

ŠTRUKTÚRNE ZMENY LAMELÁRNEHO PERLITU V PROCESE ŤAHANIA ZA STUDENA

STRUCTURAL CHANGES OF LAMELLAR PERLITE UPON COLD DRAWING PROCESSE

Autor: *Ing. Viktor Tittel, CSc., *Ing. Peter Žúbor, PhD.*

Pracovisko: *Katedra tvárnenia, Materiálovotechnologická fakulta STU, Trnava*

**Katedra materiálového inžinierstva, Materiálovotechnologická fakulta STU,
Trnava*

Adresa: *Bottova 23, 917 24 Trnava, SR*

E-mail: viktor.tittel@stuba.sk,* peter.zubor@stuba.sk

Abstract

Priebeh deformačného spevňovania perlitických ocelí pri ťahaní drôtu za studena má podľa Emburyho a Fischera tri štádia. Vplyvom redukcie prierezu drôtu pri pretvorení dochádza k zmenám štruktúry ťahaného materiálu. Lamely feritu a cementitu v perlite sa postupne natáčajú v smere toku materiálu v procese tvárnenia, ohýbajú sa alebo dochádza k ich fragmentácií, čo môže spôsobiť vznik mikrotrhlín a následnú deštrukciu materiálu v procese ťahania. Podľa literatúry môže k fragmentácii lamiel dôjsť už v prvom štádiu t. z. pri skutočnom pretvorení $\varphi = 0,4-0,6$. Skúmali sme preto vlastnosti ocele s lamelárnym perlitom a zmeny jej mikroštruktúry až do pretvorenia $\varphi = 1,51$. Skúškami sa potvrdil priebeh spevňovania v 1. a 2. štádiu. Fragmentáciu cementitických lamiel sme ani pre pretvorení $\varphi = 1,51$ nepozorovali.

According to Embury and Fischer the mode of the strain hardening of the steels with perlitic structure upon cold drawing of the wire has three stages. At plastic deformation the reduction of cross-section of the wire results in structure change of drawn material. Lamellas of both ferrite and cementite in the perlite have become oriented along the direction of material flow induced by deformation that can lead to their bending or fragmentation and can provoke the microcrack generation, and consequently, the material fracture during drawing process. According to the literature sources the fragmentation of lamellas can occur just at the first stage, i.e. at real rate of the overall strain $\varphi = 0.4-0.6$. For this reason we have studied the properties and structural changes in the steel with lamellar perlite structure to be deformed up to $\varphi = 1.51$. Tests have shown that strain hardening of the steel takes place during first and second stages. The fragmentation of lamellas have not been observed even at overall strain $\varphi = 1.51$.

Key words

drôt ťahaný za studena, medza pevnosti, tvárniteľnosť, spevňovanie, perlit

cold drawn wire, tensile strenght, formability, strain hardening, perlite

Úvod

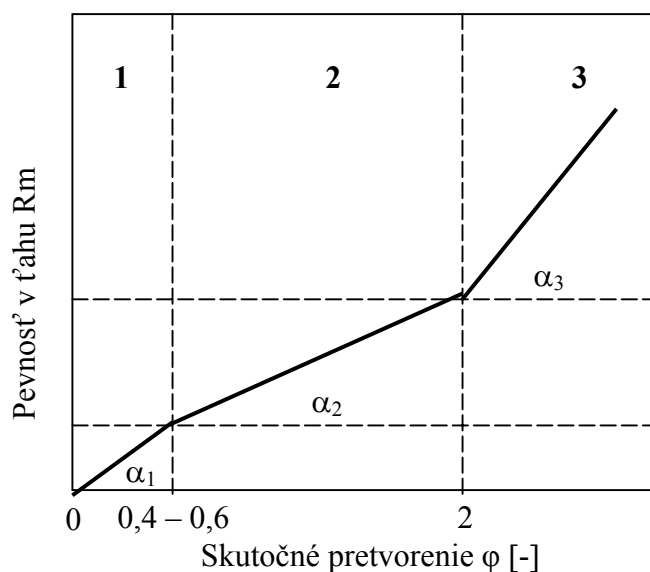
Na výrobu drôtov a lán na predpätú výstuž do betónu sa pre dosiahnutie komplexu potrebných mechanických vlastností používajú perlitické ocele. Východiskovým materiálom je riadne ochladzovaný valcovaný drôt (ROVD) s takými mechanickými a štruktúrnymi charakteristikami, ktoré sú vhodné na priame ťahanie (bez nutnosti patentovania valcovaného drôtu). Spravidla je to valcovaný drôt (VD) z vysokouhlíkovej ocele s približne eutektoidným zložením s mikroštruktúrou jemného lamelárneho perlitu, získanou riadeným ochladzovaním po valcovaní za tepla [1, 2]. Mechanické vlastnosti drôtu na predpätú výstuž do betónu sú dosahované nielen chemickým zložením ocele, ale aj štruktúrnym stavom, ktorý je daný veľkosťou pretvorenia za studena. Východisková štruktúra valcovaných eutektoidných ocelí pozostáva z dvoch fáz, mäkkého a tvárneho feritu a tvrdého cementitu. Cementit aj ferit v perlite majú spravidla tvar náhodne orientovaných tenkých lamiel. V priebehu redukovania prierezu pri ťahaní za studena dochádza k štruktúrnym zmenám, ktoré spôsobujú deformačné spevňovanie materiálu. Výsledkom znižovania prierezu drôtu v procese ťahania a tým spôsobených štruktúrnych zmien je priebeh krivky spevnenia pri ťahaní (obr. 1), ktorá je vyjadrená rovnicou:

$$R_m = f(\varphi), \quad (1)$$

kde:

R_m – pevnosť v ťahu,

φ – logaritmické pretvorenie.



