

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 665

ISSN 1213-4198

thesis
S
IS

Ing. Miroslav Šlais

**Studium vlivu
rychlostních a teplotních parametrů
na tvaritelnost titanových slitin**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Ing. MIROSLAV ŠLAIS

**STUDIUM Vlivu Rychlostních a Teplotních
Parametrů na Tvařitelnost Titanových slitin**

STUDY OF INFLUENCE OF STRAIN RATE AND
TEMPERATURE ON FORMABILITY OF TITANUM ALLOYS

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

OBOR	STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE
VEDOUCÍ PRÁCE	prof. Ing. MILAN FOREJT, CSc.
OPONENTI	prof. Ing. EMIL SPIŠÁK, CSc. prof. Ing. MILAN TURŇA, Ph.D.
DATUM OBHAJOBY	17. KVĚTNA 2012

Klíčová slova:

Rychlost deformace, teplota, titanová slitina Ti-6Al-4V, mikrostruktura, Hopkinsonův test, Taylorův test, Johnson-Cookova rovnice.

Key words:

Strain rate, temperature, Ti-6Al-4V titanium alloy, microstructure, Hopkinson pressure bar test, Taylor anvil test, Johnson-Cook model.

Místo uložení rukopisu:

Odbor technologie tváření, Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, Technická 2, Brno

© Miroslav Šlais, 2012

ISBN 978-80-214-4548-2

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	6
3 POZNATKY O SOUČASNÉM STAVU ZKOUŠENÍ MATERIÁLU ZA VYSOKÝCH RYCHLOSTÍ DEFORMACE	7
3.1 Hopkinsonův kompresní test.....	7
3.2 Taylorův test	7
3.3 Johnson-Cookova rovnice.....	8
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	9
4.1 Ověření experimentálních zařízení a jejich vylepšení	9
4.1.1 Testování vzorků za zvýšených teplot [1].....	9
4.1.2 Optimalizace parametrů Taylorova testu [23], [3]	10
4.2 Výchozí stav materiálu.....	10
4.3 Hopkinsonův test [1].....	12
4.3.1 Vyhodnocení chování materiálu.....	12
4.3.2 Vliv rychlosti deformace a teploty na mikrostrukturu	14
4.4 Taylorův test	15
4.4.1 Počítačová simulace	16
4.4.2 Vliv rychlosti deformace na mikrostrukturu	19
5 ZÁVĚRY	20
LITERATURA	22
CURRICULUM VITAE	28
ABSTRAKT	29

1 ÚVOD

V současnosti dochází k neustálému rozvoji ve všech oblastech techniky. Zvyšuje se výkon strojů i nástrojů společně se snižováním hlavních i vedlejších časů potřebných k výrobě dané součásti - toto přináší nemalé finanční úspory a konkurenceschopnost. Aplikací nových konstrukčních materiálů, jako jsou např. plasty v automobilovém a kompozity v leteckém průmyslu, lze dosáhnout vyšších výkonů při stejné spotřebě energie, jejíž cena se na celosvětových trzích neustále zvyšuje. Technologie tváření umožňuje rychlou a přesnou výrobu součásti s minimálním odpadem materiálu. Dalším důležitým faktorem, kterému je nutné věnovat pozornost, je studium vztahu, jak struktura materiálu ovlivňuje jeho vlastnosti a naopak.

Dojde-li k vyčerpání zásoby plasticity tvářeného materiálu, např. při výrobě tvarově složitých dílců, dochází ke vzniku trhlin. Toto se děje především při tváření za studena. Aby se zabránilo vzniku možných vad na tvářeném dílci, využívá se simulace tvářecího procesu na počítači, který je vybaven vhodným simulačním softwarem. Model je vytvořen tak, aby byly zachovány podstatné vstupní a výstupní parametry skutečného a modelového objektu v reálné posloupnosti a časových vazbách. Opakované experimenty za definovaných podmínek poskytují informace o potenciálních problémech, které musíme vzít v úvahu a zahrnout je do analýzy modelovaného objektu. Počítač vybavený simulačním programem slouží jako prostředek pro výpočet simulace tvářecího děje a je vybaven potřebným hardwarovým a softwarovým rozhraním, které umožňuje zadávání vstupních dat a interpretaci dosažených výsledků. Správnost výstupních dat je podmíněna korektním zadáním a správnou volbou modelu materiálu. Výběr vhodného modelu materiálu je podmíněn uskutečněním experimentu za reálných podmínek.

Matematický popis teorie šíření vln a konstitutivní rovnice popisující chování materiálu jsou výsledkem reálných podmínek zatěžování. Výsledky jsou dostupné v literatuře a stále větší měrou i na internetu. Cílem současného výzkumu je stanovení parametrů konstitutivních rovnic, které komplexně popisují chování daného materiálu. Výsledky experimentů by měly být reprezentativní a v porovnání se simulací dynamických dějů pomocí speciálního softwaru by měly vykazovat co největší shodu.

Jedním z cílů disertační práce je poskytnutí chybějících informací, které se týkají popisu změn struktury materiálu v důsledku rázového zatěžování prováděného na experimentálním zařízení pro Taylorův i Hopkinsonův test. Z důvodu časové a finanční náročnosti jsou testy provedeny pouze pro jednu titanovou slitinu. Chování této slitiny je zkoumáno při dané výchozí struktuře materiálu. V případě Taylorova testu následuje modelování chování materiálu v simulačním softwaru ANSYS LS-DYNA a porovnání dosažených výsledků s experimentem. V práci je také nastíněn vývoj zařízení pro Hopkinsonův test, které umožní vysokorychlostní tahové zkoušky.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem disertace je vytvoření reprezentativního modelu materiálu popsaného hodnověrným konstitutivním vztahem. V tomto modelu budou zahrnuty všechny podstatné faktory ovlivňující chování materiálu jako kontinua. Toto bude provedeno cestou aplikovaného výzkumu chování a modelování materiálu za vysokých rychlostí deformace na zvoleném materiálu, který je běžně tvářen pro aplikace především v leteckém a kosmickém průmyslu, pomocí standardních testů a rozborů metalografických výbrusů.

Dále je nezbytné studium vlivu tepelného zpracování na výchozí strukturu a její chování v jednotlivých technologických aplikacích. Model materiálu při simulaci musí poskytovat výsledky srovnatelné se skutečnými hodnotami. Pro operace tváření je vhodný materiál s co největší zásobou plasticity, který klade během operace přetvoření co nejmenší přetvárný odpor.

U zařízení umožňujících rázové zatížení je potřeba vyvinout vhodné – přesnější snímače pro detekci průběhů napětových vln a připravit adaptaci pro pozorování těchto vysokorychlostních dějů, jejichž doba trvání je několik desítek mikrosekund. V části, která se netýká přímo modelu materiálu, avšak ovlivňuje opakovatelnost a reprodukovatelnost výsledků, je snaha alespoň o částečnou modernizaci a dovybavení současného zařízení pro Hopkinsonův a Taylorův test. Dalším krokem je vývoj adaptace umožňující vysokorychlostní tahovou zkoušku na zařízení pro Hopkinsonův test.

Pro uskutečnění těchto cílů disertace je třeba:

Zaměřit se na experimentální část zkoušek namáhání titanových slitin za dynamických podmínek pomocí Hopkinsonova testu:

- Návrh počtu měření a tvaru vzorků.
- Měření mikrotvrlosti vzorků HV.
- Vyhodnocení experimentů a vyslovení závěrů.
- Výzkum a vývoj komponent pro Hopkinsonův test.
- Posouzení vlivu navržených komponent na celkový výsledek experimentu.

Realizace a vyhodnocení experimentální části Taylorova testu:

- Obrazová analýza tvaru deformovaného vzorku pomocí CCD kamery a softwaru LUCIE
- Stanovit vliv rychlosti deformace a popř. i teploty na strukturní změny materiálů.
- Vyhodnotit experimentální část s návrhem reprezentativního modelu materiálu, tj. křivek přetvárných odporů pro vybrané slitiny popsané konstitutivním vztahem.

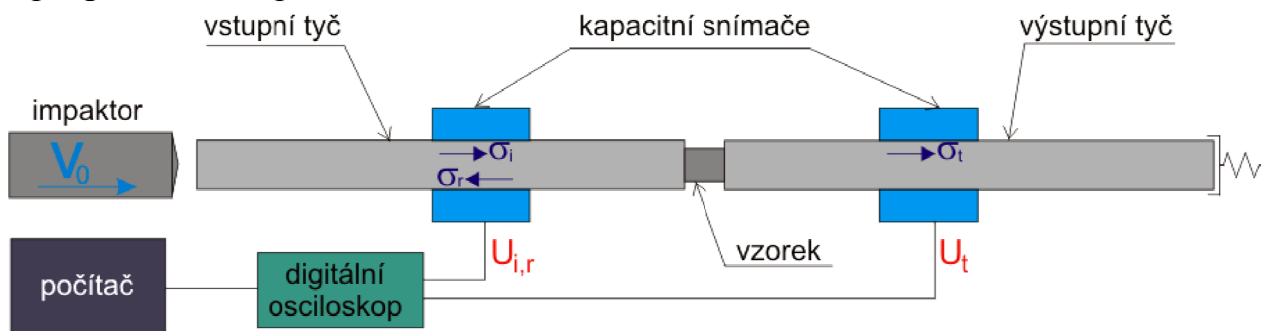
Výše popsané cíle disertační práce popisují přínosy v oblasti výzkumu chování materiálu za vysokých rychlostí deformace.

3 POZNATKY O SOUČASNÉM STAVU ZKOUŠENÍ MATERIÁLU ZA VYSOKÝCH RYCHLOSTÍ DEFORMACE

3.1 HOPKINSONŮV KOMPRESNÍ TEST

Hopkinsonův kompresní test (Split Hopkinson pressure bar test – SHPB) patří mezi experimentální metody sloužící ke zjišťování dynamického chování materiálů a vlivu rychlostních parametrů na tvařitelnost materiálů. Podstata testu je založena na jednorozměrné teorii šíření elastického pulzu v měrných tyčích a na interakci mezi napětovým pulzem a vzorkem válcového tvaru, který je umístěn mezi vstupní a výstupní tyčí. Náčrt Hopkinsonova testu je na obr. 1.

