

Recenzované výzkumné články

Dynamické chování vysokopevných pancéřových ocelových plechů

Dynamic Behavior of High Strength Armor Steel Plates

Ing. Radek Tomášek; Ing. Vratislav Mareš

VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Regionální materiálově technologické výzkumné centrum, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, Česká republika

Příspěvek je zaměřen na vyhodnocení chování pancéřových ocelí a změn jejich mechanických vlastností při vysokorychlostním tahovém testu. Ke studiu byly zvoleny dvě oceli Armox 500T a Secure 500. Jedná se o nízkolegované středně uhlíkové oceli s mikrostrukturou popuštěného martenzitu obdobných mechanických vlastností určených zejména pro ochranu lehce pancéřovaných vozidel v komerční sféře. V rámci experimentálního programu byla nejprve provedena zkouška tvrdosti a vyhodnocena mikrostruktura. Před vlastním vysokorychlostním tahovým testem byla provedena kvazistatická tahová zkouška, kdy získané hodnoty posloužily zejména jako referenční pro zkoušky při vysoké rychlosti deformace, které byly provedeny při vybraných rychlostech deformace 100 – 400 s⁻¹. Zaznamenané změny byly zhodnoceny v příslušných grafických závislostech. Vzorky po mechanickém zkoušení byly následně podrobeny fraktografickému rozboru.

Klíčová slova: pancéřová ocel; tahová zkouška; vysoká rychlost deformace; citlivost na rychlost deformace

High strength armor steels are utilized especially for the ballistic and shock protection of automobiles and combat vehicles, therefore knowledge of their behavior under conditions of dynamic loading is required. The authors investigated in this paper response to dynamic loading of the chosen mid-carbon armor steels Armox 500T and Secure 500. Tensile specimens were prepared from steel sheets in order to study and describe change in behavior of steels in terms of their mechanical properties. Set of specimens was tested in the ~~it~~ quasi-static tensile test with the strain rate of 1·10⁻³ s⁻¹ in the first mechanical test. Consequently, high-speed tensile test was conducted on servo hydraulic test machine INSTRON VHS 80-20 capable of producing high deformation speeds. Steel specimens were tested at four different values of strain rate within the range of 100 s⁻¹ to 400 s⁻¹, in the intermediate region, where the data were not well established. Prior to this part of experimental procedure, hardness test HV10 along with microstructure observation was conducted. Results showed higher hardness of the Secure 500 steel with average value of 508 HV while no significant difference was found in terms of steels microstructure, which consisted of tempered martensite. Quasi-static tensile test confirmed material properties specified by the manufacturer. Most importantly its values served as a reference to high strain rate tensile test. Obtained stress-strain diagrams from high speed tensile test showed very low strain-rate hardening effect at investigated strain rates and next to zero strain rate sensitivity of the yield strength value. Behavior of rising total elongation at fracture with an increasing strain rates was observed. Steel Armox 500T reached higher elongation values for the whole applied strain rate range. Deformation energy density was calculated from the area under stress-strain curves and temperature rise due to adiabatic heating was estimated. Due to higher total elongation, the steel grade Armox 500T was able absorb higher deformation energy.

Key words: armor steel; tensile test; high strain rate; strain rate sensitivity

Rostoucí požadavky na vysokou houževnatost společně s vynikajícími pevnostními hodnotami ocelí, které zároveň musí splňovat technologické podmínky tvařitelnosti a svařitelnosti, si vynucují často i znalost mechanických vlastností při dynamickém namáhání. Zejména u pokročilých vysoko pevných ocelí [1], určených pro výrobu bezpečnostních dílů a konstrukcí, jakými jsou pancíře osobních automobilů nebo bojových vozidel, je znalost mechanického chování při dynamickém rázu nevyhnutelná. Dosažení požadované bezpečnosti vozidel nezá-

leží jen na tloušťce pancéřování, ale také na odolnosti materiálu proti lokalizované vysokorychlostní deformaci při explozi anebo balistickému dopadu projektilů. Znalost dynamického chování pancéřových plechů v závislosti na rychlosti deformace je jedním ze základních předpokladů optimalizovaného designu pancéřových konstrukčních dílů, vedoucí k redukci tloušťky pancíře a snížení hmotnosti pancéřovaných vozidel. Pancéřové oceli jsou často nízkolegované středně uhlíkové oceli, které jsou tepelně zpracovány tak, aby jejich

mikrostrukturu tvořil popuštěný martenzit, který poskytuje ideální kombinaci pevnosti a tažnosti. Odezva pancéřových ocelí na zatížení po krátký časový interval musí být studována k pochopení fenoménu balistických dopadů a vytváření spolehlivých předpovědí chování.

