

ZKOUŠKY HLINÍKOVÉ SLITINY A ZINKU
V Kladném a záporném smyku

Doc. Ing. Zdeněk Sobotka DrSc.
Ústav teoretické a aplikované mechaniky ČSAV

Výsledky teoretického a experimentálního výzkumu vedly autora k závěru, že existují nejen dva druhy normálních namáhání, tj. tah a tlak, ale také dva druhy protichůdných smykových napětí. Nazval je kladným a záporným smykem. Na rozdíl od tahu a tlaku se kladný a záporný smyk vyznačuje závislostí na vzájemném vztahu mezi směrem smykového napětí a charakteristickými směry struktury.

Kladný smyk se vyznačuje vyššími moduly pružnosti i vyššími mezemi průtažnosti a pevnosti než smyk záporný.

Největší rozdíly mezi kladným a záporným smykem se projevily u anisotropických zemin a hornin, kde činily často více než 50%.

Mnohem menší, i když znatelné jsou tyto rozdíly u kovů, kde se i při velmi slabé ortotropii projevují vlivy polykrystalické struktury.

V příspěvku se ukazují některé výsledky zkoušek hliníkové slitiny AlMg5 a technicky čistého hexagonálního zinku Zn 99,5 v kladném a záporném smyku. Pro zkoušky bylo použito zvláštního přípravku, kde byly vzorky obou materiálů namáhány smykem ve dvou průřezích. Vzorky měly tvar kruhových tyček o průměrech 12 mm a 8 mm.

V této práci se uvádějí ukázky pracovních diagramů hliníkové slitiny a zinku v kladném a záporném smyku. Tyto diagramy mají některé společné charakteristické znaky.

1. ZÁKLADNÍ TEORETICKÉ ÚVAHY.

Z výsledků teoretického a experimentálního výzkumu dospěl autor k závěru, že existují dva rozdílné druhy smyku opačného smyslu, které nazval kladným a záporným smykem a které jistým způsobem představují analogii ke dvěma protichůdným druhům normálních napětí, tj. k tahu a k tlaku.

Projevy kladného a záporného smyku závisí na úhlu mezi směry hlavních smykových napětí a charakteristickými směry strukturální konfigurace hmoty.

Při kladném smyku má hmota vyšší moduly pružnosti i vyšší meze průtažnosti a pevnosti než při smyku záporném. Také objemová přetvoření při obou druzích smyku bývají rozdílná.

Rozdíly mezi kladným a záporným smykem závisí na anisotropii, po případě na ortotropii, na strukturální konfiguraci, na nestejnorodosti a na velikosti rozdílů mezi mechanickými charakteristikami v tahu a v tlaku.

Čím je anisotropie výtaznějši, čím je hmota nestejnorodějši, čím složitějši a hrubožrnějši je struktura a čím více se liší navzájem chování hmoty v tahu a v tlaku, tím více se uplatňují rozdíly mezi kladným a záporným smykem.

Původně zjistil autor odlišné chování v kladném a záporném smyku u látek anisotropických. Později se však objevily rozdíly při namáhání opačnými smykovými napětími i u látek isotropických, jež mají výraznou strukturu při makroskopicky stejných mechanických vlastnostech v různých směrech. Takové látky nazval strukturálními.

Největší rozdíly v chování při kladném a záporném smyku byly zjištěny v anisotropických zeminách a horninách, kde často přesahují hodnotu 50%.

Značně menší, i když ne zanedbatelné, jsou u isotropických a kvasilisotropických kovů, jak bude ukázáno v tomto příspěvku na výsledcích zkoušek hliníkové slitiny AlMg5 a technicky čistého hexagonálního zinku Zn 99,5.

Teoretické úvahy při vyjádření kladného a záporného smyku založil autor na přetvárných vlastnostech a podmínkách pevnosti a plasticity anisotropických látek.

Zavedl transformovaný materiálový tensor napětí

$$\omega_{ij} = a_{ijkl}\sigma_{kl} - \chi_{ij}a_{mmkl}\sigma_{kl} \quad , \quad (1)$$

kde a_{ijkl} je bezrozměrný tensor anisotropie čtvrtého řádu,

σ_{kl} je tensor skutečných napětí a

$$\chi_{ij} = \begin{vmatrix} \chi_{00} & \chi_{12} & \chi_{13} \\ \chi_{21} & \chi_{00} & \chi_{23} \\ \chi_{31} & \chi_{32} & \chi_{00} \end{vmatrix} \quad (2)$$

je materiálový tensor, který vyjadřuje různý stupeň stlačitelnosti hmoty.

Tensor přetvoření ϵ_{ij} nebo v přírůstkové teorii tensor rychlosti přetváření $\dot{\epsilon}_{ij}$ se dá vyjádřit isotropickou tenzorovou funkcí transformovaného materiálového tensoru napětí

$$\epsilon_{ij} = f_{ij}(\omega_{kl}) \quad . \quad (3)$$

Rozvineme-li tuto funkci podle pravidel tensorové algebry, vychází tříčlenný vzorec

$$\epsilon_{ij} = \phi_0 \delta_{ij} + \phi_1 \omega_{ij} + \phi_2 \omega_{i\lambda} \omega_{\lambda j} \quad , \quad (4)$$

kde ϕ_k jsou skalární funkce invariantů a δ_{ij} je Kroneckerova delta.

Násobíme-li rovnici (4) tensorem ω_{ij} , dostáváme smíšený invariant

$$\omega_{ij} \epsilon_{ij} = \phi_0 \omega_{ij} \delta_{ij} + \phi_1 \omega_{ij} \omega_{ij} + \phi_2 \omega_{ij} \omega_{i\lambda} \omega_{\lambda j} \quad , \quad (5)$$

který odpovídá materiálové přetvárné energii.

Podle přírůstkové teorie bychom dostali smíšený invariant

$$\omega_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} = \phi_0 \omega_{ij} \delta_{ij} + \phi_1 \omega_{ij} \omega_{ij} + \phi_2 \omega_{ij} \omega_{i\lambda} \omega_{\lambda j} \quad , \quad (6)$$

který odpovídá změně materiálové přetvárné energie.

