



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**VLIV DEFORMAČNÍ RYCHLOSTI NA ZPEVNĚVÁNÍ MIKROLEGOVANÉ OCELI
VE FORMĚ DRÁTOVÉHO POLOTOVARU Z HLEDISKA NÁSLEDNÉHO TVÁŘENÍ
ZA STUDENA**

Stanislav Rusz, Tibor Donič*

Abstrakt

Nízkouhlíkové oceli s mikropřísadami, zvláště B a Cr jsou stále šířeji používány k výrobě vysokopevných spojovacích součástí zejména v automobilovém průmyslu. Jako výchozí polotovár pro výrobu je používán tažený drát. Spojovací elementy (upínací šrouby motorů, převodovek ap.) jsou namáhány vysokým dynamickým zatížením. Z tohoto důvodu jsou je ověřována u polotovarů jejich tvařitelnost pomocí dynamických tahových a zejména pēchovacích zkoušek tvařitelnosti. V příspěvku je provedená analýza klasických pēchovacích zkoušek (trhací zařízení) a zkoušek dynamických (vačkový plastometr) mikrolegované oceli na bázi Mn – B. Zkoušky byly provedeny pro válcovaný a tažený drát s cílem porovnání dosažených výsledků průběhů pērtvárných odporů při různých velikostech deformační rychlosti.

Klíčová slova: mikrolegovaná ocel, zkoušky tvařitelnosti, vačkový plastometr, dynamické pēchovací zkoušky, vysokopevné spojovací součásti

1. Technologie válcování šroubového drátu

V současné době je výroba šroubových drátů prováděná na zcela rekonstruované kontidrátové trati v Třineckých železárnách. Vstupní sochor o rozměrech 108 x 108 mm byl nahrazen sochohem 150 x 150 mm, čímž došlo ke zvýšení počtu úběrů na jednotlivých válcovacích pořadích a zároveň je tímto dosaženo daleko většího pētvoření materiálů oproti původně používanému rozměru sochoru. Sochory jsou vstupně ohřívány na tepl. 1030 °C. Následně je sochor válcován prvními třemi stolicemi pēdválcovacího pořadí. Za pēdválcovacím pořadím je provalek s odstřižnutým pēdním koncem, odstřižený na klikových nůžkách zaveden do středního pořadí. Stolicemi středního pořadí je provalek dále redukován, přičemž za každou lichou stolicí v pořadí je otáčen.

Provalek je od 15té stolice veden trubkovým vedením přes smyčkovou plochu a trhací nůžky k rotačním nůžkám, kde se odstřižne pēdní konec. Dále je vedením dopravován k vertikální C-L stolicí a horizontální C-L stolicí. Zde se provalek dále redukuje a dopravuje k první sekci řízeného vodního chlazení. Následuje sekce pro vyrovnání teplot – trubkové vedení, které současně otáčí provlek do protisměru. Na ni navazuje

* doc. Ing. Stanislav Rusz, CSc., VŠB – Technická univerzita Ostrava, Česká republika

** doc. Ing. Tibor Donič, CSc., Žilinská univerzita v Žilině, Slovensko

druhá sekce řízeného vodního chlazení. Odtud je provalek veden trubkovým vedením ke smyčkové ploše, na které je provalek otočen znovu do protisměru a je dál veden k 10-ti bloku. V této části vedení se znovu vyrovnává teplota povrchu a jádra provalku a současně se vede do nové válcovací úrovně 10-ti bloku. Chlazením se zlepšují podmínky pro doválcování drátů s vyšší pevností. Průměrná velikost úběru na válcovacích stolicích je 23%. Provalek se v 10-ti bloku válcuje na konečný rozměr. Podle velikosti průměru drátu se válcuje dvěma až deseti válcovacími jednotkami. Kalibrace v 10-ti bloku je ovál – kruh. Za 10-ti blokem je prostor pro měření rozměru drátu – laser.