Oproti kvazistatickému zatěžování se při vysokých rychlostech deformace mikromechanismy plasticity a iniciace lomu velmi výrazně mění. Je známo, že vysokorychlostní deformace je adiabatický proces, při kterém je značná část plastické práce přeměněna na teplo, které nemá dostatek času k disipaci předtím, než skončí vlastní deformační proces. Nárůst teploty při adiabatické deformaci snižuje schopnost materiálu k plastickému toku. Proto bývá velmi důležité stanovit podíl plastické práce přeměněné na teplo [2].

Během deformace za adiabatických podmínek se vyskytují dva protichůdné pochody: deformační zpevnění a deformační změkčení, působící za nízkých, respektive vysokých rychlostí deformace. Pro vysokorychlostní plastickou deformaci kovů je v případě extrémní lokalizace deformace typický vznik adiabatických skluzových pásů (ASB) [2 – 4], které vykazují ve srovnání s okolní maticí vysokou lokalizovanou smykovou deformaci. Nárůst teploty v ASB může činit až několik stovek stupňů ve velmi úzkém pásu matrice. U plastických materiálů je rychlost deformace potřebná k jejich výskytu vyšší než u materiálů zpevněných. Jak prokázal Bassim [4], u ocelí vznikají adiabatické skluzové pásy na strukturních defektech a nehomogenitách. Adiabatické skluzové pásy jsou také iniciační místa mikrotrhlin. [3].

Vznik adiabatických skluzových pásů je ovlivněn také koeficientem deformačního zpevnění, citlivostí na rychlost deformace, aplikovanou rychlostí deformace a teplotou. Vliv těchto parametrů na dynamickou mez kluzu se většinou popisuje konstitučními modely, které předpovídají chování materiálů za vysokých rychlostí deformace a zvýšených teplot. Konstituční rovnice lze rozdělit do dvou skupin. První jsou empirické rovnice, které zahrnují vliv deformačního zpevnění, tepelného změkčení a vlivu rychlosti deformace. Asi nejčastěji používaný zástupce této skupiny je Johnson-Cookův model [5]. Druhou skupinu tvoří modely založené na mikrostruktuře a na tepelně aktivovaném pohybu dislokací. Patří sem mimo jiné modely Follansbee a Kockse, Zerilli-Armstrongův model [6], Voyiadjis a Abedův model [7]. Výhodou Johnson-Cookova modelu je relativní snadnost obdržení potřebných materiálových parametrů. Přesto se pro lepší korelaci s experimentálními výsledky dočkal širokého uplatnění zejména Zerilli-Armstrongův model. Potřeba stále přesnějšího popisu chování kovů za vysokých rychlostí deformace vede k neustálému rozvoji nových modelů. Příkladem může být modifikovaný Johnson-Cookův model, modifikovaný Khan-Huangův model nebo model vyvinutý Huhem [8].

Výzkum dynamických vlastností vysokopevných pancéřových ocelí jde ruku v ruce s jejich vývojem. V řadě

prací je testováno jejich chování při vysokorychlostní tahové zkoušce prováděné metodou Hopkinsonovy dělené tyče (SHPB), kterou lze dosáhnout deformačních rychlostí až v rozsahu $10^3 - 10^4 \text{ s}^{-1}$. Lach společně s Nahmem [9] a Koerbrem [10] studovali navíc důsledky takovýchto testů na mikrostrukturu ocelí. Oceli ArmoX 500T a jejímu dynamickému chování na SHPB zařízení za různých teplot se věnovali Iqbal a Senthil [11]. Jejich výzkum zahrnoval také chování materiálu API projektilů a následné nalezení parametrů pro Johnson-Cookův model. Kalibrace modelu byla následně validována numerickou simulací. Nilsson [12] pak provedl experimentální vyšetření a nalezení parametrů pro 4 různé konstituční modely u ocelí ArmoX 500T a 600T při různých rychlostech deformace a různých teplotách.

Tato práce se zaměřuje na chování ocelí ArmoX 500T a Secure 500, stanovení základních mechanických charakteristik a jejich dynamického chování při vyšetřovaných středních rychlostech deformace, nižších než dosahovaných při SHPB metodě.

1. Experimentální procedura

Materiálem použitým v experimentech byly plechy z pancéřových ocelí ArmoX 500T a Secure 500. Jedná se o oceli se středním obsahem uhlíku, které jsou tepelně zpracovány – kaleny a popuštěny. Jejich chemické složení dle specifikace výrobců je uvedeno v tab. 1, mechanické vlastnosti v tab. 2.