Při odvozování kritérií pevnosti a plasticity přijal autor hypotézu stálých mezních invariantních poměrů, danou vztahy

$$F_0 = \frac{\phi_0}{\omega_{ij}\varepsilon_{ij}}, \quad F_1 = \frac{\phi_1}{\omega_{ij}\varepsilon_{ij}}, \quad F_2 = \frac{\phi_2}{\omega_{ij}\varepsilon_{ij}}, \quad (7)$$

po případě výrazy

$$H_0 = \frac{\phi_0}{\omega_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}, \quad H_1 = \frac{\phi_1}{\omega_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}, \quad H_2 = \frac{\phi_2}{\omega_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}} \quad (8)$$

v přírůstkové teorii.

Dělíme-li rovnici (5) invariantem $\omega_{ij} \varepsilon_{ij}$, vychází obecné kritérium pevnosti nebo plasticity ve tvaru

$$F_0 \omega_{ij} \delta_{ij} + F_1 \omega_{ij} \omega_{ij} + F_2 \omega_{ij} \omega_{i\lambda} \omega_{\lambda j} = 1. \quad (9)$$

Dělením rovnice (6) přírůstkovým invariantem $\omega_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}$ vychází

$$H_0 \omega_{ij} \delta_{ij} + H_1 \omega_{ij} \omega_{ij} + H_2 \omega_{ij} \omega_{i\lambda} \omega_{\lambda j} = 1. \quad (10)$$

Omezíme-li se na účinky prvního řádu, odpadnou třetí členy na levých stranách rovnic (9) a (10). Přejdeme-li opět ke skutečným složkám napětí, můžeme vyjádřit kritéria pevnosti a plasticity v tomto obecném tvaru

$$P_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl} + Q_{ij} \sigma_{ij} = 1. \quad (11)$$

V obecném případě anisotropie za trojrozměrného stavu napětí a přetvoření máme celkem 21 součinitelů P_{ijkl} a 6 součinitelů Q_{ij} . Těmto 27 materiálovým konstantám odpovídá celkem 21 součinitelů anisotropie a_{ijkl} , 4 různé složky materiálového tensoru χ_{ij} a dva stálé invariantní poměry F_0 a F_1 nebo H_0 a H_1 . Materiálové konstanty se dají vyjádřit dvaceti sedmi dílčími mezemi pevnosti nebo plasticity při zvláštních případech namáhání.

Za dvojrozměrného stavu máme jen 6 součinitelů P_{ijkl} a 3 součinitele Q_{ij} , které můžeme vyjádřit devíti dílčími mezemi pevnosti nebo plasticity.

Použijeme-li klasického indexového označování napětí v kartézských souřadnicích, má mezní podmínka za dvojrozměr-

ného stavu tvar

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_x^2}{\sigma_{\epsilon x} \sigma_{\tau x}} + \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{\epsilon y} \sigma_{\tau y}} - \\ & - \left(\frac{1}{\sigma_{\epsilon x} \sigma_{\tau x}} + \frac{1}{\sigma_{\epsilon y} \sigma_{\tau y}} - \frac{1}{\sigma_{\epsilon xy}^2} - \frac{\sigma_{\epsilon x} - \sigma_{\tau x}}{\sigma_{\epsilon x} \sigma_{\tau x} \sigma_{\epsilon \epsilon xy}} - \frac{\sigma_{\epsilon y} - \sigma_{\tau y}}{\sigma_{\epsilon y} \sigma_{\tau y} \sigma_{\epsilon \epsilon xy}} \right) \sigma_x \sigma_y + \frac{\tau_{xy}^2}{\tau_{\rho xy} \tau_{Nxy}} - \\ & - \left(\frac{1}{\sigma_{\epsilon x} \sigma_{\tau x}} + \frac{1}{\tau_{\rho xy} \tau_{Nxy}} - \frac{1}{\sigma_{\epsilon \rho xy}^2} - \frac{\sigma_{\epsilon x} - \sigma_{\tau x}}{\sigma_{\epsilon x} \sigma_{\tau x} \sigma_{\epsilon \rho xy}} - \frac{\tau_{\rho xy} - \tau_{Nxy}}{\tau_{\rho xy} \tau_{Nxy} \sigma_{\epsilon \rho xy}} \right) \sigma_x \tau_{xy} - \\ & - \left(\frac{1}{\sigma_{\epsilon y} \sigma_{\tau y}} + \frac{1}{\tau_{\rho xy} \tau_{Nxy}} - \frac{1}{\sigma_{\epsilon \rho yx}^2} - \frac{\sigma_{\epsilon y} - \sigma_{\tau y}}{\sigma_{\epsilon y} \sigma_{\tau y} \sigma_{\epsilon \rho yx}} - \frac{\tau_{\rho xy} - \tau_{Nxy}}{\tau_{\rho xy} \tau_{Nxy} \sigma_{\epsilon \rho yx}} \right) \sigma_y \tau_{xy} - \\ & - \frac{\sigma_{\epsilon x} - \sigma_{\tau x}}{\sigma_{\epsilon x} \sigma_{\tau x}} \sigma_x - \frac{\sigma_{\epsilon y} - \sigma_{\tau y}}{\sigma_{\epsilon y} \sigma_{\tau y}} \sigma_y - \frac{\tau_{\rho xy} - \tau_{Nxy}}{\tau_{\rho xy} \tau_{Nxy}} \tau_{xy} = 1, \end{aligned} \quad (12)$$

kde $\sigma_{\epsilon x}, \sigma_{\epsilon y}$ jsou mezní napětí v tlaku ve směrech os x a y ,

$\sigma_{\tau x}, \sigma_{\tau y}$ jsou mezní napětí v tahu ve směrech os x a y ,

$\sigma_{\epsilon \epsilon xy}$ je mezní napětí v rovnoměrném dvojosém tlaku, působícím současně ve směrech os x a y ,

$\tau_{\rho xy}$ je mezní napětí v kladném smyku,

τ_{Nxy} je mezní napětí v záporném smyku a

$\sigma_{\epsilon \rho xy}, \sigma_{\epsilon \rho yx}$ jsou mezní napětí v tlaku, působícím současně s kladným smykiem při stejných hodnotách obou napětí.