Následuje řízené vodní chlazení ve čtyřech sekcích s třemi zónami vyrovnání teploty povrchu a jádra drátu. Systémem měření teploty za 10-ti blokem a před ukládačem smyček a automatickým řízením množství vody se dosahuje nižší teploty drátu a zároveň požadované struktury po průřezu. Na chladícím dopravníku Stelmor se drát dále vychlazuje. Chladicí dopravník Stelmor má uzavíratelné kryty téměř v celé délce a cca ze dvou třetin délky jsou umístěny ventilátory. Tím je dána možnost nízkého i vysokého teplotního spádu při chlazení drátu, podle toho, jaké jsou na chlazení daného materiálu a průměru drátu požadavky. Jednotlivé smyčky drátu padají středěně naváděcím kuželem do sběrné komory a ukládají se do svítků.

1.1 Podstata technologie tažení

Rozlišujeme tyto základní technologické operace:

- odokujování s povrchovou úpravou drátu,
- tažení,
- tepelné zpracování – žíhání, patentování, kalení,

Vhodnou kombinací tažení za studena a tepelného zpracování ocelového válcovaného drátu příslušné jakosti se dosáhne potřebných rozměrů a požadovaného materiálového zpevnění. Vhodnou volbou struktury a kombinací obsahu uhlíku v oceli s velikostí deformace při tažení umožňuje dosáhnout široké rozmezí úrovně mechanických a technologických vlastností vyráběných drátů /1/.

Odokujování

Ocelový válcovaný drát (vstupní polotovár) je pokryt vrstvou okují, která je tvořena wüstitem – FeO , magnetitem – Fe_3O_4 a hematitem – Fe_2O_3 . Pro odstranění okují je použito moření v kyselině sírové a kyselině chlorovodíkové. Následuje vodní oplach, boraxování, sušení a další vodní oplachy s následnou povrchovou úpravou měděním, oplachem sušením, fosfátováním, oplachem, boraxováním, sušením, dalším oplachem, fosfátováním, oplachem nanesením mýdla a sušením.

Dále je provedeno fosfátování povrchu drátu, které umožňuje zvýšení přilnavosti maziva na povrchu drátu, zmenšuje opotřebení průvlaku a snižuje množství energie, které je potřebné při tažení vyššími rychlostmi.

Následuje boraxování, které neutralizuje kyselé zbytky na povrchu drátu a dává dobrou protikorozi ochranu.

V poslední operaci povrchové ochrany je drát sušen. Cílem je odstranění vodíku, který difundoval do drátu při moření a tímto zamezuje vodíkové křehkosti.

Vlastní tažení je prováděno na dvoutahovém drátotahu. V procesu tažení dochází k redukci průřezu válcovaného drátu a tímto k jeho prodloužení ve směru hlavního (osového) napětí za současného zvyšování pevnosti, meze pružnosti a průtažnosti, tvrdosti, ale zároveň dochází ke snížení plasticity (tažnosti a kontrakce). Dochází ke zpevnění materiálu drátu v důsledku odporu struktury vůči plastické deformaci, vyvolané příslušným napětím. Struktura je tvořena – měkkým a tvárným feritem a tvrdým a křehkým cementitem. Zpevnění je způsobeno napětím mezi zrny feritu a cementitu /3/. Následuje žíhání na měkko za účelem přeměny lamelárního perlitu na

perlit globulární a zabezpečení dalších požadovaných vlastností drátu před jeho dalším objemovým tvářením za studena do finálního tvaru spojovací součásti.

2. Zkoušky tvařitelnosti válcovaného a taženého drátu.

Klasické pēchovací zkoušky byly provedeny na trhacím zařízení typu ZD 40, které je propojeno s řídící a vyhodnocovací jednotkou. Jsou snímány velikosti pēchovací síly (F) v závislosti na ůběru (Δh). Následně jsou tyto závislosti převedeny na velikosti pētvárného odporu (σ) a logaritmické deformace (ϵ). Střední velikost deformační rychlosti u klasických pēchovacích zkoušek se pohybovala v rozmezí $\dot{\epsilon} = (0.5 - 1) \text{ s}^{-1}$. U zkoušek dynamických pak od $\dot{\epsilon} = (10 - 60) \text{ s}^{-1}$, které odpovídají deformačním rychlostem vyvozovaných na tvářecích automatech.