Tab. 1 Chemické složení hodnocených ocelí (hm. %) [13, 14]

Tab. 1 Chemical composition of steels (wt. %) [13, 14]

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
ArmoX 500T	0,32	0,4	1,2	1,0	1,8	0,7
Secure 500	0,32	0,4	1,0	1,5	0,6	3,7

Tab. 2 Mechanické vlastnosti ocelí [13, 14]

Tab. 2 Mechanical properties of selected steels [13, 14]

Ocel	$R_{p0,2}$	R_m	A	HBW
	(MPa)		(%)	
ArmoX 500T	1250	1450	8	480 – 540
Secure 500	1300	1600	9	480 – 530

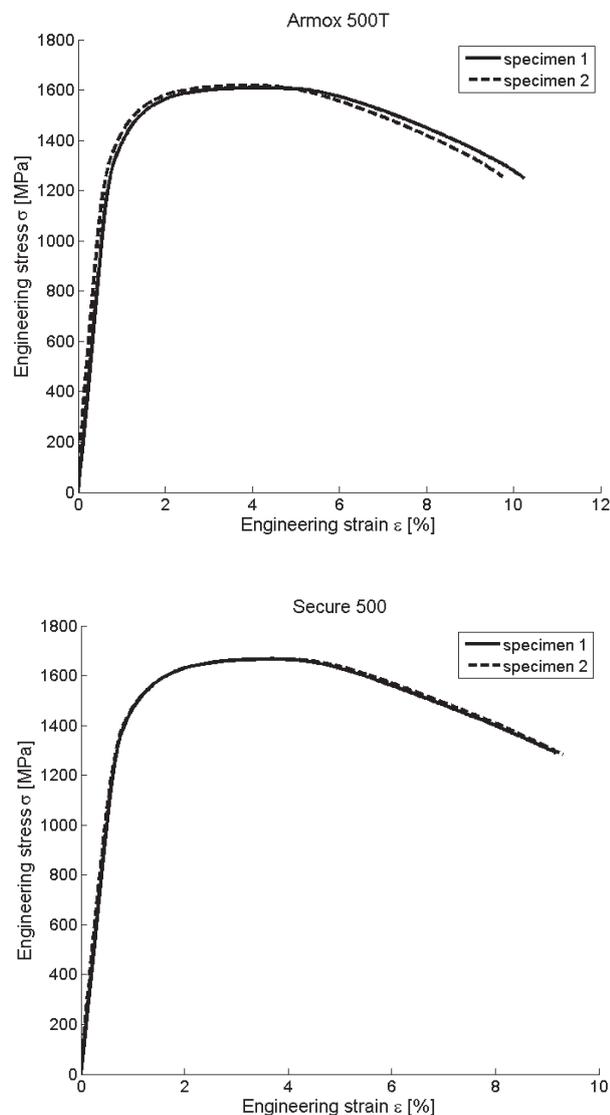
Měření tvrdosti, metalografie

Na přístroji Zwick ZHU2,5 byla měřena tvrdost $HV10$ obou ocelí sérií pěti vpichů v příčném i podélném směru vzhledem ke směru tváření. Ze stanovených hodnot tvrdosti lze empiricky určit přibližnou hodnotu meze pevnosti. Ocel ArmoX 500T byla tvrdší v podélném směru, průměr všech měření je 495,2 $HV10$. Ocel Secure 500 pak tvrdší v příčném směru a průměrná tvrdost $HV10$ je 507,8. Obě hodnoty průměrné tvrdosti jsou ve spodní části spektra tvrdosti garantované výrob-

cem (491, respektive 499 *HBW*) a na základě těchto výsledků lze očekávat vyšší pevnost oceli Secure 500. Byl také proveden metalografický výbrus a pozorována mikrostruktura obou ocelí tvořená martenzitickou popuštěnou strukturou.

Kvazistatický tahový test

Kvazistatický tahový test byl proveden při rychlosti deformace $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ strojem Zwick Z150 za pokojové teploty. Zkouška byla pro každý materiál provedena dvakrát. Získané tahové diagramy v souřadnicích napětí – deformace pro obě oceli jsou znázorněny na obr. 1. Získané hodnoty mechanických vlastností shrnuje tab. 3. Mez kluzu byla odečtena metodou smluvní meze kluzu 0,2 % celkové deformace. Ocel Secure 500 dosáhla vyšších průměrných hodnot meze kluzu – 1427 MPa a pevnosti 1667 MPa. Ocel ArmoX 500T pak v průměru meze kluzu 1342 MPa a pevnosti 1614 MPa.



Obr. 1 Diagramy napětí – deformace zkoušky tahem
Fig. 1 Stress-strain diagrams of quasistatic tensile test

Tab. 3 Získané mechanické vlastnosti při zkoušce tahem
Tab. 3 Obtained mechanical properties

Ocel	Vzorek č.	<i>E</i>	<i>Rp</i> _{0,2}	<i>R_m</i>	<i>A</i> ₅₀
		(GPa)	(MPa)		(%)
SECURE 500	1	206	1423	1667	9,2
	2	209	1430	1667	9,3
ARMOX 500T	1	208	1309	1609	10,2
	2	211	1374	1618	9,7