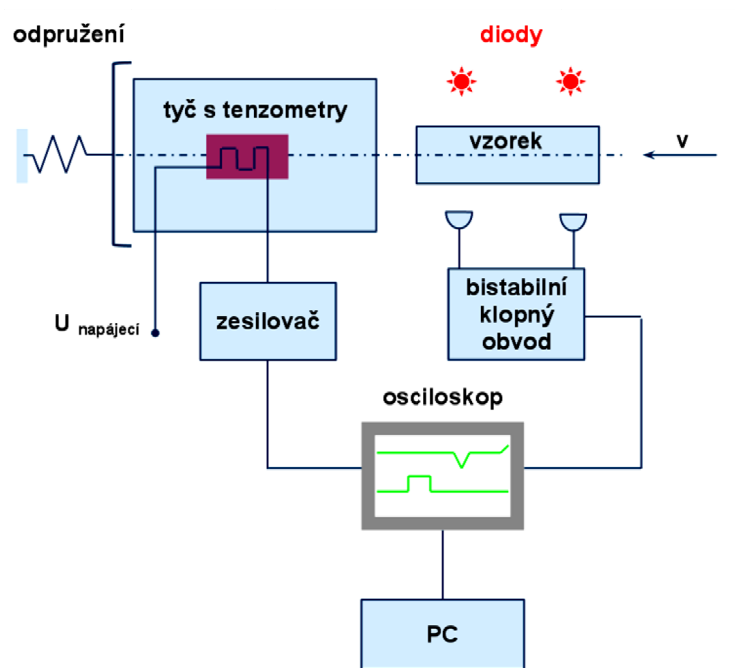
Impaktor – zatěžující projektil, který je vyroben ze stejného materiálu jako tyče, je urychlován stlačeným vzduchem, vystřelen z kanónu a následný osový náraz na vstupní tyč vyvolá elastický kompresní pulz (tzv. zatěžující pulz). Zatěžující pulz se dále šíří vstupní tyčí až na rozhraní se vzorkem, kde je část pulzu odražena zpět jako odražený pulz a část projde pěchovaným vzorkem do výstupní tyče jako prošlý pulz. Tyto tři pulzy vyvolají změnu osového napětí na tyčích a jsou zaznamenány pomocí kapacitních snímačů, které jsou umístěny po jednom na každé tyči a připojeny k digitálnímu paměťovému osciloskopu Tektronix TDS 210. Data z osciloskopu jsou následně přenesena do počítače k dalšímu zpracování v programech Scope 5.5 a MS Office.



Obr. 1 Schéma Hopkinsonova kompresního testu

3.2 TAYLORŮV TEST

Taylorův test (Taylor anvil test – TAT) patří mezi materiálové zkoušky, při kterých lze dosáhnout rychlosti deformace až 10^4 s^{-1} při relativně nízkých dopadových rychlostech zkušební vzorku. Výhodou zmíněného je možnost rychlého vyhodnocení dynamické meze kluzu na základě empirických vztahů a geometrie vzorku. Následná počítačová simulace umožňuje získat experimentálně stanovené parametry pro materiálové modely.



Obr. 2 Schéma měření rychlosti vzorku a rázové síly při Taylorově testu

Test spočívá v nastřelení válcového vzorku proti tuhé překážce. Zkušební vzorek o výchozí délce 25 mm a průměru 5 mm je umístěn do nosiče (zpravidla z polystyrénu) a následně urychlen expandujícím vzduchem v pneumatickém kanónu směrem k dopadlišti. Vyhodnocení Taylorova testu lze provést dvěma způsoby. Z odečtených rozměrů deformovaného vzorku určíme pouze dynamickou mez kluzu dle empirických vztahů. Komplexní vyhodnocení spočívá v počítačové simulaci experimentu a stanovení parametrů konstitutivních rovnic, které popisují chování materiálu v širokém rozmezí rychlostí deformace a teplot.

3.3 JOHNSON-COOKOVA ROVNICE

Konstitutivní vztah dle Johnson-Cooka (1) se nejčastěji používá pro materiály s BCC mřížkou a má 5 experimentálně stanovených parametrů. V současnosti patří mezi nejrozšířenější konstitutivní vztahy a v modifikované formě jej lze použít i pro keramické materiály.

$$\sigma = \left[\sigma_0 + B \epsilon^n \right] \left[1 + C \dot{\epsilon}^m \right] \exp(-m T^*) \quad (1)$$

kde T^* je bezrozměrná teplota a σ_0 , B , C , n , m představuje pět experimentálně stanovených parametrů: σ_0 – mez kluzu [MPa], B – modul zpevnění [MPa], C – koeficient citlivosti na rychlost deformace, n – exponent zpevnění, m – teplotní koeficient odpevnění a ϵ_0^* je referenční rychlost přetvoření (nejčastěji je uvažována 1 s^{-1}).

Ze vztahu (1) je patrná závislost přirozeného přetvárného odporu na deformaci (první část rovnice), na rychlosti deformace (střední část rovnice) a na teplotě (poslední část rovnice). Určení experimentálně stanovených parametrů vyžaduje provést praktický experiment, např. Taylorův test, dále porovnat výsledky

experimentu s výsledky simulace v softwaru LS DYNA, popsané konstitutivním vztahem dle Johnson-Cooka. [9]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

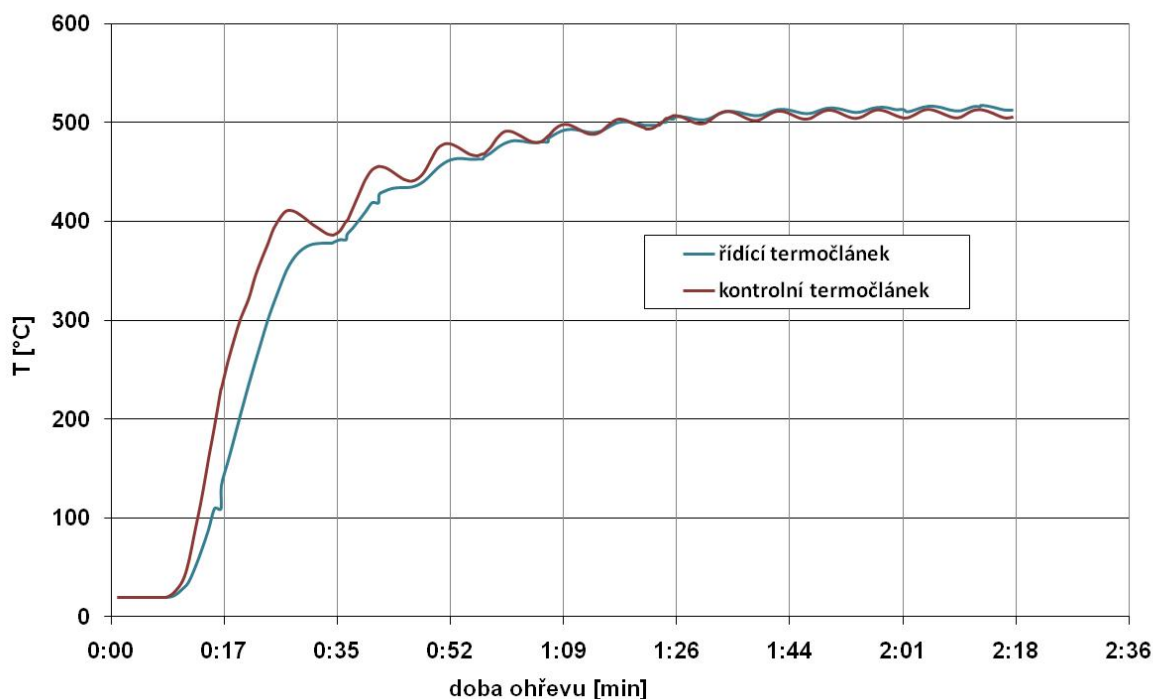
V rámci zadání disertační práce jsem se zaměřil na zjištění materiálových vlastností slitiny Ti-6Al-4V za podmínek dynamického zatěžování. Experimenty byly realizovány na zařízení pro Taylorův test a na zařízení pro Hopkinsonův test a to i za zvýšených teplot.

4.1 OVĚŘENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH ZAŘÍZENÍ A JEJICH VYLEPŠENÍ

4.1.1 Testování vzorků za zvýšených teplot [1]

Ve spolupráci s VZLÚ Praha, a.s. byla vyvinuta metodika testování vzorků za zvýšených teplot pro Hopkinsonův test, která byla úspěšně aplikována při zjišťování dynamického mechanického chování hliníkových slitin pro frikční svařování. [7] Vzorky byly ohřívány pomocí vysokofrekvenčního transformátoru s induktorem, který včetně termoregulátoru Eurotherm 3508 byl zapůjčen touto firmou. Celý proces byl řízen a zaznamenávám pomocí programu I TOOLS.

Teplota vzorku byla snímána pomocí řídicího termočláneku přilepeného k povrchu vzorku vysokoteplotním tmelem. K zamezení tepelného ovlivnění kapacitních snímačů byly konce měrných tyčí ochlazovány vodní sprchou. Z důvodu nebezpečí popuštění měrných tyčí teplota ohřevu nepřesáhla 500 °C. Čela vzorku byla namazána pastou z hexagonálního nitridu bóru, který zlepšuje kontakt mezi čelem tyče a čelem vzorku a přispívá k lepšímu přenosu napěťového pulzu.

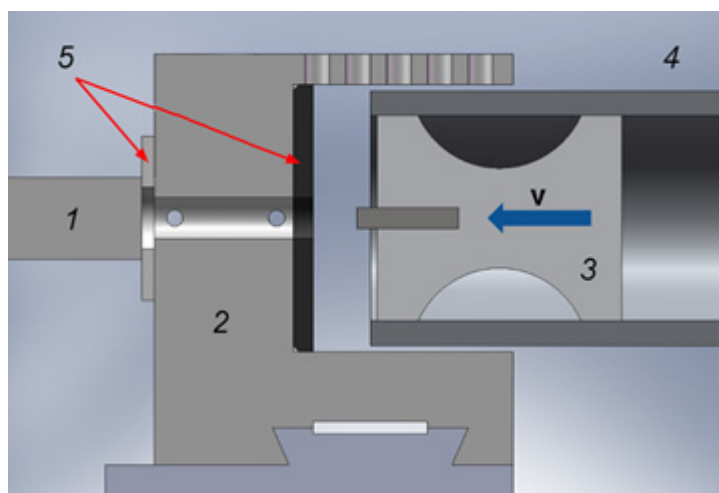


Obr. 3 Časový průběh ohřevu vzorku Ti 12

Příklad závislosti teploty na čase při ohřevu na teplotu 500 °C je na obr. 3. Po dosažení zkušební teploty byl vždy vzorek po dobu jedné minuty na této teplotě podržen, aby došlo k vyrovnání teplot mezi povrchem a středem vzorku. Na válcovou plochu vstupní tyče byl nalepen kontrolní termočlánek a to co nejbližší na rozhraní čela tyče a vzorku. Pomocí něho byla sledována teplota nejvíce tepelně namáhané oblasti tyče. Pokud v průběhu ohřevu docházelo k výrazné odchylce teplot sledované pomocí termočláneků (cca o 100 °C), bylo nutné provést opětovné přilepení toho termočlátku, který ukazoval teplotu nižší. Uvedený problém se vyskytl vždy, pokud termočlánek nebyl v přímém styku s měřeným povrchem. V důsledku dynamických rázů docházelo často k odlepení kontrolního termočlátku na tyči.

4.1.2 Optimalizace parametrů Taylorova testu [23], [3]

Polystyrénový nosič se během urychlování v hlavní tře o její vnitřní stěnu, čímž dochází ke vzniku statického náboje na povrchu nosiče. Tento náboj se přenáší dále na vzorek a po nárazu i na měrnou tyč. K zamezení přenosu výboje z nosiče na těleso dopadliště a dále na měrnou tyč byly navrženy izolační podložky z technického plastu, viz obr. 4. Dále je před vlastním experimentem zkušební vzorek i nosič ošetřen antistatickou úpravou. Značná část šumu a vysokofrekvenčních složek může být matematicky odfiltrována při dalším zpracování dat v počítači. Zlepšení kvality signálu lze dosáhnout i adaptací kapacitního snímače pro tento test nebo použitím polovodičových tenzometrů, jelikož tyto mají větší hodnotu k-faktoru a nejsou tolik náchylné k ovlivnění elektromagnetickým šumem.