Cílem provedených zkoušek bylo především určení velikostí pētvárného odporu v oblasti pēchodové a v oblasti maxima při různých velikostech střední deformační rychlosti pro drát válcovaný a tažený.

2.1 Vačkový plastometr

Vačkový plastometr se používá na kurčování pētvárných odporů při pēchovacích, popřípadě tahových zkouškách při konstantní poměrné rychlosti tváření. Plastometr má třífázový asynchronní motor s výkonem 44 kW a otáčkami 1 500 min^{-1} . Energie, kterou dodává setrvačnický plastometru do procesu je :

$$W = I \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot \omega^2 = \pi^2 \cdot R^4 \cdot h \cdot \rho \cdot n \quad [\text{J}] \quad (1)$$

kde R a h (m) je poměr a šířka setrvačnicku, ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je měrná hmotnost a n [$\text{ot} \cdot \text{s}^{-1}$] jsou pracovní otáčky.

Konstrukce vačky plastometru

Konstrukce vačky plastometru vychází z předpokladu, že ϵ je poměrná rychlost tváření, kterou se k sobě pēbližují dva pēřřezy vzdálené od sebe o jednotku délky, potom obdržíme:

$$\epsilon = v / h \quad [\text{s}^{-1}] \quad (2)$$

kde v je rychlost nástroje [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], h pēřslušná okamžitá výška [m]. Jestliže máme dodržet podmínku $\dot{\epsilon} = \text{konstanta}$, musí se při zmenšování výšky h hodnota rychlosti v snižovat.

Závislost mezi rychlostí kování a okamžitou výškou při konstantní ϵ je na Obr. 2. Pēchováním vzorku z výšky $h = y_0$ na výšku $h = y$ vertikální rychlost vačky - kovádklesá. Postup pro výpočet této vačky vychází z předpokladu, že vřeteno plastometru se otáčí konstantní obvodovou rychlostí v_x , v závislosti na tom se pohybuje styčný bod vačky se vzorkem dolů rychlostí v_y .

Pokud obvod vřetena rozvineme do pēřímky, která bude shodná s osou x a styčný bod se pohybuje ve směru kolmém na tuto pēřímku tj. po ose y , potom platí rovnost mezi poměrem dráhových elementů v jednotlivých osách k poměru rychlostí:

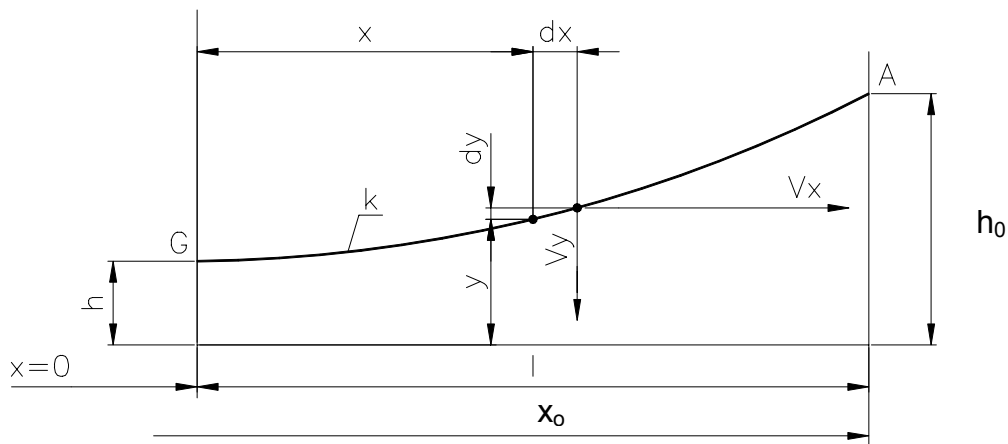
$$\frac{v_x}{v_y} = \frac{dx}{dy} \cong \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad [-] \quad (3)$$