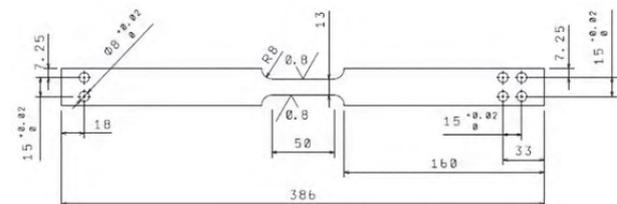
Vysokorychlostní tahový test

Vysokorychlostní tahová zkouška byly provedena na stroji INSTRON VHS 80/20. Je to servo-hydraulický přístroj, který umožňuje pohyb pístu, na kterém jsou upevněny horní čelisti, maximální rychlostí 20 m·s⁻¹. To umožňuje dosáhnout rychlosti deformace $\dot{\epsilon}$ v řádu 10² s⁻¹, a to v závislosti na použité měřené délce těles dle vztahu (1), který uvažuje homogenní deformaci tělesa [15].

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{l_e}, \quad (1)$$

kde *v* je posuvná rychlost pístu a *l_e* zkoušená délka.

Na obr. 2 je vykreslena technická dokumentace vzorků z ocelových plechů použitých při mechanických zkouškách materiálu. Rozměry zkušebních těles pro vysokorychlostní zkoušky nejsou normovány. Existuje řada možných tvarů zkušebních těles s různými zkoušenými délkami a přechodovými poloměry. Zkoušená délka byla zvolena 50 mm při tloušťce vzorků 4 mm.

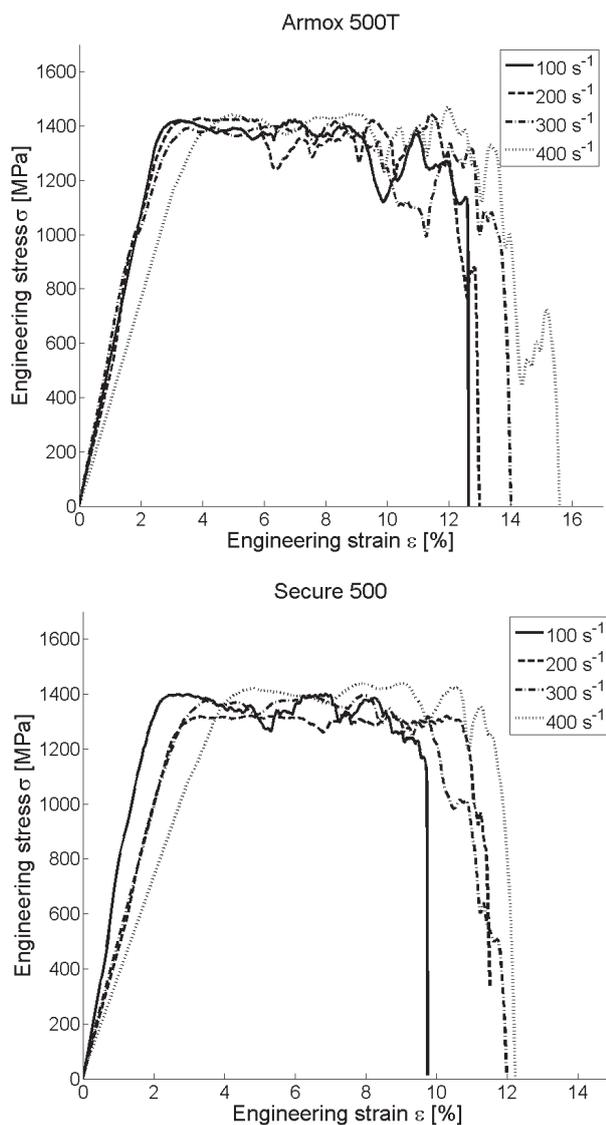


Obr. 2 Geometrie použitých vzorků
Fig. 2 Test specimen geometry

Vysokorychlostní test je vykonáván pístem, který je obsluhován hydraulicky a je upevněn na příčnicku. K dosažení požadované zkušební rychlosti pístu slouží adaptér, který umožňuje volný pohyb čelistí nad zkušebním přípravkem během akcelerace pístu. Čelisti jsou v této pozici udržovány klínem a jsou před každým testem utaženy momentovými šrouby. Po jisté dráze pohybu pístu jsou klíny vyraženy a dojde k sevření čelistí v důsledku předpětí vloženému do šroubů. V této chvíli dochází k vlastnímu působení síly na zkoušený vzorek. Data o průběhu síly jsou snímána piezoelektricky.