Obr. 4 Úprava prostoru dopadliště (1 – měrná tyč, 2 – dopadliště, 3 – vzorek s nosičem, 4 – hlaveň kanónu, 5 – izolační podložky)

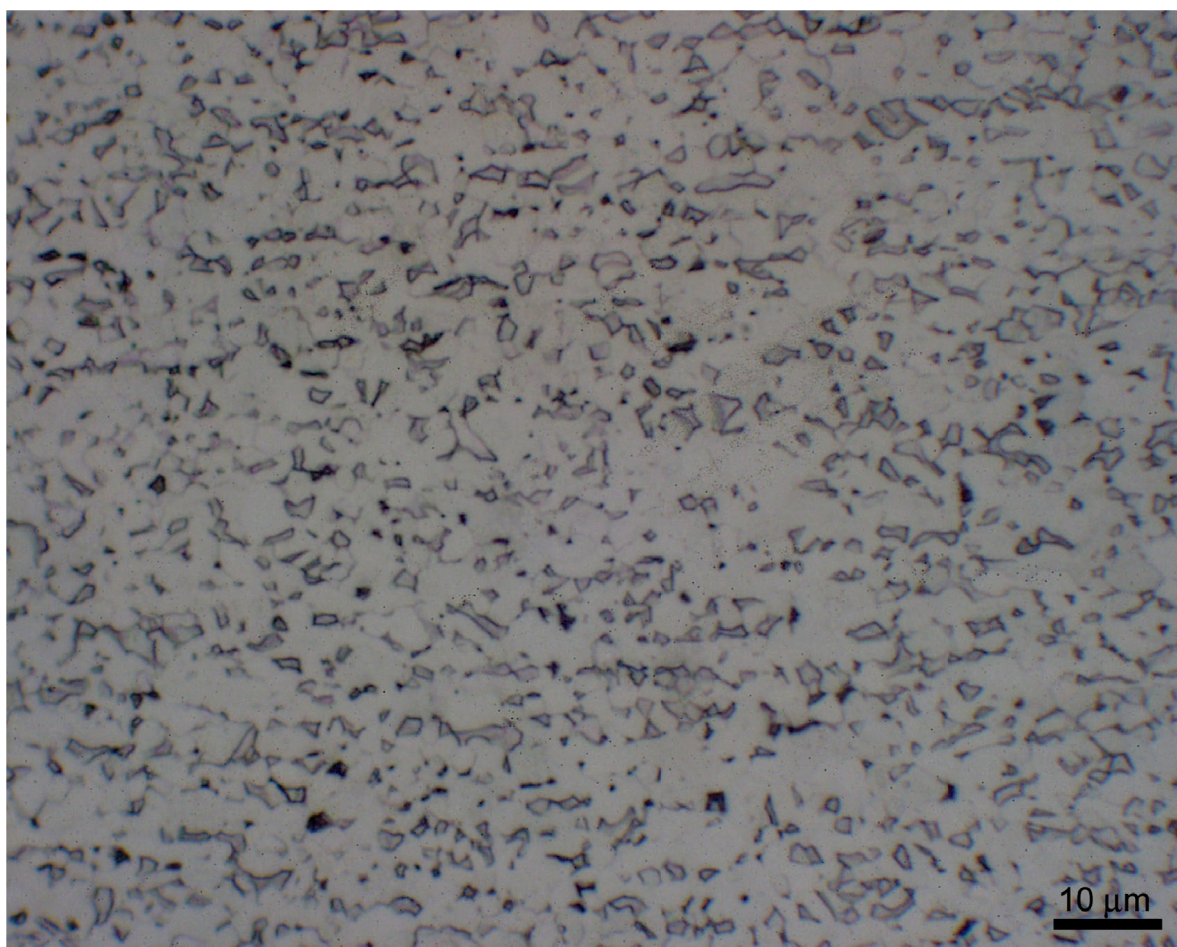
4.2 VÝCHOZÍ STAV MATERIÁLU

Vzorek z polotovaru tyče slitiny Ti-6Al-4V, která bylo použita pro výrobu válcových vzorků, byl podroben metalografickému pozorování. Veškeré práce byly prováděny v laboratoři firmy Struers ÚMVI FSI. Tyč byla rozříznuta podélně v ose

pomocí diamantového kotouče na řezače Accutom. Materiál byl zalisován do „plastu“ lisem LaboPress 3, následně byl broušen na metalografické brusce Dap 7 brusnými papíry o zrnitosti 280, 600 a 1 200. Následovalo leštění v ruce tří a jedno mikronovou diamantovou pastou. Chemické leptání bylo provedeno na brusce Dap 7 pomocí OPU – suspension. Ke zvýraznění a naleptání mikrostruktury byl vzorek leptán roztokem, který se skládal z 25 ml vody, 5 ml HF a 15 ml HNO₃.

Pro optické pozorování byl využit světelný mikroskop Olympus PMG 3 vybavený kamerou DP 11 stejnojmenné firmy. Tento přístroj umožňuje jak pozorování ve světelném poli, tak i pozorování pomocí filtru Numarsci a to až do 1 000 násobného zvětšení.

Na obr. 5 je výchozí mikrostruktura slitiny Ti-6Al-4V. Jedná se o jemnozrnnou strukturu, kdy se fáze α jeví jako světlá a β jako tmavá. Mikrostruktura byla pozorována i pod filtrem Numarsci. Fáze α mění v tomto barevném kontrastním filtru svůj tvar i barvu, β nikoliv. Toto je dáno rozdílnými typy mřížek, ve kterých fáze krystalizují (α v hcp, β v bcc mřížce). Binární analýzou obrazu bylo zjištěno, že výchozí poměr fází α : β je přibližně 3 : 1.



Obr. 5 Výchozí mikrostruktura

4.3 HOPKINSONŮV TEST [1]

Experimentálními zkouškami byl zjišťován deformační odpor pro titanovou slitinu Ti-6Al-4V (ASTM B348 – Gr. 5) v závislosti na poměrné deformaci, rychlosti deformace a teplotě. Výchozím polotovarem byla nejprve tyč o průměru 12 mm, ze které byly vyrobeny vzorky o délce 10 mm. Tyto vzorky nebylo možné zdeformovat na daném zařízení ani při teplotě 500 °C z důvodu vysoké meze kluzu titanové slitiny. Následnou úpravou rozměrů zkušební vzorku – průměr 9 mm, délka 9 mm – byl tento problém odstraněn. Zkušební vzorky byly vyrobeny a následně broušeny tak, aby čela vzorků byla kolmá na osu a především vzájemně rovnoběžná.

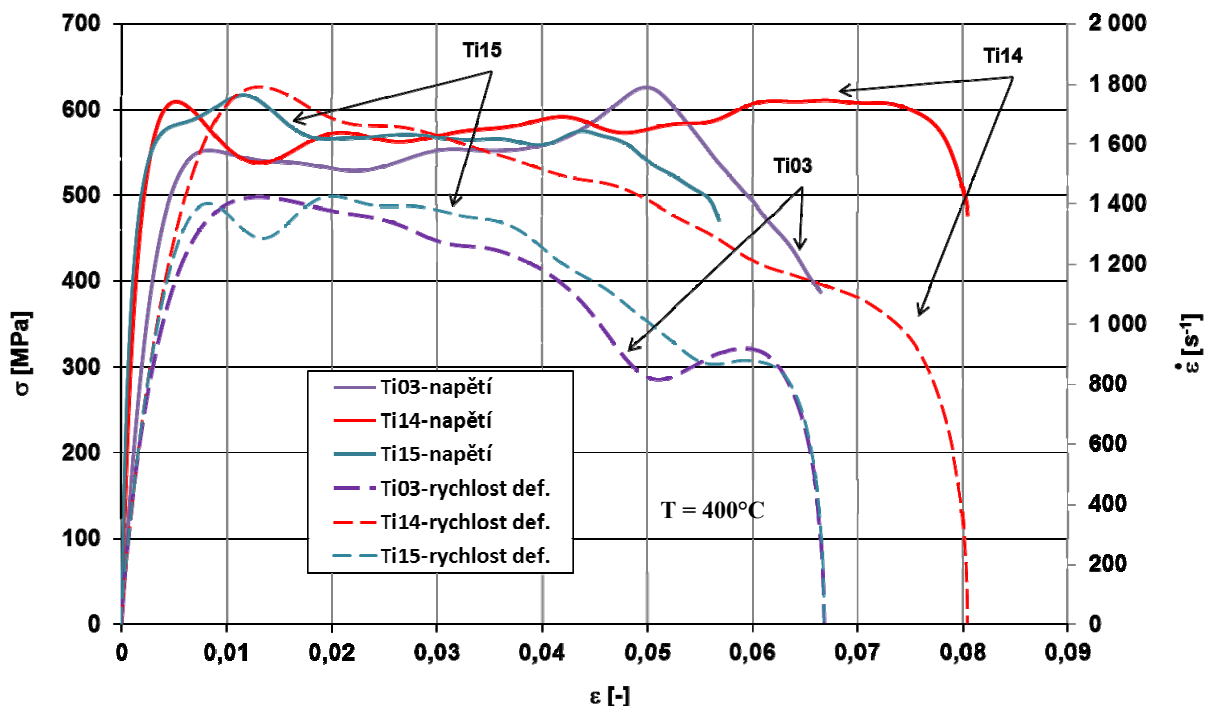
Poměr délky k průměru je zvolen tak, aby nedošlo ke ztrátě tvarové stability vzorku a aby nedocházelo k prolínání deformačních kuželů. Zároveň je dostatečně velký, aby nedošlo k interferenci vln šířících se vzorkem a byl jednoznačně identifikován prošlý napěťový pulz.

Energie potřebná na spěchování vzorků je vyvozena impaktorem, který je urychlován pomocí stlačeného vzduchu. Stlačený vzduch je až do „výstřelu“ uchovávan ve vzdušníku, který je napojen na kompresor. Výsledný tlak ve vzdušníku je dán dobou jeho plnění – běhu kompresoru. Neexistuje tedy stálý mechanismus, za kterého jsou vzorky pěchovány. Velikost energie impaktoru je dána jeho rychlostí, která je měřena těsně před dopadem na vstupní tyč. Neberou se tedy v úvahu další okrajové podmínky jako je netěsnost zařízení během komprese, doba spuštění a zastavení komprese, tření mezi povrchem impaktoru a vodícími lištami nebo časová prodleva mezi skončením plnění vzdušníku a urychlením impaktoru. Z toho plyne, že při relativně stejných podmínkách zkoušek, které můžeme ovlivnit, dobou plnění vzdušníku, nemusíme dosáhnout stejných dopadových rychlostí a tedy i energií impaktoru. Z výše uvedeného plyne a experimenty tuto domněnku potvrzují, že každý experiment je jedinečný.