Postup při výpočtu a konstrukci vačky plastometru je provedený na teoretickém modelu se zvoleným vzorkem. Tvar křivky plastometru se odvozuje pro základní nekonečně velký poloměr tj. pro pēřímochařý pohyb vačky. Na obr. 1 je znázorněno odvození základního tvaru křivky vačky.

$$\frac{v_x \cdot dy}{v_y} = dx \quad [-] \quad (4)$$

Integrací obou stran rovnice od $x = 0$ po l - délku vačky dostáváme funkci vodící křivky vačky:

$$\int_0^l dx = \frac{v_x}{\dot{\phi}} \int_h^{h_0} \frac{1}{y} dy \Rightarrow x = \frac{v_x}{\dot{\phi}} \ln y \quad [\text{m}] \quad (5)$$



Obr. 1 Odvození tvaru vačky

Vačku nasazujeme na kotouč o průměru D . Daný průměr spolu s rychlostí deformace $\dot{\epsilon}$ si volíme. Kotouč se otáčí konstantními otáčkami n obvodovou rychlostí v_x na průměru D :

$$v_x = \frac{\pi D n}{60} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6)$$

kde D je průměr kotouče [mm], n otáčky vačky [ot/min].

Délka vačky bude pro $l = \pi \cdot D$ - celý obvod kotouče:

$$l = \frac{v_x}{\dot{\epsilon}} \cdot \ln h_o - \frac{v_x}{\dot{\epsilon}} \cdot \ln h = \frac{v_x}{\dot{\epsilon}} \ln \frac{h_o}{h} [\text{m}] \quad (7)$$

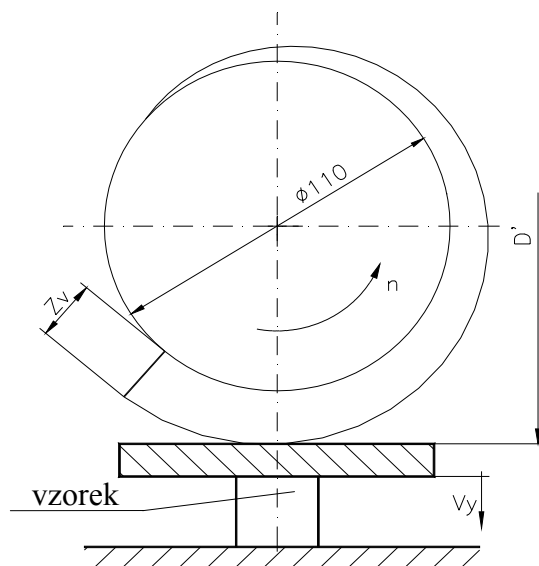
Pro využití jen části obvodu kotouče je délka definovaná na 3/4 obvodu kotouče

$$l = \pi \cdot D \cdot m \quad [\text{m}] \quad (8)$$

kde $m = 0.75$, průměr čepu, na který je vačka nasazená $D = 110\text{mm}$.

Vzdálenost mezi dvěma body vačky na ose x při otočení o zdvih $y_o - y$:

$$x_o - x = \Delta x = \frac{v_x}{\dot{\epsilon}} \cdot \ln y_o - \frac{v_x}{\dot{\epsilon}} \cdot \ln y = \frac{v_x}{\dot{\epsilon}} \ln \frac{y_o}{y} \quad [\text{m}] \quad (9)$$



Obr. 2 Schéma práce vačky

Průměr D dotyku vzorku s vačkou:

$$D^{\circ} = D + 2 \cdot (z_v - i \cdot \Delta y) \quad [\text{m}] \quad (10)$$

Vertikální počáteční rychlost vačky je definována ze střední hodnoty rychlosti deformace :

$$v_y = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot (y_o - y)}{\ln \frac{y_o}{y}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

Pro různé rychlosti deformace a velikost stlačení vzorku, při počáteční výšce vzorku 10 mm, musíme upravit podmínky pěchování mezi které patří obvodová rychlost otáčení vřetene v_x . Ta závisí na poloměru resp. průměru, na kterém dochází k dotyku vzorku s vačkou a otáčkách vačky n . Průměr D , na kterém dochází k dotyku je průměr kotouče vačky zvětšený o pozici bodu prvního dotyku vačky se vzorkem. Aby jsme vzorek stlačili o požadovanou velikost pěchování, musíme nastavit výšku základové desky tak aby vačka v okamžiku dokončení pěchování vzorku byla ve stavu maximální excentricity vačky. Rychlost vačky roste téměř lineárně v závislosti na velikosti pěchování a tedy vzdálenosti bodu dotyku od středu vačky.