Při vysokorychlostním zkoušení se vyskytuje fenomén oscilací silového signálu – tzv. load cell ringing. Když dojde k uvolnění klínů a sevření čelistí, při jejich styku s přípravkem vzniká impuls, který dále putuje vzorkem a způsobuje rezonanci systému na přirozené frekvenci, která se projevuje oscilacemi hodnot síly v závislosti na čase. Navíc, aby byl materiál ve stavu napěťové rovnováhy, musí v něm tam a zpět putovat napěťové vlny [16]

a fenomén je podpořen vzájemnou superpozicí obou vlnění. Pokud není systém patřičně tlumen, impuls vložený zatížením vyvolává zmíněné oscilace, které v extrémních případech můžou způsobit takové napětí, které vyvolá přetržení vzorku na jednom konci, zatímco druhá strana podstoupí pouze malou deformaci. V případě testů pancéřových ocelí v této práci nejsou oscilace signálu významné a jsou považovány za přijatelné dle obecné metodiky vysokorychlostního testování SAE [16].

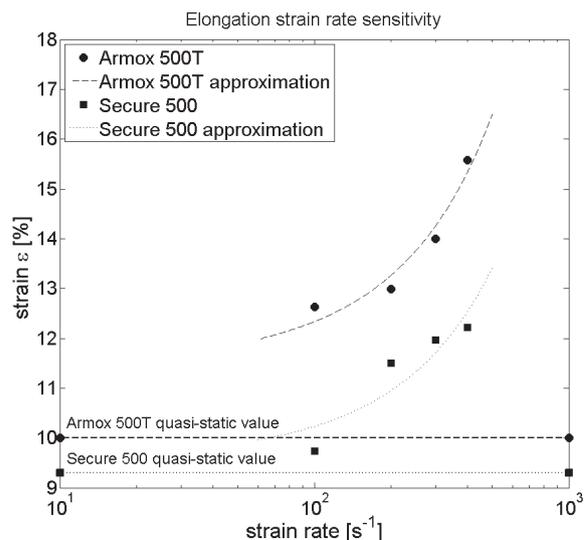


Obr. 4 Křivky napětí – deformace hodnocených ocelí při různých rychlostech deformace
Fig. 4 Stress – strain curves of evaluated steels for all investigated strain rates

Při vysokorychlostním tahovém testu byly vzorky ocelí testovány při rychlostech pohybu pístu 5, 10, 15 a 20 m·s⁻¹, což odpovídá rychlostem deformace $\dot{\epsilon} = 100, 200, 300$ a 400 s⁻¹ při použité zkoušené délce. Záměrem testu bylo vyhodnotit případné změny mechanických vlastností ocelí s nárůstem rychlosti deformace mezi sebou i vůči kvazistatickému tahovému testu. Získané deformační křivky v souřadnicích napětí – deformace znázorňuje obr. 4. Je zřejmé, že za dynamických

podmínek zatěžování se chování ocelí mění a nedochází k registrovatelnému dynamickému zpevnování. Toto je možno vysvětlit tak, že při pomalé plastické deformaci se generují v materiálu dislokace, které brání dalšímu postupu deformace. Avšak při vysoké rychlosti deformace, se v krátkém časovém úseku nevytvoří dostatečná hustota dislokací a materiál vykazuje nižší plasticitu. Navíc materiál může být ovlivňován změkčením v důsledku adiabatického ohřevu, který se u kvazistatického testu neprojevuje [17].

Hodnota meze kluzu při testovaných rychlostech deformace nevykazuje citlivost na nárůst $\dot{\epsilon}$ a její hodnoty jsou u obou ocelí srovnatelné s hodnotou získanou při kvazistatických tahových testech. Sklon lineární elastické oblasti je při vysokých rychlostech deformace často nesprávný. Hodnoty síly a posunutí jsou ovlivněny inerciálním efektem náhlé aplikace tahové síly. S rostoucí $\dot{\epsilon}$ dochází u obou ocelí k nárůstu tažnosti, ve větší míře u oceli ArmoX 500T než u oceli Secure 500. Výsledky tažností i vůči kvazistatickému tahovému testu jsou vyneseny v grafické závislosti na obr. 5. Zde lze pozorovat exponenciální závislost, která je vyznačena proloženou aproximací.



Obr. 5 Závislost tažnosti na rychlosti deformace
Fig. 5 Dependence of elongation on the strain rate

Hustota deformační energie

Z hlediska nárazové a balistické odolnosti pancéřových ocelí je příhodné uvažovat celkovou deformační energii spotřebovanou v průběhu testu. Deformační energie je rovna vykonané práci potřebné ke zvyšování napětí a závisí na velikosti tělesa. Aby se eliminoval tento efekt a pozornost byla věnována vlastnostem materiálu, uvádí se deformační energie vztažená na jednotku objemu. Při jednoosé napjatosti platí integrační vztah (2), kde je hustota deformační energie u funkcí napětí σ a poměrné deformace ϵ . Je tedy rovna velikosti plochy pod křivkou v diagramu napětí – deformace. Tato plocha, nazývaná těž tahová lomová houževnatost, souvisí se schopností materiálu odolat náhlému zatížení. Vypočtené hodnoty uvádí tab. 4.

$$u = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (2)$$

Tab. 4 Vypočtené hodnoty hustoty deformační energie
Tab. 4 Calculated values of strain energy density