4.3.1 Vyhodnocení chování materiálu

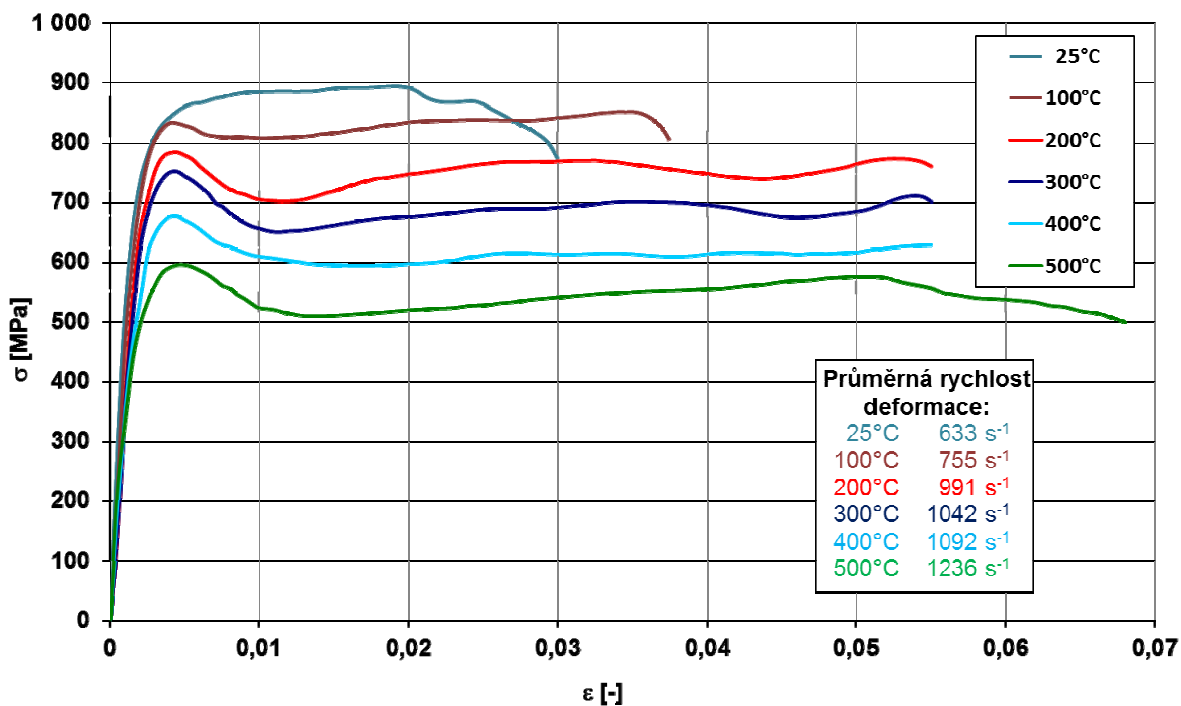
Chování titanové slitiny bylo zkoumáno v rozmezí teplot 20 až 500 °C s intervalem 100 °C. Toto odstupňování poskytuje dostatečné množství informací o změnách mechanického chování materiálu a není příliš náročné na množství testovaných vzorků a na celkové vyhodnocení, které je časově náročné.

V každém intervalu teploty byly testovány nejméně tři vzorky. Opakovaná měření měla za cíl potlačit vliv náhodných chyb, i když není možná 100% opakovatelnost (teplota byla vždy dodržena, ale docházelo k mírnému kolísání v průběhu rychlosti deformace). Jako důkaz pro tato tvrzení je přiloženo vyhodnocení napěťových pulzů pro vzorky Ti03, Ti14 a Ti15 testované za teploty 400 °C, které byly před tím matematicky upraveny filtrem Butterworth z důvodu odstranění vysokofrekvenčních složek a šumu, získáme závislosti rychlosti deformace – deformace a napětí – deformace (obr. 6).



Obr. 6 Závislost deformačního napětí a rychlosti deformace na deformaci pro vzorky Ti 03, Ti14 a Ti 15

Jak je patrné z obr. 6, i při kolísání průběhu rychlosti deformace až o 20 % (dopadová rychlost impaktoru byla v rozmezí 22,39 – 23,01 m/s) nedochází k výraznému ovlivnění průběhu napětí – deformace. Tento fakt lze vysvětlit tím, že při takto vysokých hodnotách rychlostí deformace (průměrně cca $1\ 100\ \text{s}^{-1}$) není materiál citlivý na drobné kolísání rychlosti deformace.

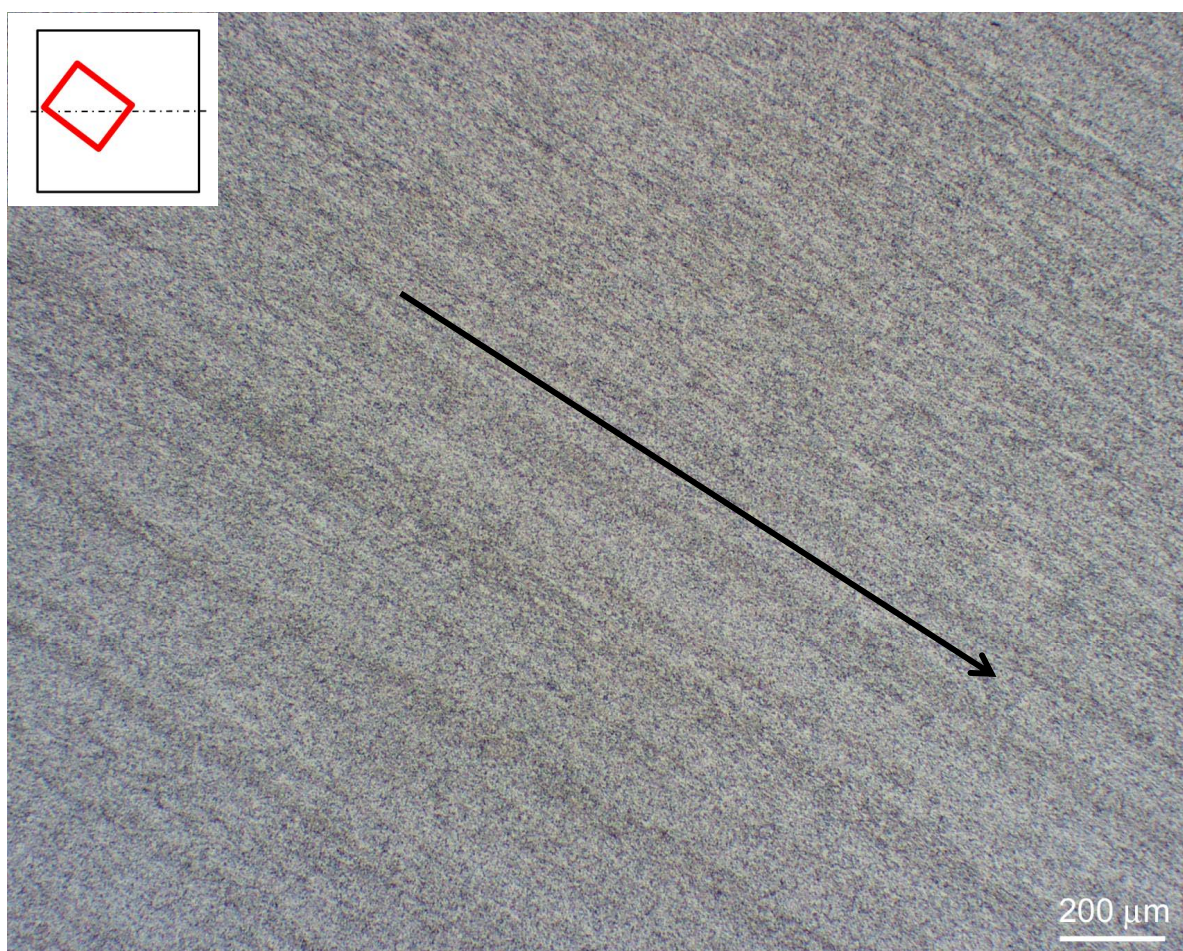


Obr. 7 Průměrné křivky napětí - deformace pro jednotlivé teploty

Z takto získaných křivek pro každý interval teplot byla vypočtena průměrná hodnota závislosti napětí – deformace (obr. 7) a rychlosti deformace – deformace. Z obr. 7 je patrné, že s rostoucí teplotou dochází ke snižování přetvárného odporu. Střední rychlost deformace lze pro interval teplot 200 – 500 °C považovat za řádově stejnou, tedy 10^3 s^{-1} . Od teploty 100 °C lze na jednotlivých křivkách napětí deformace pozorovat rozvoj horní meze kluzu při $\varepsilon = 0,004$. Od stupně deformace 1,5 % nedochází k výraznému zpevňování ani odpevňování materiálu titanové slitiny.

4.3.2 Vliv rychlosti deformace a teploty na mikrostrukturu

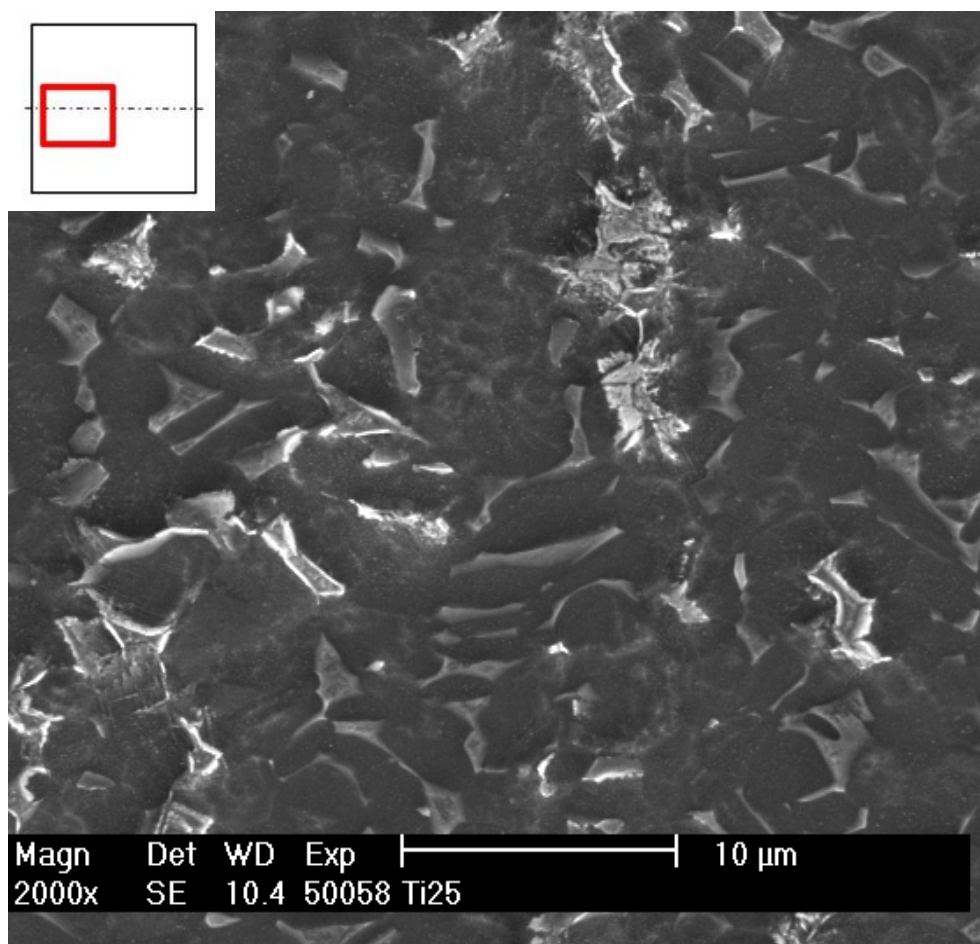
Dále byl zkoumán vliv rychlosti deformace a teploty na výslednou mikrostrukturu. Zatížené vzorky byly osově rozříznuty a podrobeny metalografickému výbrusu, jehož postup je uveden výše. Vzorek Ti11, který byl zatěžován za okolní (pokojevé) teploty, je téměř nedeformovaný.