Pro výpočet okamžité rychlosti vačky jsme použili vztah, ze kterého jsme vyjádřili vertikální rychlost v_y . Poměr elementů délek jsme upravili dosazením za jednotlivé složky co nejmenší hodnoty, dělení délky ve směru osy y a osy x . Dráhu ve směru osy y jsme rozdělili na díly o velikosti 0.05 mm. Dělení v ose x bylo odvozené od dělení v ose y . Dosazením do vztahu pro vodící křivku obdržíme:

$$\Delta y = 0.05 \text{ mm} \quad , \quad \Delta x = K \cdot \ln \frac{y_o - i \cdot \Delta y}{y_o - (i + 1) \cdot \Delta y} \quad [\text{m}] \quad (12)$$

kde K je konstanta vačky vyjadřující poměr rychlostí otáčení kotouče k průměrné rychlosti deformace a y_0 je počáteční výška vzorku při návrhu vačky, K charakterizuje tvar vodící křivky vačky na obvodu kotouče:

$$K = \frac{\pi \cdot D \cdot n_k}{60 \cdot \dot{\epsilon}_k} \quad [\text{m}] \quad (13)$$

Z předchozího vertikální rychlost má tvar:

$$v_y = v_x \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (14)$$

kde jsme už vyjádřili jednotlivé položky dy a dx zjednodušením pomocí dělení, položku v_x vyjádříme z rovnice (6) pro otáčení vřetena, na kterém je nasazený kotouč a vačka s otáčkami n . Otáčky vačky považujeme za konstantní po dobu celého děje přechování. Po úpravě je vertikální rychlost vačky:

$$v_y = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot (z_v - i \cdot \Delta y)) \cdot n}{60} \cdot \frac{\Delta y}{K \cdot \ln \frac{y_0' - i \cdot \Delta y}{y_0' - (i+1) \cdot \Delta y}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (15)$$

kde y_0' je původní výška vzorku dosazovaná při návrhu vačky, i - pořadí, index dílu dráhy vačky v ose y , $i = 0, 1, 2, 3 \dots$, pro $i = 20$ je stlačení rovné 1 mm, z_v - zdvih vačky, n - otáčky vačky - volíme [ot/min], $\Delta y \cdot i$ - přechování vzorku z výšky y_0 na výšku y . Δy - dělení (0,05 mm).

Když chceme volit rychlost deformace $\dot{\phi}$ při různém stlačení vzorku ($y_0 - y$) pro zadanou vačku, musíme měnit obvodovou rychlost, tedy otáčky vačky. Za v_y dosadíme vztah pro výpočet počáteční rychlosti vačky při daném přechování vzorku, odkud vyjádříme rychlost v_x a tedy počáteční otáčky n .

Z čeho následně vyplývá závislost pro korekci otáček. Pokud tedy byla vačka navrhovaná pro konkrétní otáčky a danou hodnotu plastické deformace, je její tvar je neměnný s konstantní vodící křivkou. Z tohoto důvodu musíme považovat hodnoty otáček nebo obvodové rychlosti vačky a rychlosti deformace volených při jejich návrhu za jimi charakterizující konstanty.

2.2 Klasické přechovací zkoušky

Přechovací zkouška se používá ke zjišťování plastických vlastností materiálů za studena i za tepla. Napětíový stav při přechovací zkoušce odpovídá napětí při skutečném technologickém zpracování (kování, lisování, válcování). Zkouškou tedy můžeme zjistit potřebné velikosti přetvárného odporu u zkoušeného materiálu.