Podľa literatúry [1] priebeh krivky spevnenia má tri charakteristické štádiá:

1. Počiatočné štádium intenzívneho nárastu pevnosti do $\varphi = 0,4 - 0,6$. Tu prebieha najmä deformačné spevňovanie feritu a začína natáčanie lamiel cementitu.
2. Druhé štádium menej intenzívnejšieho spevňovania sa nachádza v rozsahu pretvorení $\varphi = 0,6 - 2$.
3. Tretie štádium najintenzívnejšieho spevňovania nastáva pri pretvorení väčšom ako $\varphi = 2$

Obr. 1. Priebeh krivky spevnenia pri ťahaní ocelového drôtu [1]

Podľa Emburyho a Fischera [1] v tretej etape spevnenia nastáva fragmentácia lamiel cementitu a v dôsledku toho v ťahanom drôte vznikajú mikrotrhliny. Tvorba a rast mikrotrhlín v miestach porušovania cementitických lamiel vedie k vyčerpaniu tvárnosti materiálu. Na tvorbu týchto trhlín nepriaznivo vplyvajú hrubé lamely cementitu a ich nepriaznivá orientácia, vysoké dielčie úbery v procese ťahania a deformačné starnutie [1, 4].

Cieľom príspevku je zistiť priebeh spevňovania ROVD s približne eutektoidným zložením v procese plastickej deformácie za studena, ako aj preskúmať správanie sa lamelárneho perlitu a najmä lamiel cementitu pri ťahaní drôtu s maximálnym pretvorením $\varphi = 1,51$.

Materiál a metodika experimentu

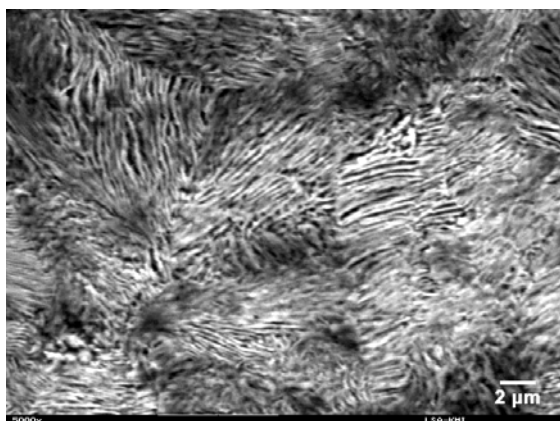
Na skúšky bol použitý VD vyrobený na kontidrôtovej trati s riadeným ochladzovaním valcovaného drôtu [3, 8]. Chemické zloženie materiálu je uvedené v tabuľke 1. Obsah ďalších prvkov (Ni, Mo, Cu, Al) bol podľa STN EN 10 016-2 [5].

CHEMICKÉ ZLOŽENIE OCELE

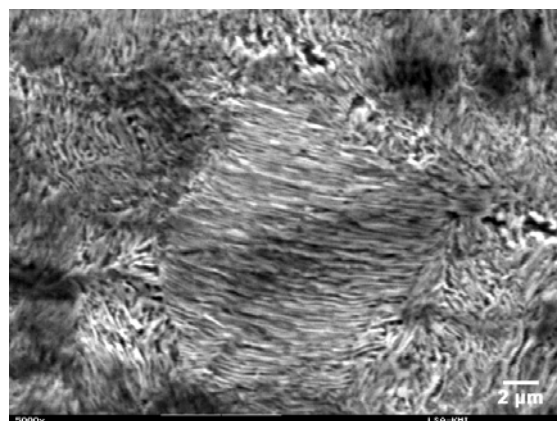
Tabuľka 1

Drôt / výrobca	Chemické zloženie [hmot. %]						
	C	Mn	Si	Cr	V	P	S
Ø 11 C82D SAARSTAHL	0,82	0,818	0,189	0,137	0,005	0,006	0,010

Valcované a ťahané drôty boli podrobené metalografickej analýze rastrovacím elektrónovým mikroskopom (REM). Mikroštruktúra bola zviditeľnená leptaním v 3 % nitale. Východisková mikroštruktúra ROVD s lamelárnym perlitom získaná z pozdĺžnych rezov drôtu je na obr. 2. a obr. 3. Na snímkach možno pozorovať jemné, rôzne orientované lamely perlitického cementitu.