Obr. 8 Deformační pásy vzorku Ti03 (šipka značí směr zatížení)

Od teploty 300°C lze na vzorcích pozorovat deformační pásy, jejichž směr je totožný se směrem zatěžování. Na obr. 8 je výbrus vzorku Ti03 s vyznačeným směrem deformačních pásů.

Za teploty 500 °C lze na elektronovém i optickém mikroskopu pozorovat „kostřičky“ – bílé na SEM, tmavé na optice. Jejich přítomnost lze vysvětlit přeleptáním struktury směsi kyselin při přípravě výbrusu, čímž došlo ke vzniku hran na mezifázovém rozhraní. EDS analýza těchto útvarů potvrzuje, že se nejedná o oxidy ani karbidy, neboť zde nejsou žádná lokální maxima (peaky) výskytu prvků O a C.



Obr. 9 Mikrostruktura vzorku Ti 02 z SEM

4.4 TAYLORŮV TEST

Deformační odpor titanové slitiny Ti-6Al-4V (ASTM B348 – Gr. 5) v závislosti na poměrné deformaci a rychlosti deformace byl zjišťován Taylorovým testem. Výchozím polotovarem byla tyč o průměru 6 mm, ze které byly vyrobeny vzorky o délce 25 mm a průměru 5 mm. Zkušební vzorky byly vyrobeny a následně broušeny tak, aby čela vzorků byla kolmá na osu a především vzájemně rovnoběžná.

Energie potřebná k urychlení vzorku ustaveného v polystyrénovém nosiči je vyvozena stlačeným vzduchem. Stlačený vzduch je až do „výstřelu“ uchovávan ve vzdušníku, který je napojen na kompresor. Výsledný tlak ve vzdušníku je dán dobou jeho plnění – běhu kompresoru. Neexistuje tedy stálý mechanismus, za kterého jsou vzorky pěchovány. Velikost energie dopadu je dána měřením jeho rychlosti těsně před dopadem na tuhou překážku – tyč o průměru 20 mm. Neberou se tedy v úvahu další okrajové podmínky jako je netěsnost zařízení během

komprese, doba spuštění a zastavení komprese, tření mezi povrchem nosiče a vnitřní stěnou kanonu, tření mezi povrchem nosiče a vzorku nebo časová prodleva mezi skončením plnění vzdušníku a urychlením vzorku s nosičem. Z toho plyne, že při relativně stejných podmínkách zkoušek, které můžeme ovlivnit, tj. doba plnění vzdušníku, nemusíme dosáhnout stejných dopadových rychlostí a tedy i dopadové rychlosti vzorku. Z výše uvedeného plyne, a experimenty tuto domněnku potvrzují, že každý experiment je jedinečný jako u pneumatického zařízení pro Hopkinsonův test.

4.4.1 Počítačová simulace

Modelování Taylorova testu spočívá v zadání a hledání vhodných parametrů konstitutivních rovnic, které nejlépe vystihují chování materiálu v závislosti na okrajových podmínkách. Z důvodu časové náročnosti počítačové simulace byly hledány parametry konstitutivní rovnice (1) dle Johnson-Cooka pro výše uvedenou titanovou slitinu. Tento konstitutivní vztah je velmi často používán, neboť je schopen obsáhnout s několika málo parametry velmi široké rozmezí teplot a deformačních rychlostí.

Výsledky simulace Taylorova testu se srovnávají se skutečným výsledkem experimentu. Hlavním kritériem je dosažení co největší shody deformovaných tvarů. Simulaci lze považovat za korektní a výsledky za reprezentativní, je-li neshoda mezi simulací a experimentem do 10 %. Takto získané parametry platí pouze s jednoznačně definovaným chemickým složením materiálu a jeho tepelným zpracováním.

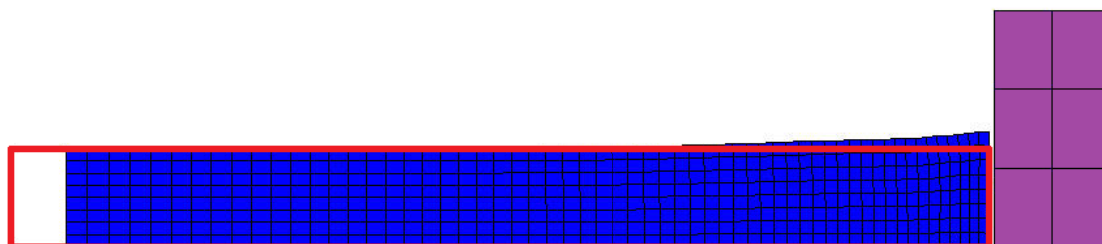
K hledání parametrů Johnson-Cookovy rovnice byl použit simulační software ANSYS LS-DYNA. ANSYS slouží jako preprocesor pro zadání vstupních dat a okrajových podmínek a také jako postprocesor pro zobrazení konečné vypočtené deformace a výpočtového napětí. Řešič LS-DYNA byl zvolen, protože Taylorův test je experiment, při kterém dochází k velkým deformacím během krátkého časového okamžiku. Na základě dřívějších simulací byl vyvinut algoritmus, jehož úkolem je co nejpřesnější stanovení parametrů konstitutivní rovnice. Do algoritmu se zadává dopadová rychlost vzorku, jeho výchozí geometrie a dále pak intervaly včetně kroku pro jednotlivé parametry Johnson-Cookovy rovnice. Následné cyklování mění hodnoty parametrů (A, B, C, n, m) dle zadání a vypisuje vybrané rozměry z geometrie deformovaného tvaru.

Následující zjednodušení byla použita pro snížení časové náročnosti simulace:

- Vzorek dopadá kolmo.
- Deska dopadliště je ideálně tuhá a po nárazu vzorku se plasticky nedeformuje.
- Řešení probíhá v osovém řezu, tedy ve 2D.
- Simulace řeší pouze polovinu osového řezu, pracuje tedy s osovou symetrií vzorku.

Na základě předchozích zkušeností lze říci, že uvedená zjednodušení nemají vliv na korektnost simulace a výsledky takto získané jsou reprezentativní. Pokud by se Taylorův test simuloval ve 3D, došlo by k enormnímu nárůstu času potřebného

k řešení, které by nevedlo k dalšímu zpřesnění jednotlivých parametrů konstitutivní rovnice. Na obr. 10 je výstup simulace deformace vzorku včetně jednotlivých prvků sítě.



Obr. 10 Deformace vzorku Ti-12 25µs po nárazu (červeně původní tvar)

Výsledky simulace

Na základě provedených simulací byly stanoveny nejvhodnější parametry Johnson-Cookovy rovnice, které uvádí tabulka 1. Statická mez kluzu byla stanovena na základě statických přechovacích zkoušek. Pro správné stanovení parametru m byly použity křivky napětí – deformace získané při Hopkinsonově kompresním testu.

Tabulka 1 Parametry Johnson-Cookovy rovnice stanovené počítačovou simulací

σ_0 [MPa]	B [MPa]	C [-]	n [-]	m [-]
802	995	0,010	0,50	0,60

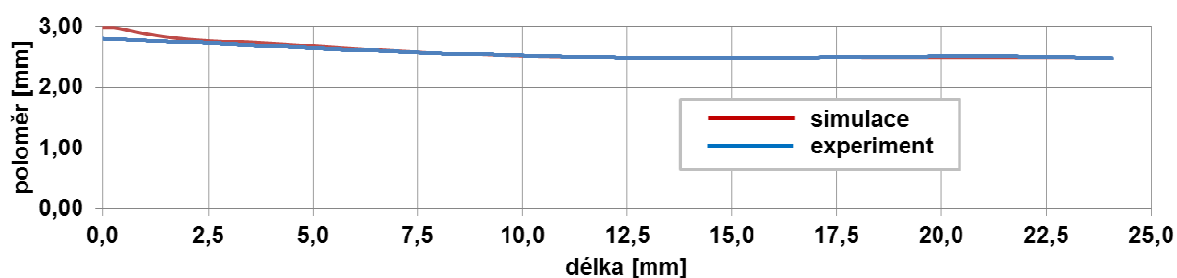
Tabulka 2 Porovnání reálných a vypočtených rozměrů pro vybrané vzorky

Vzorek		Ti-19	Ti-13	Ti-12	Ti-9	Ti-27
Dopadová rychlost [m/s]		100	170	195	210	220
Délka konečná [mm]	skutečná	24,80	24,26	24,03	23,81	23,67
	simulace	24,52	23,70	23,33	23,10	22,93
	chyba	-1,13 %	-2,38 %	-2,99 %	-3,09 %	-3,22 %
Průměr v 0,1 délky konečné [mm]	skutečný	5,18	5,35	5,45	5,45	5,56
	simulace	5,22	5,46	5,57	5,63	5,68
	chyba	0,77 %	1,99 %	2,07 %	3,25 %	2,07 %
Průměr v 0,2 délky konečné [mm]	skutečný	5,09	5,29	5,40	5,34	5,39
	simulace	5,17	5,31	5,40	5,45	5,49
	chyba	1,57 %	0,44 %	0,00 %	2,10 %	1,83 %
Průměr v 0,3 délky konečné [mm]	skutečný	5,10	5,12	5,12	5,12	5,17
	simulace	5,13	5,16	5,21	5,24	5,27
	chyba	0,59 %	0,78 %	1,80 %	2,38 %	1,81 %
Délka nedeformovaného konce [mm]	skutečná	18,34	16,17	14,40	14,50	14,34
	simulace	18,63	15,29	14,66	14,31	14,00
	chyba	1,56 %	-5,75 %	1,77 %	-1,34 %	-2,40 %

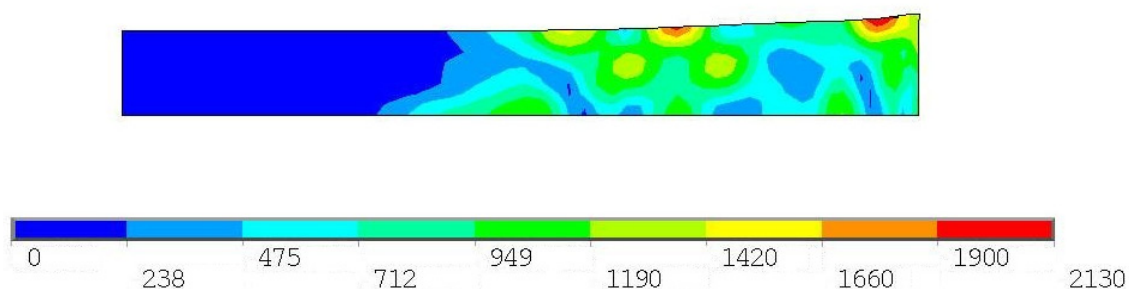
Tabulka 7 uvádí procentuální chybu mezi skutečným a rozměrem vypočteným počítačovou simulací. Za 100% je považován reálný rozměr. Parametry geometrie byly porovnávány pro vzorky Ti- 9, 12, 13, 19 a 27, které reprezentují vždy jednu oblast v intervalu skutečných dopadových rychlostí. Shoda výsledků je $\pm 5\%$ a parametry konstitutivní rovnice takto stanovené lze považovat za reprezentativní. Pro nižší dopadové rychlosti nelze ověřit shodu tvaru mezi experimentem a simulací v důsledku minimální deformace vzorku, kterou není obrazová analýza schopna rozlišit.