Provedením přechovací zkoušky jsme získali hodnoty, které nám charakterizují základní mechanické a plastické vlastnosti válcovaného i taženého drátu z mikrolegované oceli typu 23MnB4. Po vyhodnocení dat jsme stanovili napětí v přechodové oblasti σ_{pr} a maximální napětí σ při maximálním úběru 70 %

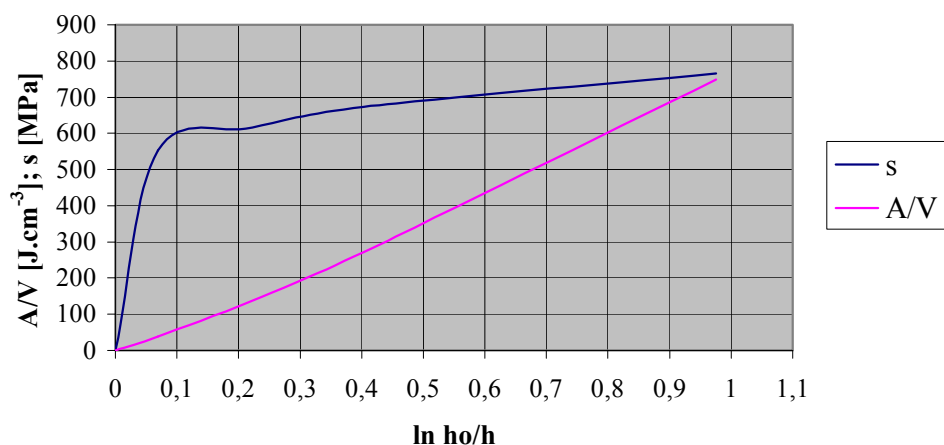
Chemické složení vzorků z oceli 23MnB4: 0.22%C, 0.008%S, 0.015%P, 0.08%Si, 0.97%Mn, 0.3%Cr, 0.01%Cu, 0.04%Ni, 0.03%Ti, 0.028%Al, 0.006%V, 0.014%Mo, 0.002%B, 0.005%N

Příklad dosažených výsledků u přechovací zkoušky válcovaného drátu:

Vzorek č. 38

$$\sigma_{\max} = 782,2 \text{ MPa}$$

Průběh přetvárného odporu (σ) a jednotkové deformační práce (A/V) na deformaci



Obr.3 Průběh přetvárného odporu a deformační práce

Vyhodnocení výsledků měření

Z dosažených výsledků je patrné, že u velikosti přechodného napětí σ_{pr} a maximálního napětí σ válcovaného drátu jsou v porovnání s parametry σ_{pr}, σ drátu taženého jen nepatrné rozdíly. Je možno konstatovat, že drát po tažení se jen nepatrně více zpevnil ($\sigma_{\max, STR} = 780$ a 760 MPa)

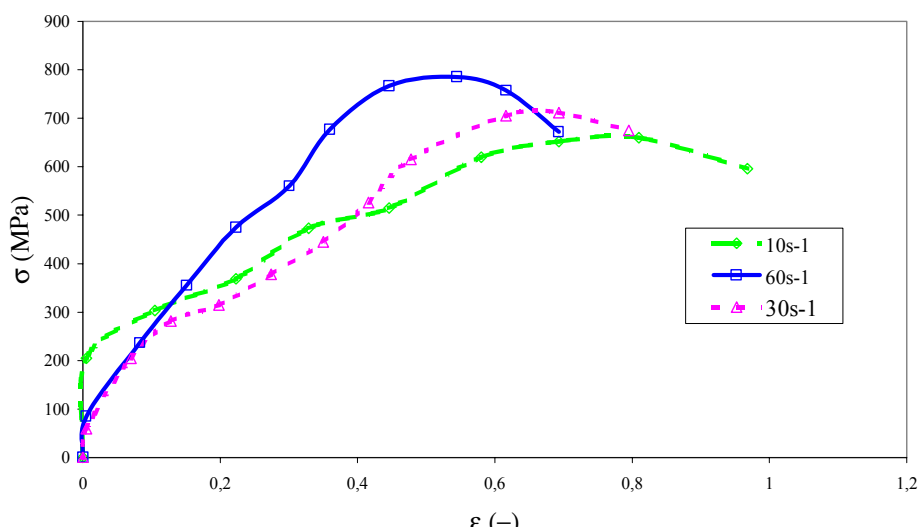
3. Dynamické přechovací zkoušky drátu válcovaného a taženého z oceli 23MnB4

