack Instability in Ductile Materials Analyzed by the Method of Interpolated Ellipses, *Experimental Mechanics*, Vol. 44, pp. 327-335,

Vavřík, D.; Jakůbek, J.; Pospíšil, S.; Visschers, J. (2005) Non-destructive Observation of Damage Processes in Loaded High Ductile Specimens with Different Crack Configuration by X-Ray Dynamic Defectoscopy, *Materials Science Forum*, Vol. 480, pp. 231-236