Výsledky simulace pro vzorek Ti-12

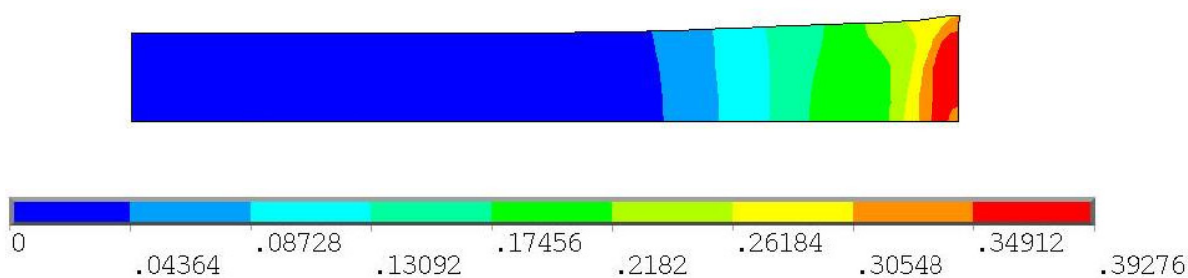
V následujícím grafu je uvedeno porovnání mezi simulací a experimentem pro vzorek Ti-12 v deformovaném tvaru, jehož dopadová rychlost byla 194,9 m/s. Neshoda maximálních průměrů je zapříčiněna fyzikálními zákony, které neumí počítačová simulace zcela zohlednit. Dále jsou uvedeny hodnoty efektivního napětí a deformace dle podmínky HMH po skončení zatěžování. Výsledný tvar vzorku je dán uspořádáním Taylorova testu, a tedy k největšímu přetvoření a napětí se objevuje v oblasti čela, které dopadá na tuhou desku.



Obr. 11 Porovnání deformovaného tvaru mezi experimentem a simulací



Obr. 12 Výsledné výpočtové napětí [MPa] pro vzorek Ti-12

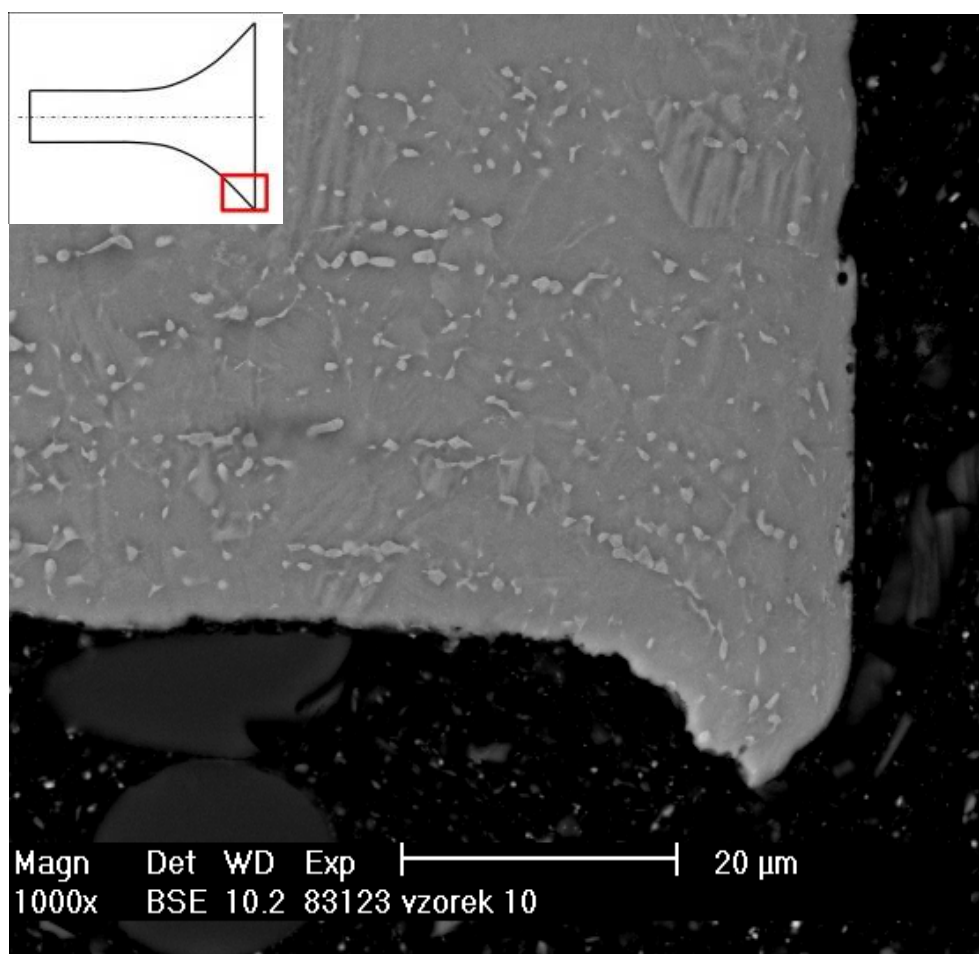


Obr. 13 Výsledná výpočtová deformace pro vzorek Ti-12

4.4.2 Vliv rychlosti deformace na mikrostrukturu

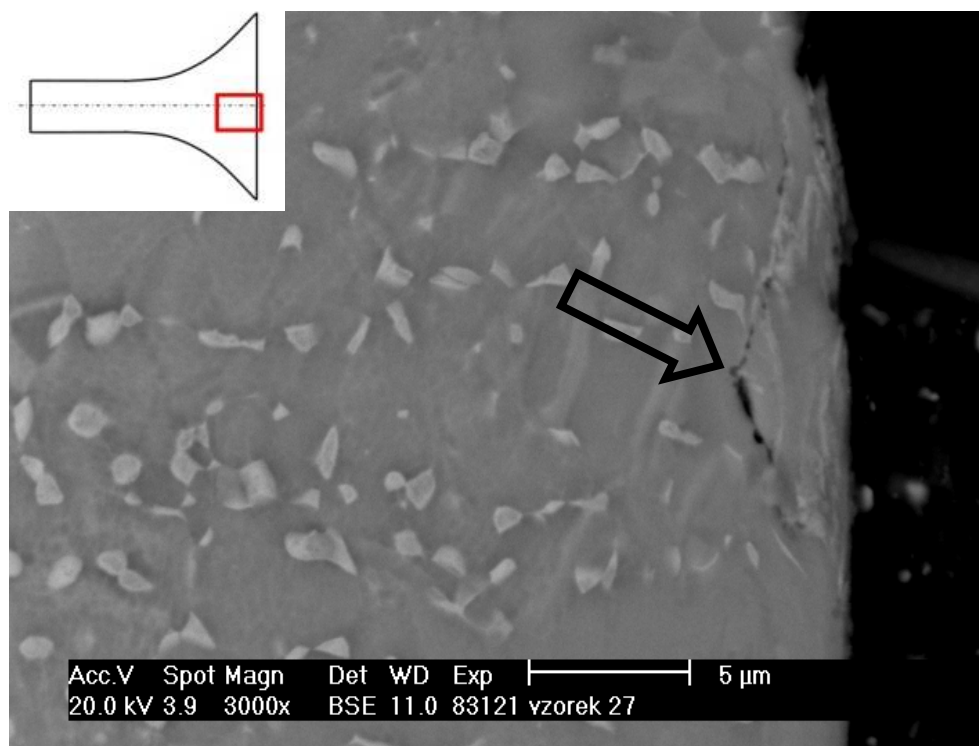
Také u vzorků podrobených Taylorově testu byl zkoumán vliv rychlosti deformace na mikrostrukturu. Po skončení experimentu byly vzorky osově rozříznuty a podrobeny metalografickému výbrusu, jehož postup je popsán v kap. 4.2.

Jelikož při Taylorově testu dochází k největší deformaci v oblasti čela, byly zkoumány změny mikrostruktury právě zde. pomocí SEM. Na obr. 14 je část deformovaného čela vzorku Ti-12 (dopadové rychlost 195 m/s). Okrajová část čela (vpravo dole) je typicky zdeformována do trychtýřovitého tvaru se zřetelným plastickým tokem materiálu. Černé otvory na čele (vpravo) jsou zbytky zalévací hmoty a nejedná se o porušení materiálu v důsledku překročení meze pevnosti.



Obr. 14 Část deformovaného čela vzorku Ti-12

Na všech vzorcích podrobených pozorování na SEM jsou na čelech patrné výtrže (viz obr. 15). Tyto výtrže u volného povrchu čela vznikají v okamžiku setkání postupující plastické vlny a odražené elastické vlny. Výsledkem je smykové porušení materiálu při překročení meze pevnosti materiálu. Tyto výtrže zasahují přibližně do hloubky cca 4 μm, jak je zřejmé z obr. 15.



Obr. 15 Výtrž na čele vzorku Ti-27 ($v = 220$ m/s)

5 ZÁVĚRY

Hlavním cílem předkládané disertační práce bylo stanovení parametrů konstitutivní rovnice popisující mechanické chování titanové slitiny. Z velkého množství dostupných slitin titanu byla zvolena, i s ohledem na cenu, ta nejpoužívanější – Ti-6Al-4V. Tato slitina nachází široké využití v mnoha oblastech (letectví, lékařství, strojírenství atd.) a nabízí kombinaci vysoké pevnosti, nízké hmotnosti, tvařitelnosti a korozní odolnosti.

V důsledku zkoumání vlivu teploty a rychlosti deformace na mikrostrukturu této slitiny musela být vyvinuta nebo zdokonalena metodika experimentů. U Hopkinsonova kompresního testu byla ve spolupráci s VZLÚ Praha kompletně vyvinuta metodika testování vzorků za zvýšených teplot. Díky indukčnímu ohřevu můžeme nyní testovat vzorky při teplotách do 500 °C. Dále byla provedena změna uspořádání podpor dělených tyčí, došlo k renovaci kapacitních snímačů a byly vyrobeny delší impaktory umožňující větší deformaci zkoumaného materiálu. Uvedené změny umožňují získat kvalitnější záznam pulzů s minimálním vlivem šumů a vlnové disperze. V neposlední řadě byly stanoveny parametry matematické filtrace jednotlivých pulzů tak, aby při vyhodnocení nedocházelo k ovlivnění závislosti napětí na deformaci a rychlosti deformace na deformaci. Dalším výstupem je užitečný vzor přípravku pro vysokorychlostní tahové zkoušky na zařízení pro Hopkinsonův kompresní test, který je chráněn Úřadem průmyslového vlastnictví pod č. 21472.