Byly provedeny zkoušky tvařitelnosti válcovaného a taženého drátu. Z hlediska predikce chování drátu při jeho tváření do finální podoby spojovací součásti, které je prováděno na tvářecích automatech s vysokými deformačními rychlostmi, byl položen důraz na provedení dynamických přechovacích zkoušek na plastometru. Dynamické přechovací zkoušky byly prováděny na vačkovém plastometru typu ROTO s max. tvářecí silou $F = 0,07$ MN.

Tab.1 Příklad dosažených hodnot přetvárného odporu a deformace pro úběr 70%

vzorek 6 – $60s^{-1}$		vzorek 9 – $30s^{-1}$		vzorek 15 – $10s^{-1}$	
σ (MPa)	ϵ (-)	σ (MPa)	ϵ (-)	σ (MPa)	ϵ (-)
85	0,005	60	0,005	205	0,055
237	0,083	205	0,07	303	0,105
355	0,151	282	0,128	369	0,223
475	0,223	315	0,198	473	0,329
561	0,301	378	0,274	515	0,446
677	0,360	445	0,350	620	0,580
767	0,446	526	0,416	652	0,693
785	0,545	615	0,478	660	0,810
758	0,616	705	0,616	596	0,968
672	0,693	712	0,693	-	-

Materiál válcovaný konečná výška 3 mm

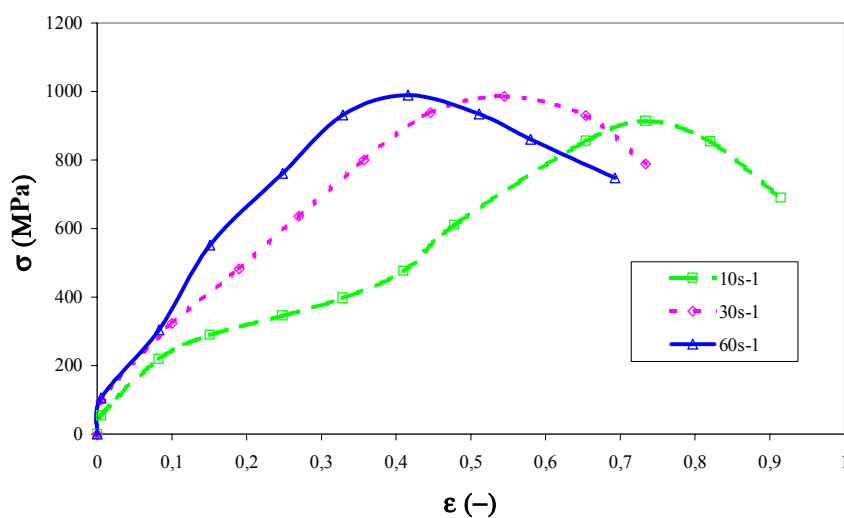


Graf 2: Velikost deformačního napětí pro různé velikosti rychlosti deformace

Tab.2: Příklad dosažených hodnot deformačního napětí a deformace pro úběr 70%

vzorek 7 – 60s ⁻¹		vzorek 12 – 30s ⁻¹		vzorek 17 – 10s ⁻¹	
σ (MPa)	ε (-)	σ (MPa)	ε (-)	σ (MPa)	ε (-)
105	0,005	100	0,005	55	0,005
304	0,083	323	0,1	219	0,083
552	0,151	482	0,19	289	0,151
761	0,248	636	0,27	345	0,248
932	0,329	800	0,357	397	0,329
990	0,416	938	0,446	476	0,410
935	0,511	986	0,545	610	0,478
861	0,580	930	0,654	855	0,654
748	0,693	789	0,734	914	0,734
-	-	-	-	854	0,821