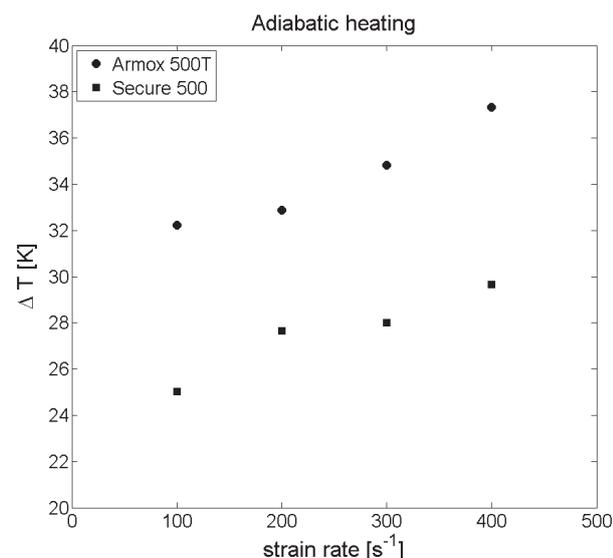
$\dot{\varepsilon}$ (s ⁻¹)	1·10 ⁻³	100	200	300	400
	(MJ·m ⁻³)				
Armox 500T	114,4	151,8	154,8	164,1	175,9
Secure 500	110,7	117,9	130,2	132,0	139,7

Adiabatický ohřev

Jak bylo uvedeno, deformace materiálu při dynamickém zatížení je adiabatický proces. V důsledku nemožnosti disipace tepla v krátkém časovém intervalu se část plastické práce podílí na ohřevu materiálu. Nárůst teploty ΔT lze vypočítat podle vztahu [2, 12, 17]:

$$\Delta T = \frac{\eta}{\rho c_p} \int \sigma d\varepsilon, \quad (3)$$

kde ρ je hustota, pro obě oceli 7850 kg·m⁻³, a c_p je specifická tepelná kapacita. Pro středně uhlíkové oceli lze uvažovat její hodnotu 465 J·kg⁻¹·K⁻¹. Parametr η je podíl plastické práce přeměněné na teplo. Protože konkrétní změna teploty nebyla měřena, není možné teplotní změnu určit přesně, pouze na základě uvedeného vztahu předpokládat. Podíl práce přeměněné na teplo není fixní hodnotou a touto problematikou se zabývalo mnoho autorů. Hodnota η se udává v rozmezí 0,9 – 0,95 pro vysoké rychlosti deformace $\dot{\varepsilon}$ a pro střední hodnoty $\dot{\varepsilon}$ v rozmezí 0,73 – 0,75. [15]. Predikované hodnoty adiabatického ohřevu pro $\eta = 0,75$ obou ocelí jsou uvedeny na obr. 6. Pokud by bylo uvažováno $\eta = 0,9$, změna teploty by byla až 45 K. K přesnému stanovení by bylo třeba využít například infračervenou techniku snímání teploty povrchu těles. Přesto lze říci, že vypočtené hodnoty nejsou natolik vysoké, aby přímo způsobovaly změkčení materiálu.

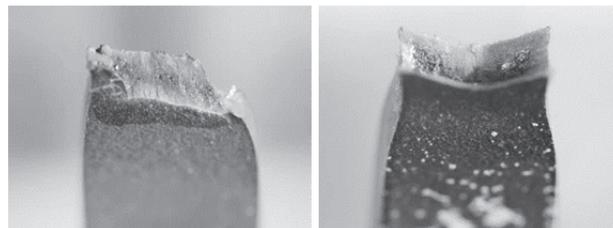


Obr. 6 Vypočtený nárůst teploty v závislosti na rychlosti deformace pro $\eta = 0.75$

Fig. 6 Calculated value of temperature rise due to strain rate for $\eta = 0.75$

Fraktografie lomových ploch

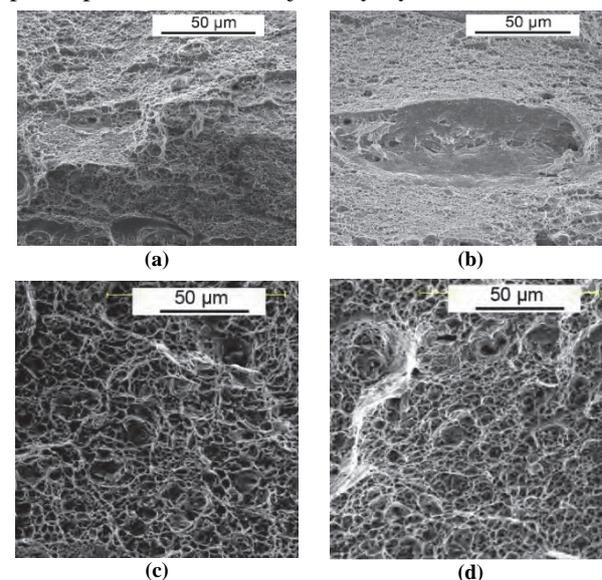
Obr. 7 ukazuje makrofotografie lomových ploch obou ocelí po aplikovaných rychlostech deformace. Je zde patrný odlišný makroskopický projev lomových ploch. U oceli Armox 500T je lomová plocha orientována ke směru působící síly pod úhlem přibližně 45° vůči směru zatížení, tudíž odpovídá rovinám s největším smykovým napětím. U oceli Secure 500 je iniciační lomová plocha kolmá na směr zatížení a lom lze popsat jako smykový středový. Obě oceli byly zatěžovány stejným způsobem ve směru podélné osy vzorků.