Tyto dílčí meze pevnosti nebo plasticity představují celkem devět materiálových konstant, které je třeba určit experimentálním způsobem.

Za dvojrozměrného stavu isotropických strukturálních látek máme dvě různé složky tensoru anisotropie a_{ijkl} , dvě různé složky materiálového tensoru X_{00} a X_{12} a dva mezní invariantní poměry F_0 a F_1 nebo H_0 a H_1 . To je celkem šest materiálových konstant, které se dají vyjádřit šesti mez-

ními napětími σ_c , σ_T , σ_{CC} , τ_{pxy} , τ_{Nxy} a σ_{CP} , při čemž σ_{CC} znamená mezní napětí při rovnoměrném dvojosém tlaku a σ_{CP} mezní napětí za současného tlaku a kladného smyku při stejných hodnotách obou napětí. Kriterium pevnosti nebo plasticity (12) se přitom zjednoduší na tvar

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sigma_c \sigma_T} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \\ & - \left(\frac{2}{\sigma_c \sigma_T} - \frac{1}{\sigma_{CC}^2} - 2 \frac{\sigma_c - \sigma_T}{\sigma_c \sigma_T \sigma_{CC}} \right) \sigma_x \sigma_y + \frac{\tau_{xy}^2}{\tau_{pxy} \tau_{Nxy}} - \\ & - \left(\frac{1}{\sigma_c \sigma_T} + \frac{1}{\tau_{pxy} \tau_{Nxy}} - \frac{1}{\sigma_{CP}^2} - \frac{\sigma_c - \sigma_T}{\sigma_c \sigma_T \sigma_{CP}} - \frac{\tau_{pxy} - \tau_{Nxy}}{\tau_{pxy} \tau_{Nxy} \sigma_{CP}} \right) \tau_{xy} (\sigma_x + \sigma_y) - \\ & - \frac{\sigma_c - \sigma_T}{\sigma_c \sigma_T} (\sigma_x + \sigma_y) - \frac{\tau_{pxy} - \tau_{Nxy}}{\tau_{pxy} \tau_{Nxy}} \tau_{xy} = 1. \end{aligned} \quad (13)$$

Čtvrtý člen na levé straně předchozí rovnice vyjadřuje interakci normálních a smykových napětí za mezního stavu, která vedle projevu kladného a záporného smyku odlišuje chování isotropických strukturálních látek od ideálního kontinua.

Mezní napětí hmot se stejnými mechanickými vlastnostmi v tahu a v tlaku a v kladném a záporném smyku jsou navzájem vázána těmito vztahy

$$\sigma_c = \sigma_T = \sigma_L, \quad \tau_{pxy} = \tau_{Nxy} = \tau_L, \quad (14)$$

$$\sigma_{CC} = \frac{\sigma_L}{\sqrt{4 - \frac{\sigma_L^2}{\tau_L^2}}}. \quad (15)$$

Předpokládáme-li dále o složkách materiálového tensoru χ_{ij} , že jsou dány výrazy

$$\chi_{00} = \chi, \quad \chi_{12} = 0, \quad (16)$$

z kterých pak vyplývá dále

$$\frac{1}{\sigma_L^2} + \frac{1}{\tau_L^2} = \frac{1}{\sigma_{CP}^2}, \quad (17)$$

vyplývá po dosazení vztahů (14) až (17) do rovnice (13) toto mezní kritérium pro ideální stejnorodé isotropické látky

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \left(\frac{\sigma_L^2}{\tau_L^2} - 2 \right) \sigma_x \sigma_y + \frac{\sigma_L^2}{\tau_L^2} \tau_{xy}^2 = \sigma_L^2 \quad (18)$$

Pro poměr

$$\frac{\sigma_L^2}{\tau_L^2} = 3 \quad (19)$$

odtud vyplývá jako zvláštní případ podmínka Huber-Hencky-Misesova

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \tau_{xy}^2 = \sigma_L^2 \quad (20)$$

2. ZKUŠEBNÍ PŘÍPRAVEK PRO ZKOUŠKY V Kladném a záporném smyku.

Pro smykové zkoušky hliníkové slitiny AlMg5 a technicky čistého hexagonálního zinku bylo použito přípravku, který je zobrazen na obr. 1, přičemž byl po provedené zkoušce rozložen na tři základní části. Skládá se ze dvou pevných bočnic, které jsou při zkoušce spojeny šrouby a na obr. 1 zobrazeny na obou stranách. Mezi bočnicemi se při zkoušce pohybuje držák vnitřního kruhového střížníku, na který působí tlakové zatížení. To bylo vyvozováno zkušebním strojem testatron. Pohyblivý držák vnitřního střížníku je zobrazen uprostřed. Vnější kruhové střížníky jsou umístěny ve velkých kruhových otvorech bočnic.

Na obr. 1 je vidět smykové plochy, které po usmyknutí rozdělí zkušební tyčku na tři části, z nichž dvě zůstávají ve vnějších výměnných střížnicích uvnitř postranních bočnic a jedna je ve vnitřním střížníku ve středním držáku.

Střížníky jsou výměnné a mají uprostřed průběžný kruhový otvor, kterým prochází kruhová zkušební tyčka. Při zkoušce byl tyčkový vzorek namáhán smykem ve dvou průřezech. Smyk je vyvozen tlakem na držák vnitřního střížníku.

Uspořádání při zkoušce, sešroubovaný smykový přípravek a vyvození tlaku na pohyblivý držák vnitřního střížníku je vidět z obr. 2.