U Taylorova testu byla zdokonalena metodika měření rázu. Nosič i se vzorkem jsou před vlastním experimentem ošetřeny tak, aby nedocházelo k přenosu statického výboje na tyč osazenou kovovými tenzometry. Proběhly i vstupní testy

a možnosti měření deformační síly pomocí piezoelektrického snímače. Tento bude v budoucnu využíván, neboť nabízí kvalitnější a přesnější záznam. V oblasti počítačová simulace byl vytvořen algoritmus, který umožňuje poměrně rychlé stanovení parametrů Johnson-Cookovy rovnice na základě deformovaného tvaru vzorku.

Stěžejním úkolem této práce bylo stanovení parametru Johnson-Cookovy rovnice pro titanovou slitinu Ti-6Al-4V a dále zkoumání vlivu teploty a rychlosti deformace na změny v mikrostruktuře. Po provedení vstupních testů, které měly za úkol ověřit chemické složení slitiny a stanovení statické meze kluzu, byly provedeny experimenty za vyšších rychlostí deformace a zvýšených teplot.

Vzorky podrobené Hopkinsonovu kompresnímu testu byly testovány v rozsahu teplot 20 – 500 °C za střední rychlosti deformace cca 1 000 s⁻¹. Výsledkem jsou závislosti deformačního napětí, které byly použity pro stanovení teplotního koeficientu odpevnění v Johnson-Cookově rovnici. V rámci dosažených podmínek zatěžování nedochází k výrazným strukturním změnám.

Výsledky obrazové analýzy deformovaných vzorků z Taylorova testu slouží jako podklad pro porovnání experimentu s počítačovou simulací. Pomocí algoritmu byly stanoveny parametry Johnson-Cookovy rovnice tak, aby co nejlépe vystihovaly reálný průběh obrysu vzorků z fyzikálního experimentu. Parametry jsou následující:

σ_0 [MPa]	B [MPa]	C [-]	n [-]	m [-]
802	995	0,010	0,50	0,60

Mikroskopické pozorování neprokázalo podstatné změny ve struktuře titanové slitiny. Naproti tomu SEM potvrdila výskyt výtrží na deformovaném čele a mikrotrhliny až do hloubky 4 μm. Tyto defekty musí být brány v úvahu při vysokorychlostním tváření, neboť právě zde mohou vznikat poruchy vedoucí až k porušení tvářené součásti. Pro průkazné dislokační změny v mikrostruktuře by bylo vhodné pozorování na TEM.

Za hlavní přínos této práce považují vyvinutí a ověření metodiky testování vzorků za zvýšených teplot pro Hopkinsonův test, vývoj zařízení pro vysokorychlostní tahové zkoušky pro Hopkinsonův test a vytvoření algoritmu pro stanovení parametrů Johnson-Cookovy rovnice pomocí simulačního softwaru ANSYS LS-DYNA. Budoucí výzkum bude zaměřen na možnosti dalšího potlačení šumů při měření u zařízení pro Hopkinsonův i Taylorův test. Další možností je využití neuronových sítí v algoritmu pro stanovování parametrů Johnson-Cookovy rovnice, které by vedlo k jeho zpřesnění a urychlení hledání nejvhodnějších parametrů.

LITERATURA

- [1] ŠLAIS, Miroslav a Milan FOREJT. Study of dynamic behaviour of Ti-6Al-4V titanium alloy. In *Steel Research International*. Special Edition. Düsseldorf, Verlag Stahleisen GmbH. 2008. p. 693 - 697. ISBN 978-3-514-00754-3.
- [2] ŠLAIS, Miroslav, Kamil PODANÝ, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Milan FOREJT. Statické a dynamické mechanické chování oceli 17 240. In *International Scientific Conference PRO-TECH-MA 2009, Progressive Technologies and Materials*. Rzeszów, Politechnika Rzeszów. 2009. s. 262 - 266. ISBN 978-83-7199-550-7.
- [3] ŠLAIS, Miroslav; Martin KNEBL a Milan FOREJT. Evaluation of dynamic forces established during the Taylor Anvil Test. *MM Science Journal*. 2010. 2010(4). p. 214 - 216. ISSN 1803-1269.
- [4] AKIN, J. E. *Finite elements for analysis and design* [online]. London: Academic Press Limited, 1994 [cit. 2011-08-17]. Dostupné z WWW: <http://books.google.cz/books?id=p7dLmHnF_MsC&lpg=PP1&pg=PR4#v=onepage&q&f=false>. ISBN 0-12-047653-3.
- [5] ASHLEY, Steven. Boeing 777 Gets a Boost from Titanium. *Mechanical Engineering*. 1993, vol. 115, no. 7, p. 60-65.
- [6] BAOZHONG Sun, Liu FANG and Gu BOHONG. Influence of the Strain Rate on the Uniaxial Tensile Behavior of 4-step 3D Braided Composites. *Composites: Part A*. 2005, 36, p. 1477-1485.
- [7] BĚLSKÝ, Petr. Preliminary Tests of Friction Stir Welding. In *Letecký zpravodaj: Czech AEROSPACE Proceedings*. Praha: Czech Aerospace Manufacturers Association / ALV, 2006. p. 24-26. ISSN 1211-877X.
- [8] BRUENIG, Michael and Larissa DRIEMEIER. Numerical Simulation of Taylor Impact Tests. *International Journal of Plasticity*. 2007, no. 23, p. 1979-2003.
- [9] BUCHAR, Jaroslav, Milan FOREJT, Miroslav JOPEK and Ivan Křivánek. Evaluation of constitutive relations for high strainrate behaviour using the Taylor Test. *Journal dePhysique*. 2000. France. vol. IV , p. Pr9-75 - Pr9-80.
- [10] BUCHAR, Jaroslav a Josef VOLDŘICH. *Termální balistika*. 1. vyd. Praha: Academia, 2003. 340 s. ISBN 80-200-1222-2.
- [11] BURŠA, Jiří. *Metoda konečných prvků*. Brno: 2005. 5 s. Dostupné z WWW: <<http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/MKP4.doc>>.
- [12] Butterworth filter. In *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2.10.2005, last modified on 11.8.2011 [cit. 2011-08-17]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth_filter>.

- [13] CLINCKEMAILLIE, Jan, et al. High Scalability of Parallel PAM-CRASH with a New Contact Search Algorithm. In BUBAK, Marian, et al. *Lectures Notes in Computer Science: High Performance Computing and Networking*. Amsterdam: 2000. p. 439-444. ISBN 3-540-67533-1.
- [14] *Computational Thermodynamics* [online]. 2011 [cit. 2011-09-18]. Titanium-Aluminum (Ti-Al) Phase Diagram. Dostupné z WWW: <<http://www.calphad.com/titanium-aluminum.html>>.
- [15] FARLÍK, Alois a Emanuel ONDRÁČEK. *Teorie dynamického tváření*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968. 314 s.
- [16] FIELD, J. E. et al. Review of Experimental Techniques for High Rate Deformation and Shock Studies. In *International Journal of Impact Engineering*. Oxford: Elsevier Science, 2004. s. 109-177. ISSN 0734-743X .
- [17] FOREJT, Milan. Konstitutivní vztahy pro rychlosti deformace v technologiích tváření. In *Proceedings of the 2nd International Conference Form 95*. Brno: PC-DIR, Co. Ltd., 1995. s. 77-82. ISBN 80-214-0664-X.
- [18] FOREJT, Milan, Jan KREJČÍ a Jaroslav BUCHAR. High Strain Rate Phenomena in Metal Forming: New courses in Engineers Education. *Teaching and Education in Fracture and Fatigue*. 1996, vol. 1, is. 4. ISSN 1359-9372.
- [19] FOREJT, Milan, Jan KREJČÍ a Miroslav JOPEK. Optimalizace parametrů dynamických modelů tvářených materiálů. In *Form 2002*. Brno, Brno University of Technology. 2002. p. 37-40. ISBN 80-214-2162-2.
- [20] FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *Experimentální metody*. Brno, 2003. 83 s. [cit. 2008-04-15]. Dostupné z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/download/experimentalni_metody_cviceni_forejt_piska_humar_janicek.pdf>
- [21] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 2006. 217 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [22] FOREJT, Milan a Miroslav ŠLAIS. Optimalizace parametrů Hopkinsonova kompresního testu. *Acta Mechanica Slovaca 2B/2006*. 2006. vol. 10.(2B/2006). p. 121 - 128. ISSN 0335-2393.
- [23] FOREJT, Milan a Miroslav ŠLAIS. Problems of Measuring Dynamic Compression Forces. In *Book of Abstracts and Proceedings of papers-CD ROM 10th International Conference TECHNOLOGY 2007*. Bratislava, Slovak University of Technology in Bratislava. 2007. p. 392 - 396. ISBN 978-80-227-2712-9.
- [24] *Fstroj.uniza.sk* [online]. 2010 [cit. 2010-07-29]. Tibor Donic. Dostupné z WWW: <<http://fstroj.uniza.sk/web/kame/personalweb/donic.html#don01>>.

- [25] HÁJEK Jiří. *Titan, hořčík a jejich slitiny* [online]. 2009 [cit. 2010-07-15]. Dostupné z WWW: <<http://ateam.zcu.cz/download/09%20Titan,%20horcik%20a%20jejich%20slitiny%20pro%20DMT.pdf>>.
- [26] HOUSE, Joel W. et al. Estimation of Flow Stress Under High Rate Plastic Deformation. *International Journal of Impact Engineering*. 1995, vol. 16, no. 2, p. 189-200.
- [27] CHEN, W., F. LU and M. CHENG. Tension and Compression Tests of Two Polymers Under Quasistatic and Dynamic Loading. *Polymer testing*. 2002, 21, p. 113-121.
- [28] JONES, S. E. et al. An Elementary Theory for the Taylor Impact Test. *International Journal of Impact Engineering*. 1998, vol. 21, no. 1-2, p. 1-13.
- [29] KAISER, Michael Adam. Advancements in the Split Hopkinson Bar Test. [online]. 1998 s. 94. Dostupný z WWW: <<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-41998-18465/unrestricted/ETD.pdf>>.
- [30] KLEPACZKO, J. R. An Experimental Technique for Shear Testing at High and Very High Strain Rates: The Case of a Mild Steel. *International Journal of Impact Engineering*. 1994, vol. 15, no. 1, p. 25-39.
- [31] LESEUR, Donald R. *Experimental Investigations of Material Models for Ti-6Al-4V Titanium and 2024-T3 Aluminum*. 2000. 41 s. Dostupné z WWW: <<http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar00-25.pdf>>.
- [32] LS-DYNA: Keyword User's Manual. Livermore, 2003. 1564 s.
- [33] *LS-PrePost* [online]. 2010 [cit. 2010-08-07]. LS-PrePost online documentation. Dostupné z WWW: <<http://www.lstc.com/lsp/overview.shtml>>.
- [34] LUETJERING, Gerd and James C. WILLIAMS. *Titanium*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 406 s. ISBN 3-540-42990-5.
- [35] MEYERS, Marc André. *Dynamic Behaviour of Materials*. New York: John Wiley & Sons, 1994. 668 s. ISBN 0-471-58262-X.
- [36] MILANI, A. S. et al. An Improved Multi-objective Identification of Johnson–Cook Material Parameters. *International Journal of Impact Engineering*. 2009, 36, p. 294-302.
- [37] NAKA, Tetsuo et al. The Effects of Temperature and Forming Speed on the Forming Limit Diagram for Type 5083 Aluminium-magnesium Alloy Sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001, no. 113, p. 648-653.
- [38] PAM-CRASH 2G Brochure [online]. 2006 [cit. 2010-07-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.esi-group.com/products/crash-impact-safety/pam-crash/benefits/files/fileinnercontentproxy.2007-11-14.3912970251>>.