Materiál tažený konečná výška 3 mm



Graf 2: Velikost deformačního napětí pro různé velikosti rychlosti deformace

4. Zhodnocení

Bylo dosaženo rozdílných velikostí maximálního přetvárného odporu, zejména u dynamických pēchovacích zkoušek. Vyšší zpevnění, dosažené zejména u drátu taženého v porovnání s drátem válcovaným, bylo závislé od velikosti deformační rychlosti /4,5/. U válcovaného drátu velikost maxima přetvárného odporu dosáhla hodnoty $\sigma_{pmax} = 785$ MPa oproti $\sigma_{pmax} = 990$ MPa u drátu taženého při rychlosti $\dot{\epsilon} = 60 \text{ s}^{-1}$. Zpevnění je zapříčiněno operací tažení Z výsledků je dále zřejmé, že u vyšších deformačních rychlostí dochází ke zpevňování už při nižších velikostech úběrů ($\dot{\epsilon} = 60$ a 30 s^{-1}) vzhledem k velikosti maxima přetvárného odporu u rychlostí $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$ jak u drátu válcovaného tak i taženého. Zcela novým poznatkem je zjištění, že u taženého drátu došlo k vyššímu zpevnění už při nižších rychlostech $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$, přičemž maximum dosahovalo přibližně stejných hodnot jako u deformačních rychlostí 60 a 30 s^{-1} . Zvyšování rychlosti deformace nemá větší vliv na nárůst maxima přetvárného odporu σ_p /3/. Rychlost deformace podstatně ovlivňuje průběh křivky nárůstu zpevnění. Větší rozdíl v dosažených velikostech přetvárného odporu byl patrný pouze u drátu válcovaného. Ve srovnání s výsledky dosaženými pomocí klasických pēchovacích zkoušek došlo k nárůstu maxima velikosti přetv. odporu σ_{pmax} o 20 – 25 % pouze u drátu taženého. Při hodnotách úběru 70% nedocházelo ke vzniku povrchových vad (trhlin) ani k jinému typu porušení vzorku, což bylo prokázáno na výbrusech provedených zkoušek. Nově navržená metodika provádění dynamických pēchovacích zkoušek prokázala možnost použití vysokých deformačních rychlostí, které překračují hodnoty dosažené na tvářecích automatech, pro následné tvářecí operace při zhotovování finální součásti za studena.

5. Závěr

Dle dosažených experimentálních výsledků pēchovacích zkoušek tvařitelnosti, (klasických) i zkoušek provedených při vysokých rychlostech (dynamických) mikrolegované oceli 23MnB4 je možno konstatovat velmi pozitivní vliv mikropřísad Cu, Mo, Ni, Al, Ti, V, B na dosažení vyšších hodnot mechanických vlastností jak rovněž i plasticity. Provedení zkoušek při různých velikostech deformačních rychlostí nám dovoluje predikovat chování drátu v následných operacích objemového tváření za studena, při finální výrobě spojovacích součástí pro automobilový průmysl.

6. Literatura

- [1] Marcol, J.: Tažený ocelový drát, firemní literatura, ŽDB Bohumín, 1998
- [2] Petruška, J., Janíček, L., Maroš, B.: On the evaluation of strain-hardness reference curves from compression tests. In: Proceeding of the Interational Conference METAL Forming'2000, ISBN 90-5809-157-0, A.A. Balkema, Rotterdam (NL), pp 115- 119, Kraków, Polsko 9/2000.
- [3] Guthrie, R., M.: The effect of annealed vs. non annealed boron treated steel on cold headers, Wire Journal 1982-04, Vol. 15, Nb. 4, p.70-80
- [4] Petruška, J., Janíček, L.: Computationally-experimental workability determination of compressed cylindrical specimen with surface defect, J.Mat.Proc.Tech. 80-81 (1998), 572-578
- [5] Petruška, J., Janíček, L.: Evaluation of ductile fracture criteria by numerical simulation of compression test, Stroj.čas.50 (1999), No.4, pp.278-287

Úkol byl řešen v rámci projektu GAČR 106/02/0412