3. ZKOUŠKY HLINÍKOVÉ SLITINY V Kladném a záporném smyku.

Pro první část zkoušek v kladném a záporném smyku bylo použito kruhových tyček o průměru 12 mm vyrobených z plechu hliníkové slitiny AlMg5 podle ČSN 424415.10 ve stavu měkkém o složení v %:

Mg 4,52 Fe 0,37 Si 0,14 Mn 0,11
Zn 0,05 Cu 0,023 Ti 0,017 Be 0,005

Pevnost v tahu v podélném směru, tj. ve směru válcování byla $\sigma_{pt} = 257,022$ MPa. Tato pevnost představuje průměr zjištěný ze tří tahových zkoušek.

Tahová pevnost ve směru kolmém ke směru válcování zjištěná opět jako průměr tří zkoušek činila $\sigma_{pt} = 253,098$ MPa.

Šlo tedy o celkem nevýraznou ortotropii, protože rozdíl obou hodnot je menší než 2%.

Pro zkoušky v kladném a záporném smyku byly vyrobeny kruhové zkušební tyčky, jejichž osa svírala se směrem válcování úhel 30° . Jejich střední průměr byl $d = 11,97$ mm. Střední dvojnásobná průřezová plocha zkušebních tyček, vzdorující dvojstřížnému smyku, činila $2F = 225,07$ mm².

Byly zkoušeny celkem čtyři dvojice zkušebních těles, z toho vždy jedna tyčka v kladném smyku a druhá, která byla při zkoušce otočena o 180° , byla namáhána smykem záporným.

Namáhání ve zkušebním zařízení bylo orientováno tak, jako by smykové napětí působilo v rovině původního plechu a to vždy u jedné dvojice zkušebních těles postupně ve dvou opačných směrech.

Zachování požadovaného směru smykového namáhání bylo umožněno umístěním poznávacích koleček na koncích zkušebních těles, které označovaly směr střednicové roviny původního plechu.

Při šesti z osmi zkoušek byla měřena teplota.

Z výsledků zkoušek, které jsou uvedeny v tab. 1, je vidět, že pevnost v kladném smyku byla vždy o něco vyšší než v smyku záporném.

Při zkouškách byly pořizovány pracovní diagramy udávající závislost mezi smykovou silou a posunutím průřezů zkušebních těles v mm. Tyto diagramy byly pak přepočteny na závislosti mezi smykovým napětím v MPa a posunutím v mm.

Diagram závislosti mezi smykovým napětím a posunutím při kladném smyku první zkušební tyčky z dvojice III je znázorněn na obr. 3. Z tohoto diagramu vidíme poměrně dosti znatelné kolísání smykového napětí, které se objevuje celkem krátce před dosažením meze pevnosti, ale potom trvá poměrně dlouho v oboru klesající křivky závislosti.

Toto kolísání ukazuje existenci horních a dolních hodnot smykového napětí pro tatáž posunutí, kterým do jisté míry odpovídá horní a dolní mez průtažnosti kovů.

Tento jev byl zaznamenán u všech zkoušek hliníkové slitiny, kdežto při zkouškách technicky čistého hexagonálního zinku se neprojevovalo kolísání křivky závislosti mezi smykovým napětím a posunutím.

Po dosažení vrcholové smykové pevnosti se smykové napětí zmenšuje. Tento pokles je postupně méně strmý, až je dosaženo minimální hodnoty. Potom nastává opět mírný vzestup křivky závislosti a následuje jisté ustálení. Dalšímu posouvání klade však odpor již jen tření na usmyknutých plochách zkušební vzorku. Usmyknutí nastává při posunutí ne příliš vzdáleném od dolního bodu smykové křivky.

Křivka závislosti mezi smykovým napětím a posunutím při záporném smyku je znázorněna na obr. 4. Má podobný průběh jako pracovní křivka při kladném smyku. Jen příslušná smyková napětí jsou poněkud nižší. Za vrcholem smykové pevnosti se pokles smykových napětí poněkud zmírňuje. Křivka má pak charakteristické vyklenutí. Po dosažení dolního bodu křivky smykové napětí poněkud vzrůstá. Tento odpor proti posouvání je však opět způsoben pouze třením na usmyknutých plochách zkušební tělesa. Druhotný vzrůst odporu proti posouvání je způsoben mírným pootáčením usmyknutých ploch vlivem podružného ohybu.

4. ZKOUŠKY ZINKU V Kladném a Záporném Smyku.

Pro zkoušky připravil Výzkumný ústav kovů v Panenských Břežanech experimentální materiál z technicky čistého zinku Zn 99,5.

Šlo o dvě válcované desky o rozměrech 740 x 180 x 12 mm o celkové hmotnosti 23,60 kg. Desky byly připraveny takto:

lití: kovová kokila o rozměru 15 x 740 x 250 mm,

apretace: odstranění hlavy odlitku v celé délce desky.

válcování: redukce 50% na tloušťku 12 mm, ohřev před válcováním 200-250°C.

Pro kontrolu vlastností zinku v tahu bylo se zřetelem k možným objemovým změnám provedeno stabilizační žíhání při teplotě $100 \pm 10^\circ\text{C}$ po dobu 6 hod. s pozvolným chladnutím rychlostí menší než $30^\circ\text{C}/\text{hod.}$

Určení mechanických vlastností v tahu bylo provedeno ve směru válcování a ve směru kolmém na směr válcování a po stabilizačním žíhání ve směru válcování.

Na zkušebních tyčích byla kontrolována před žíháním a po něm měřená délka a průměr tisícínovým mokrometrem.

Výsledky kontrolních zkoušek v tahu jsou uvedeny v tabulce 2.

Velikost zrna zkušebních vzorků se před žíháním pohybovala kolem $55\mu\text{m}$ a po něm kolem $87\mu\text{m}$.

Pro zkoušky v kladném a záporném smyku byly zhotoveny kruhové zkušební tyčky o průměru 8 mm. Tomu odpovídá dvojnásobná průřezová plocha $100,48\text{ mm}^2$ vzdorující dvojstřížnému smyku. Materiál pro zkušební tyčky byl odebrán z plechu tak, aby jejich osa svírala se směrem válcování úhly 0° , $22^\circ30'$, 45° , $67^\circ30'$ a 90° .

Pro každý směr byly zkoušeny vždy tři dvojice tyček. Provedení zkoušek bylo obdobné jako v předchozím případě u hliníkové slitiny.

Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tab. 3. Z této tabulky vidíme, že největších pevností jak v kladném tak v záporném smyku bylo dosaženo ve směru válcování a ve směru kolmém k němu.

Ve většině případů byly zjišťovány také objemové změny zkušebních těles. Objemy před zkouškou a po ní byly určovány metodou vážení na vahách WA35 s použitím pyknometrů 25 a 50 ml. Výsledky jsou uvedeny v posledním sloupci tab. 3.

Z těchto výsledků je vidět, že při kladném smyku docházelo k většímu zhutnění nebo menšímu nakypření struktury než při smyku záporném. Při záporném smyku bylo tedy vždy větší zvětšení nebo menší zmenšení objemu zkušebních těles.

Křivka závislosti mezi kladným smykovým napětím a posunutím zkušebního tělesa I, odebraného ve směru kolmém ke směru válce, je znázorněna na obr. 5. Na rozdíl od křivek hliníkové slitiny se zde neprojevovalo kolísání smykového napětí.

Podobný průběh má i křivka závislosti mezi záporným smykovým napětím a posunutím, která je znázorněna na obr. 6.

5. ZÁVĚR

Autor ukazuje podle výsledků teoretického a experimentálního výzkumu rozdíly mezi kladným a záporným smykem. Tyto rozdíly jsou tím větší, čím výraznější je anisotropie, nestejnorodost a velikost zrn hmoty a čím větší jsou rozdíly mezi mechanickými vlastnostmi v tahu a v tlaku.

Ukazuje se však, že rozdíly mezi oběma druhy smyku existují i u látek isotropických a kvasiisotropických.

Protože u zkoušené hliníkové slitiny AlMg5 a technicky čistého zinku Zn 99,5 je ortotropie zcela nevýrazná, jsou rozdíly mezi oběma druhy smyku značně menší než u anisotropických zemin [2], [3], [4].

U zkušebních těles zinku byly měřeny i objemové změny a bylo zjištěno, že při záporném smyku je zvětšení objemu větší a zmenšení objemu menší než při smyku kladném.

LITERATURA

1. Z.Sobotka: Plasticity of Anisotropic Materials with Positive and Negative Shear Effects. Stavebnický časopis SAV,X, č.9, Bratislava 1973, str.684-687.
2. Z.Sobotka: Positive and Negative Shear in Anisotropic Soils. Istanbul Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, SMFE, Vol.2, Istanbul Teknik Üniversitesi, Istanbul Fakültesi Matbaası, Istanbul 1975, pp.67-74.
3. Z.Sobotka: Plastic Flow and Limiting State of Anisotropic Soils with Positive and Negative Shear, Proceedings of the I.Baltic Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Volume 2, Gdańsk 1975, pp.353-361.
4. Z.Sobotka: Interference of Orientated Shear with Dilatancy. Istanbul Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, SMFE 1975, Vol.3, Teknik Üniversite, Istanbul 1975, pp.177-179.
5. Z.Sobotka: Compressibility and Anisotropy with Positive and Negative Shear in the Plastic Flow, Bulgarian Academy of Sciences, Theoretical and Applied Mechanics, Second National Congress 8.-14.10.1973 Varna, Proceedings, Vol.1, Publishing House of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia 1975, pp.133-145.
6. Z.Sobotka: Functional Relations in Non-Linear Viscoelasticity. Theoretical and Applied Mechanics, No 2, 1976, The Yugoslav Society of Mechanics, Beograd, pp.121-130.

Tab. 1. Výsledky zkoušek hliníkové slitiny v kladném a záporném smyku.

Číslo dvojice	Druh smyku	Max. tlaková síla v kp	Max. smykové napětí v MPa	Teplota v °C
I	kladný	4050	176,489	-
	záporný	3990	173,854	-
II	kladný	4080	177,776	25,3
	záporný	4030	175,591	25,6
III	kladný	4013	174,858	25,7
	záporný	3920	170,804	26,3
IV	kladný	3992	173,942	26,4
	záporný	3981	173,462	26,5

Tab. 2. Výsledky zkoušek zinku v tahu.

Vzorek	Směr odběru	$\sigma_{0,2}$ MPa	σ_{pt} MPa	δ_5 %	ψ %
nežíhaný	ve směru válcování	27,5	98,1	32,6	41
	kolmo na směr válcování	24,5	103,9	29,0	30
žíhaný	ve směru válcování	28,4	97,0	21,8	32,5

Tab.3. Výsledky zkoušek zinku v kladném a záporném smyku.

Úhel osy zkušeb- ních těles se směrem válcování	Číslo dvojice	Druh smyku	Max.tlaková síla v kp	Max.smykové napětí v MPa	Změna objemu v cm ³
0°	I	kladný	902,5	88,112	-0,026 893
		záporný	884,0	86,306	+0,004 058
	II	kladný	933,5	91,138	-0,079 938
		záporný	906,0	88,453	-0,063 216
	III	kladný	925,5	90,357	+0,010 821
		záporný	919,5	89,771	+0,017 179
22°30'	I	kladný	888,0	86,696	-0,015 496
		záporný	874,0	85,329	+0,054 059
	II	kladný	839,5	86,843	-0,002 899
		záporný	874,5	85,378	+0,033 559
	III	kladný	872,5	85,183	-0,018 032
		záporný	864,0	84,353	+0,013 921
45°	I	kladný	879,5	85,856	-0,024 528
		záporný	873,0	85,232	-0,013 252
	II	kladný	867,0	86,598	-0,002 657
		záporný	874,0	85,329	+0,043 027