- [39] PARK, S. W. and M. ZHOU. Separation of Elastic Waves in Split Hopkinson Bar Using One Point Strain Measurements. *Experimental Mechanics*. 1999, vol. 39, no. 4, p. 287-294.
- [40] PETRUŠKA, Jindřich. *Počítačové metody mechaniky II*. Brno: 2002. 96 s. Dostupné z WWW: <<http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/PocitacoveMetodyII/PocitacovaMechanikaII.pdf>>.
- [41] PETRUŽELKA, Jiří. *Teorie tváření: 1D plasticita*. [online]. [cit. 2008-04-30], s. 1-21. Dostupný z WWW: <<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/TTV/61DPlasticitaTT.pdf>>.
- [42] PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. *Úvod do tváření I*. Ostrava, 2001. 161 s. Dostupný z WWW: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Uvod_TV1.pdf>.
- [43] RAMÍREZ, Horacio and Carlos RUBIO-GONZALEZ. Finite-element Simulation of Wave Propagation and Dispersion in Hopkinson Bar Test. *Materials and Design*. 2004, vol. 27, p. 36-44.
- [44] RULE, William K. and S. E. JONES. A Revised Form for the Johnson-Cook Strength Model. *International Journal of Impact Engineering*. 1998, vol. 21, no. 8, p. 609-624.
- [45] SEO, Songwon, Oakkey MIN and Hyunmo YANG. Constitutive Equation for Ti-6Al-4V at High Temperature Measured Using SHPB Technique. *International Journal of Impact Engineering*. 2005, vol. 31, is. 6, p. 735-754.
- [46] *SVS FEM* [online]. 2010 [cit. 2010-06-18]. Produkty firmy ANSYS Inc. Dostupné z WWW: <<http://www.svsfem.cz/content/produkty-firmy-ansys-inc>>
- [47] *Titanium Alloy Ti 6Al-4V* [online]. 2000-01-07 [cit. 2011-09-04]. Dostupné z WWW: <<http://cartech.ides.com/datasheet.aspx?i=101&E=269>>
- [48] *Thomas-sourmail.org* [online]. 2008 [cit. 2010-07-25]. Coatings. Dostupné z WWW: <<http://www.thomas-sourmail.org/coatings/single-page.html>>.
- [49] UMBRELLO, D., R. M'SAOUBI and J. C. OUTEIRO. The Influence of Johnson-Cook Material Constants on Finite Element Simulation of Machining of AISI 316L Steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007, vol. 47, is. 3-4, p. 462-470.
- [50] XUE, Q., M. A. MEYERS, and V. F. NESTERENKO. Self-organization of Shear Bands in Titanium and Ti-6Al-4V Alloy. In *Acta Materialia*. 2002, vol. 50, is. 3, p. 575-596.
- [51] *ZSC v Plzni* [online]. b.r. [cit. 2001-09-02]. Software - PAM CRASH, PAM SHOCK. Dostupné z WWW: <<http://zsc.zcu.cz/sw/pam-crash.html>>.

PŘEHLED ČLÁNKŮ AUTORA

FOREJT, Milan a Miroslav ŠLAIS, Optimalizace parametrů Hopkinsonova kompresního testu. *Acta Mechanica Slovaca*. 2006. 10.(2B/2006). p. 121 - 128. ISSN 1335-2393.

FOREJT, Milan a Miroslav ŠLAIS. Příspěvek k tvorbě dynamických modelů tvařitelných materiálů. In *15th International Metallurgical & Materials Conference METAL 2006*. Ostrava, Tanger, spol.s r.o., Ostrava. 2006. p. 161/1 (8 p.). ISBN 80-86840-18-2.

ŠLAIS, Miroslav. Vliv délky impaktoru na průběh zatěžujících pulzů u Hopkinsonova kompresního testu. In *8th. International Conference FORM 2006, Forming Technology, Tools and Machines*. Brno, Brno University of Technology. 2006. p. 6-1 (6 p.). ISBN 80-214-3231-4.

ŠLAIS, Miroslav a Milan FOREJT. Hopkinson pressure bar method applied to plastic materials. In *14th International Scientific Conference CO-MAT-TECH 2006*. Trnava, Vydavateľstvo STU v Bratislave. 2006. p. 1253 - 1257. ISBN 80-227-2472-6.

ŠLAIS, Miroslav. Zjišťování dynamických mechanických vlastností slitiny Ti-6Al-4V metodou Hopkinsonova testu. In *FSI junior konference 2006*. 1. Brno, FSI VUT v Brně. 2007. p. 1 - 5. ISBN 978-80-214-3364-9.

FOREJT, Milan a Miroslav ŠLAIS. Dynamic behaviour of titanium alloy Ti-6Al-4V at increased temperature. In *Proceedings of abstracts and papers METAL 2007*. TANGER, s.r.o. Ostrava, TANGER, s.r.o. 2007. p. 165/1 (7 p.). ISBN 978-80-86840-33-8.

FOREJT, Milan a Miroslav ŠLAIS. Problems of measuring dynamic compression forces. In *Book of Abstracts and Proceedings of papers-CD ROM 10th International Conference TECHNOLOGY 2007*. Bratislava, Slovak University of Technology in Bratislava. 2007. p. 392 - 396. ISBN 978-80-227-2712-9.

ŠLAIS, Miroslav, Milan FOREJT and Petr BĚLSKÝ. Dynamical behaviour of aluminium alloys under repeated loading. *Acta Mechanica Slovaca*. 2008. 12(3-A). p. 473 - 478. ISSN 1335-2393.

ŠLAIS, Miroslav, Milan FOREJT a Petr BĚLSKÝ. Chování hliníkových slitin za podmínek dynamického zatěžování. *Kovárenství*. 2008. 2008(33). p. 107 - 110. ISSN 1213-9289.

ŠLAIS, Miroslav a Milan FOREJT. Study of dynamic behaviour of Ti-6Al-4V titanium alloy. In *Steel Research International*. Special Edition. Düsseldorf, Verlag Stahleisen GmBH. 2008. p. 693 - 697. ISBN 978-3-514-00754-3.

ŠLAIS, Miroslav, Kamil PODANÝ, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Milan FOREJT. Statické a dynamické mechanické chování oceli 17 240. In *International Scientific Conference PRO-TECH-MA 2009, Progressive Technologies and Materials*. Rzeszów, Politechnika Rzeszów. 2009. p. 262 - 266. ISBN 978-83-7199-550-7.

ŠLAIS, Miroslav a Milan FOREJT. Faktory ovlivňující kvalitu snímaného signálu u Hopkinsonova testu. In *11th international Conference TECHNOLOGY 2009*. Bratislava, STU FSj. 2009. p. 431 - 434. ISBN 978-80-227-3135-5.

ŠLAIS, Miroslav, Milan FOREJT and Martin KNEBL. Experimental Studies on the Relation Between Microstructure and Mechanical Properties. In *6th International Conference on Materials Structure & Micromechanics of Fracture (MSMF-6)*. Brno, VUTIUUM. 2010. p. 109 - 112. ISBN 978-80-214-4112-5.

ŠLAIS, Miroslav a Milan FOREJT. Možnosti inovace měření dynamických sil. *Kovárenství*. 2010. 2010(38). p. 105 - 108. ISSN 1213-9289.

ŠLAIS, Miroslav, Martin KNEBL and Milan FOREJT. Evaluation of dynamic forces established during the Taylor Anvil Test. *MM Science Journal*. 2010. 2010(4). p. 214 - 216. ISSN 1803-1269.

DOHNAL, Ivo, Miroslav ŠLAIS, Milan FOREJT a Radko SAMEK. Dynamické tahové zkoušky plochých tyčí Hopkinsonovým testem. *Kovárenství*. 2011. 2011(40). p. 50 - 52. ISSN 1213-9289.

CURRICULUM VITAE

Osobní údaje

Jméno: **MIROSLAV ŠLAIS, Ing.**

Datum narození: 20.12.1981

Adresa: Brněnská Pole 3, Šlapanice

E-mail: miroslav.slais@gmail.com

Státní příslušnost: česká

Dosažené vzdělání

Vysoké učení technické v Brně: 2000 - 2005

Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů

Téma diplomové práce: Výroba součástí technologií přesného stříhání

Gymnázium B. Němcové, Hradec Králové: 1994 - 2000

všeobecné zaměření

Pracovní zkušenosti

Učitel odborných předmětů, 2008 – dosud

SOŠ a SOU strojírenské a elektrotechnické, Brno, Trnkova 113

Asistent, 2005 - dosud

Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně

Vyučované předměty: Teorie tváření, Experimentální metody, Výrobní technologie

Ostatní znalosti

Počítače:

Windows, Microsoft Office - pokročile

AutoCad, Autodesk Inventor, SolidWorks - pokročile

Jazyk:

anglický jazyk - pokročile

německý jazyk - základy

Zájmy

Cykloturistika, cestování.

ABSTRAKT

Disertační práce pojednává o vlivu teploty a rychlosti deformace na mechanické vlastnosti titanové slitiny Ti-6Al-4V. Po provedení ověřovacích testů za statických podmínek zatěžování byly vzorky z této slitiny deformovány za vysokých rychlostí deformace a zvýšených teplot na zařízení pro Hopkinsonův test. Výsledkem jsou závislosti napětí a rychlosti deformace na deformaci v rozmezí teplot 20 – 500 °C. Deformovaný tvar vzorku z Taylorova testu je porovnán s výsledky simulace programu ANSYS LS-DYNA. Z provedených experimentů byly stanoveny parametry Johnson-Cookovy rovnice. Dále byl zkoumán vliv podmínek zatěžování na mikrostrukturu. Pozorování byla provedena na optickém a řádkovacím elektronovém mikroskopu. V průběhu zkoumání byly na experimentálních zařízeních provedeny úpravy, které vedou k potlačení vysokofrekvenčních složek a šumů na snímaných pulzech. Pro zařízení pro Hopkinsonův test byl vyvinut funkční adaptér k tahovým zkouškám, který je veden Úřadem průmyslového vlastnictví pod čís. 21472.

ABSTRACT

The PhD thesis deals with the influence of temperature and strain rate on the mechanical behaviour of the Ti-6Al-4V titanium alloy. After verification tests under static loading conditions, the samples were deformed at high strain rates and elevated temperatures, using device for Hopkinson pressure bar test. The result is dependence of stress and strain rate on strain in the temperature range of 20 to 500 °C. The deformed shape of specimen from the Taylor anvil test is compared with the results of the simulation in the ANSYS LS DYNA software. The parameters of Johnson-Cook equation were determined from these experiments. Also, the influence of loading conditions on the microstructure was studied. Both optical and scanning electron microscopes were used for the observations. During the research, some adjustments to the experimental devices were made in order to suppress the high-frequency components and noise in the recorded pulses. A functional tensile test adapter for the Hopkinson test was developed; it is registered under No. 21472 at the Industrial Property Office.