Obr. 7 Fotografie přetržených vzorků oceli Armox 500T (a) a Secure 500(b) při rychlosti deformace 300 s⁻¹

Fig. 7 Photography of Armox 500T (a) and Secure 500(b) after applied strain rate of 300 s⁻¹

Fraktografické pozorování lomů na obr. 8 v SEM prokázalo houževnatý charakter lomu, který tvoří charakteristické lasturovité jamky. V případě obou ocelí dochází s rostoucí rychlostí deformace ke zmenšování velikosti jamek. To ukazuje na lokalizovaný nárůst deformace, kratší časový úsek mezi počátkem tvorby dutin a přetržením tělesa a celkově lepší plasticitu za vysoké deformace. Na dně jamek nebyly pozorovány sekundární částice nebo karbidy. Na lomové ploše oceli Secure 500 se na lomové ploše vyskytovala při deformační rychlosti 400 s⁻¹ dutina o rozměru přibližně 120 μm, s největší pravděpodobností související s výskytem vměstku.



Obr. 8 Snímky lomových ploch v SEM (a) Secure 500 – 100 s⁻¹ (b) Secure 500 – 400 s⁻¹ (c) Armox 500T – 100 s⁻¹ (d) Armox 500T – 400 s⁻¹

Fig. 8 SEM photographs of fracture surfaces (a) Secure 500 – 100 s⁻¹ (b) Secure 500 – 400 s⁻¹ (c) Armox 500T – 100 s⁻¹ (d) Armox 500T – 400 s⁻¹

2. Diskuse výsledků

Byly provedeny kvazistatické a vysokorychlostní tahové testy pancéřových ocelí ArmoX 500T a Secure 500. Získané informace z průběhu testů byly porovnány vůči sobě i vůči kvazistatickému zatěžování. Na přetržených vzorcích byla provedena fraktografická analýza v SEM.

Tahové testy v rozmezí rychlosti deformace od 100 do 400 s⁻¹ prokázaly, že dynamická mez kluzu s rostoucí rychlostí deformace v uvedeném rozmezí nevykazuje zjevný nárůst, a to ani vzhledem k testům při kvazistatickém zatěžování. V mnoha případech vysokorychlostní tahové deformace byl pozorován superexponenciální trend citlivosti meze kluzu na rychlost deformace, která je velmi nízká při malých rychlostech a narůstá až po dosažení jisté výše hodnot [18]. V případě hodnocených vysoko pevných pancéřových ocelí se může tato prahová hodnota blížit až $\dot{\epsilon} = 1000 \text{ s}^{-1}$ [12]. Při kvazistatickém zatížení dochází po překročení meze kluzu k deformačnímu zpevnování, ale při vyšších rychlostech deformace se tak neděje s tím, že by úroveň deformačního zpevnění bylo možno technicky registrovat.

Vliv rychlosti deformace byl pozorován na tažnosti obou testovaných ocelí, která se zvyšuje s rostoucí rychlostí deformace, přičemž ocel ArmoX 500T dosahuje vyšších hodnot tažnosti při všech rychlostech deformace než ocel Secure 500T. Při nejvyšší deformační rychlosti 400 s⁻¹ dosahuje tažnost oceli ArmoX 500T hodnoty 15,58 %, u oceli Secure 500 je to 12,22 %.

Fraktografie lomových ploch po vysokorychlostní deformaci u obou testovaných ocelí prokázala, že lom má houževnatý charakter s jamkovou morfologií. S rostoucí rychlostí deformace dochází ke zmenšování velikostí jamek. To ukazuje na silnou lokalizaci plastické deformace a růst její intenzity. Z makroskopického hlediska se lomy obou druhů oceli liší. Ocel Secure 500 byla porušena smykovým středovým lomem kolmým na směr zatížení. U oceli ArmoX 500T byl pozorován čistě smykový lom.