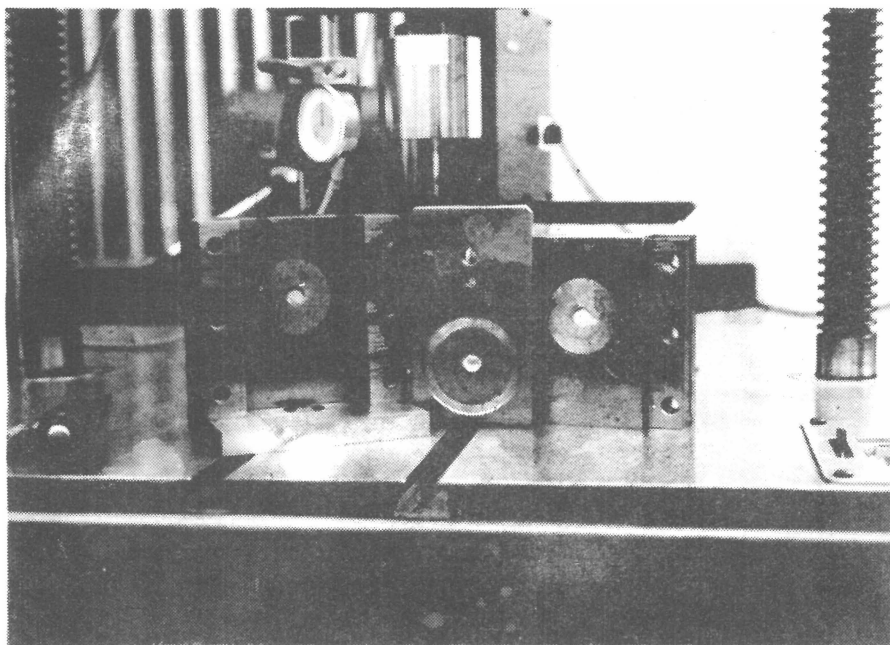
Tab.3. Výsledky zkoušek zinku v kladném a záporném smyku. Pokračování

Úhel osy zkoušeb- ních těles se směrem válcování	Číslo dvojice	Druh smyku	Max.tlaková síla v kp	Max.smykové napětí v MPa	Změna objemu v cm ³
45°	III	kladný	893,0	87,184	+0,012 285
		záporný	863,0	84,255	+0,055 455
67°30'	I	kladný	897,0	87,750	
		záporný	868,0	84,743	
	II	kladný	877,0	85,622	+0,013 169
		záporný	857,0	83,670	+0,030 079
	III	kladný	874,0	85,329	
		záporný	864,0	84,353	
90°	I	kladný	901	87,965	-0,009 071
		záporný	856	83,720	+0,000 417
	II	kladný	953	93,042	
		záporný	906,5	88,502	
	III	kladný	869	84,841	
		záporný	851	83,084	