Závěr

Experimentální výsledky lze ve shodě s poznatky z literárních zdrojů shrnout do těchto závěrů:

- Dynamická mez kluzu hodnocených pancéřových ocelí nevykazuje citlivost na změny rychlosti deformace.
- Při vysokorychlostní tahové deformaci nedochází k registrovatelnému dynamickému zpevnění studovaných ocelí.
- Byl pozorován nárůst tažnosti u obou hodnocených ocelí s rostoucí rychlostí deformace.
- Dosažením vyšších hodnot tažnosti při všech rychlostech deformace je ocel ArmoX 500T schopna absorbovat více deformační energie.
- Z fraktografického rozboru je patrný houževnatý charakter lomu a lokalizace deformace s nárůstem deformační rychlosti.

Acknowledgements

The work presented in this article was supported by the project No. LO1203 "Regional Materials Science and Technology Centre - Feasibility Program" funded by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic.

Literatura

- [1] JI-HOON KIM, DAEYONG KIM, HEUNG NAM HAN, F. BARLAT, MYOUNG-GYU LEE. Strain Rate Dependent Tensile Behaviour of Advanced High Strength Steels: Experiment and Constitutive Modeling. *Materials Science and Engineering: A*, 559 (1. Jan.2013) 222–231.
- [2] WOEI-SHYAN LEE, CHEN-YANG LIU. The Effects of Temperature and Strain Rate on the Dynamic Flow Behaviour of Different Steels. *Materials Science and Engineering: A*, 426, Issues 1-2 (2006) June, 25, 101–113.
- [3] BASSIM, M.N., PANIC, N. High Strain Rate Effects on the Strain of Alloy Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93 (1999), 481–485.
- [4] BASSIM, M.N. Study of the Formation of Adiabatic Shear Bands in Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 119 (2001), 234–236.
- [5] JOHNSON, G.R. COOK, A. Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures. In: *7th Int. Symp. on Ballistics*, Hague, Netherlands, April 1983, pp. 541–547
- [6] ZERILLI, F.J., ARMSTRONG, R.W. 1987. Dislocation-mechanics Based Constitutive Relations for material dynamics calculation. *J. Appl. Phys.*, 61 (1987) 5, 1816–1825.
- [7] VOYADJIS, G.Z, ABED, F.H. Microstructural Based Models for BCC and FCC Metals with Temperature and Strain Rate Dependency. *Mechanics of Materials*, 37, Issues 2-3 (2005) Feb.-March, 355–378.
- [8] OON HUH, KWANGHYUN AHN, JI KO LIM, HYUNG WON KIM, LEE JU PARK: Evaluation of Dynamic Hardening Models for BCC, FCC, and HCP Metals at a Wide Range of Strain Rates. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, Issue 7 (2014) July, 1326–1340.
- [9] NAHME, H., LACH, E. Dynamic Behavior of High Strength Armor Steels. *Journal de Physique IV Colloque* (1997) 07 (C3), pp.C3-373-C3-378.
- [10] LAECH, E., KOERBER, G., SCHARF, M., BOHMANN, A. Comparison of Nitrogen Alloyed Austenitic Steels and High Strength Armor Steels Impacted at High Velocity. *International Journal of Impact Engineering*, 23 (1999) 1, 509–517.
- [11] IQBAL, M.A., SENTHIL, K., SHARMA, P., GUPTA, N.K. An Investigation of the Constitutive Behaviour of ArmoX 500T Steel and Armor Piercing Incendiary Projectile Material. *International Journal of Impact Engineering*, 96 (2016) Oct., 146–164.
- [12] NILSSON, M. *Constitutive Model for ArmoX 500T and ArmoX 600T at Low and Medium Strain Rates*. (Technical report) Dec. 2003. ISSN 1650-1942.
- [13] ArmoX 500T Data sheet. [online]. [Cit. 27.11.2017]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/products/brands/armox/armox-500t>
- [14] SECURE 500 Data Sheet. [online]. [Cit. 27.11.2017]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/products/heavy-plate/ballistic-steel/secure/productpage-secure.html>
- [15] RAISCH, S.R., MÖGINGER, B. High Rate Tensile Tests – Measuring Equipment and Evaluation. *Polymer Testing*, 29, Issue 2 (2010) April, 265–272.
- [16] XINRAN XIAO Dynamic Tensile Testing of Plastic Materials. *Polymer Testing*, 27, Issue 2 (2008) April, 164–178.
- [17] FEI FENG, SHANGYU HUANG, ZHENGHUA MENG, JIANHUA HU, YU LEI, MENGCHENG ZHOU, DAN WU, ZHENZHEN YANG: Experimental Study on Tensile Property of AZ31B Magnesium Alloy at Different High Strain Rates and Temperatures. *Materials & Design*, 57, (2014) May, 10–20.
- [18] BOYCE, B.L., DILMORE, M.F. The Dynamic Tensile Behavior of Tough, Ultrahigh-strength Steels at Strain-rates from 0.0002 s⁻¹ to 200 s⁻¹. *International Journal of Impact Engineering*, 36, Issue 2 (2009) Feb., 263–271.