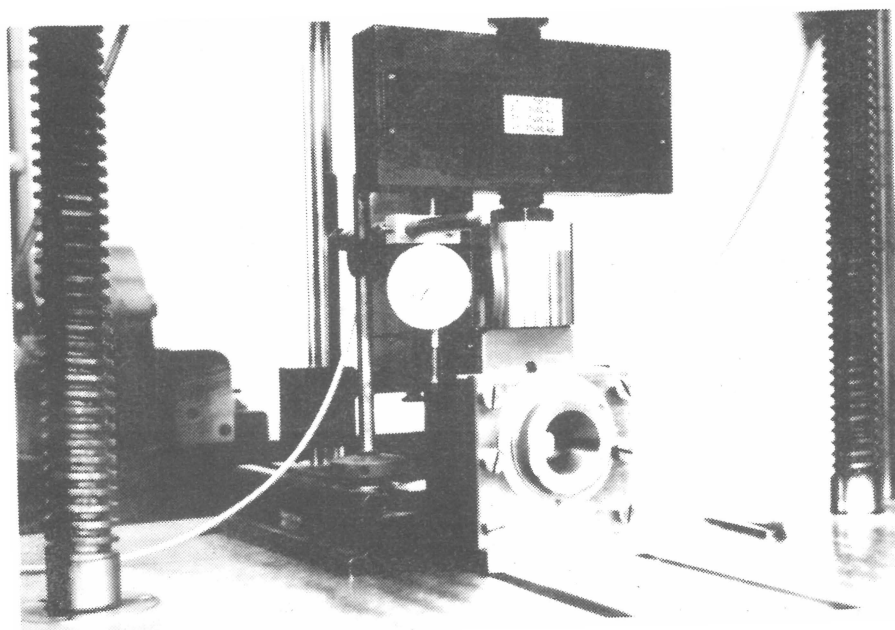
SEZNAM VYOBRAZENÍ

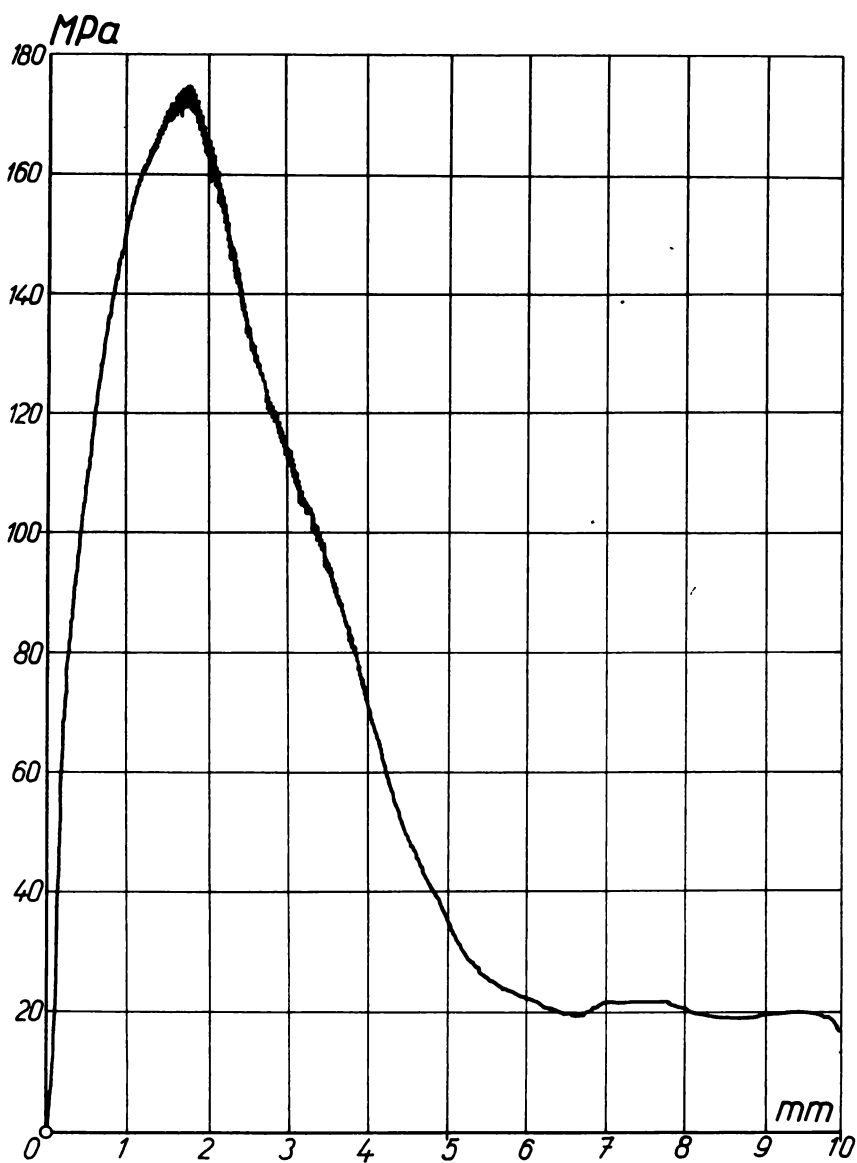
- Obr.1. Rozložený přípravek pro smykové zkoušky kruhových tyček.
- Obr.2. Celkové uspořádání smykové zkoušky při použití zkušebního stroje testatron.
- Obr.3. Křivka závislosti mezi smykovým napětím a posunutím hliníkové slitiny Al Mg 5 při kladném smyku.
- Obr.4. Křivka záporného smykového napětí hliníkové slitiny Al Mg 5.
- Obr.5. Pracovní diagram technicky čistého zinku Zn 99,5 v kladném smyku.
- Obr.6. Pracovní diagram technicky čistého zinku v záporném smyku.

Obr. 1.

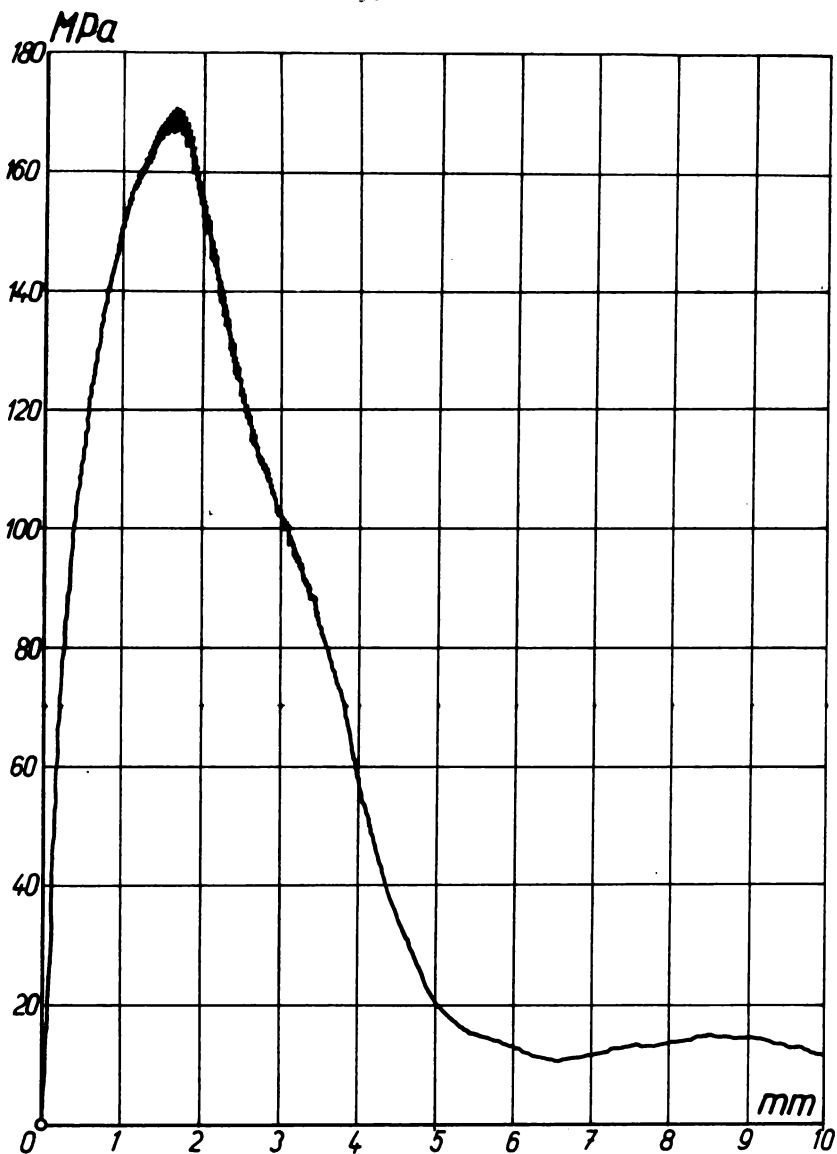


Obr. 2.

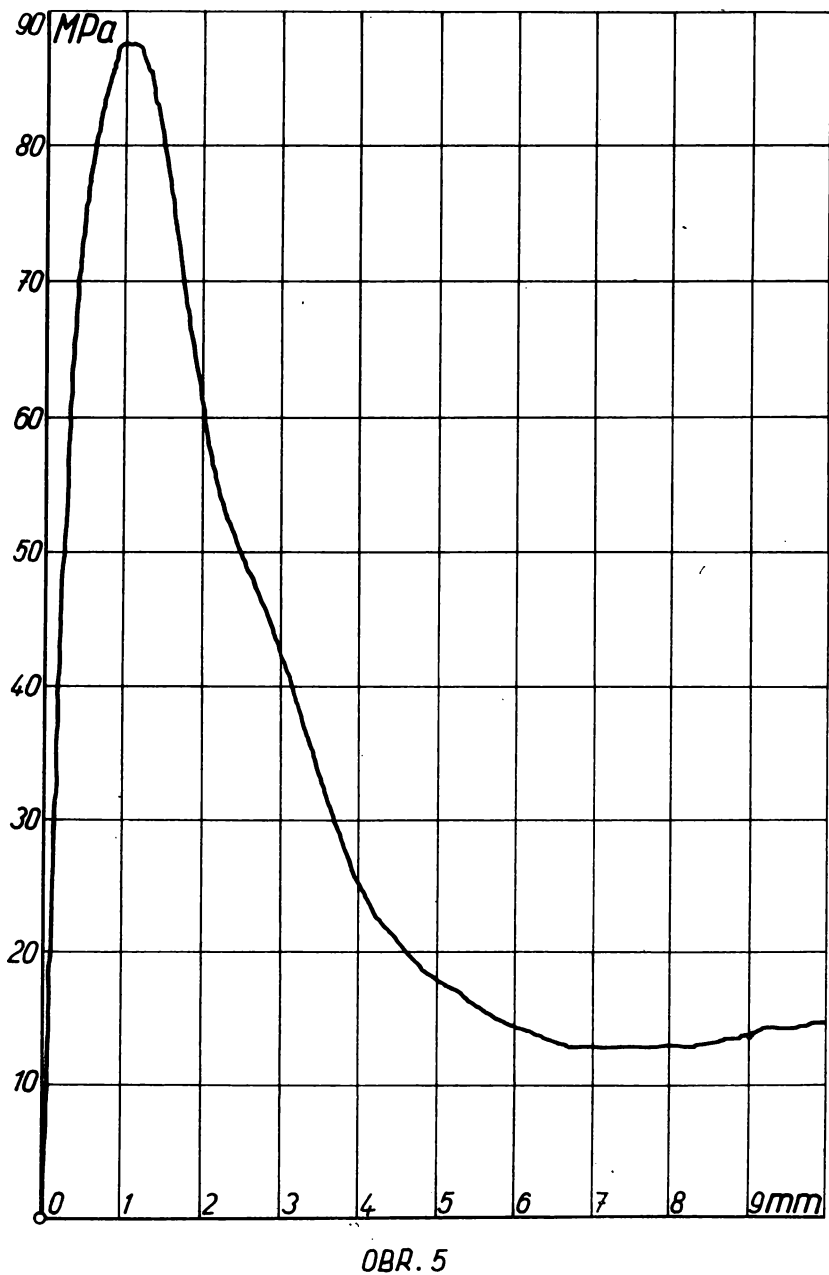


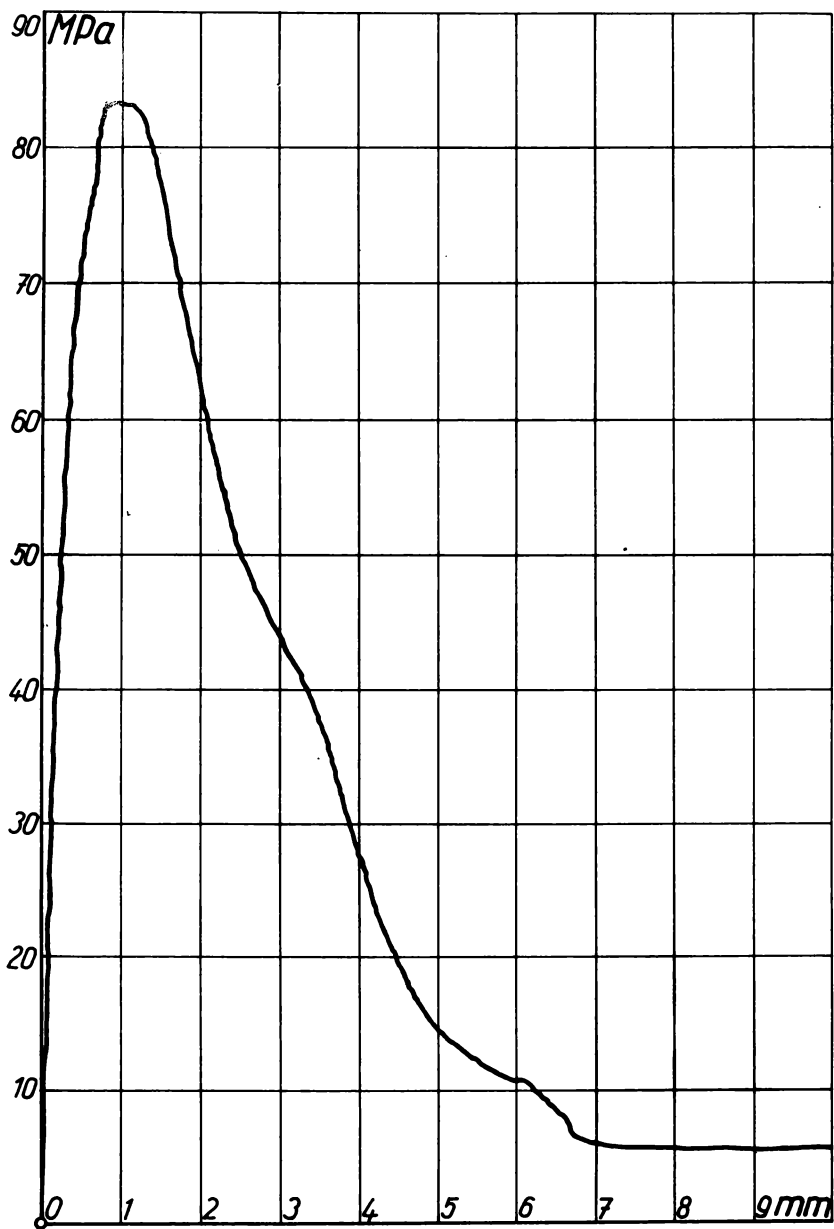


OBR. 3



OBR. 4





OBR. 6