Obr. 2. Mikroštruktúra riadene ochladzovaného valcovaného drôtu Ø 11 mm C82D východiskovom stave, lamelárny perlit



Obr. 3. Mikroštruktúra riadene ochladzovaného valcovaného drôtu Ø 11 mm C82D východiskovom stave, orientácia perlitických lamiel v pozdĺžnom smere

Pred ťahaním bol valcovaný drôt zbavený okují morením v HCl a po opláchnutí vodou bol fosfátovaný a boraxovaný. ROVD s priemerom Ø 11 mm bol postupne deformačne spevňovaný až na konečný priemer Ø 5,18 mm, čo zodpovedá pretvoreniu $\varphi = 1,51$. Ťahanie drôtu bolo realizované na sedemťahovom priamkovom drôtoťahu Herborn GGH 60/7. Rýchlosť ťahania bola $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Konečný priemer drôtu bol Ø 5,35 mm alebo Ø 5,18 mm. Väčší priemer bol určený pre stredový drôt lana a priemer Ø 5,18 mm pre vonkajšie drôty sedemdrôtovej konštrukcie lana typu $1 * 5,35 \text{ mm} + 6 * \text{Ø } 5,18 \text{ mm}$ (Ø lana 15,7 mm). Pri experimente sme použili vápenaté mazivo s obchodným názvom Profil S. Valcovaný drôt bol ťahaný siedmymi ťahmi s úbermi podľa tabuľky 2. Pre zistenie priebehu spevňovania boli odoberané vzorky drôtu na ťahovú skúšku po každom ťahu. Vždy boli zisťované tri hodnoty pevnosti v ťahu a do tabuľky 3 bol zaznamenaný ich aritmetický priemer. Na základe týchto hodnôt boli graficky zostrojené úsečky, dokumentujúce súvis R_m a φ . V 1. štádiu od $\varphi = 0$ do $\varphi = 0,42$ a v 2. štádiu od $\varphi = 0,42$ do $\varphi = 1,51$. Tieto boli porovnané s priebehom spevňovania podľa obr. 1.

	V D	Ťahaný drôt							
Číslo ťahu		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7*.	7.
Priemer drôtu \varnothing [mm]	11	10,20	8,90	8,00	7,20	6,50	5,80	5,35	5,18

*7. ťah drôtu pre stredový drôt lana

Dosiahnuté výsledky a diskusia

Ťahovými skúškami zistené hodnoty pevnosti drôtu po každom ťahu sú zaznamenané v tabuľke 3.

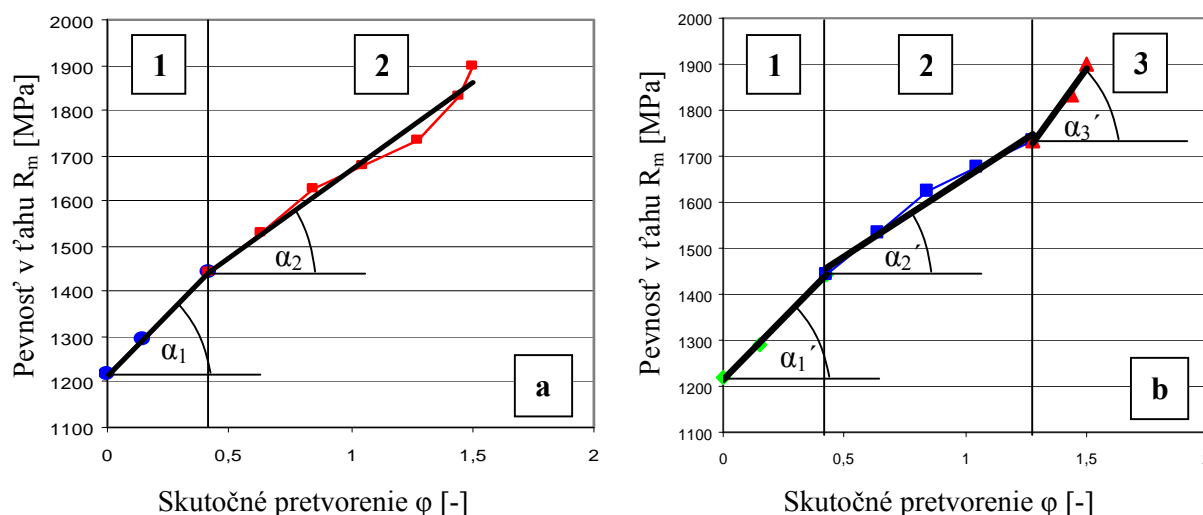
VEĽKOSŤ SKUTOČNÉHO PRETVORENIA A PEVNOSŤ DRÔTU V ŤAHO PO JEDNOTLIVÝCH ŤAHOCH

Tabuľka 3

		Číslo ťahu							
	V D	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7*.	7.
Priemer drôtu \varnothing [mm]	11	10,20	8,90	8,00	7,20	6,50	5,80	5,35	5,18
Celkové skutočné pretvorenie φ [-]	0	0,15	0,42	0,64	0,85	1,05	1,28	1,44	1,51
Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	1 217	1 292	1 443	1 532	1 626	1 677	1 733	1833	1 900

* 7. ťah drôtu pre stredový drôt lana

Ako vyplýva z tabuľky 3, valcovaný drôt s priemerom \varnothing 11 mm mal pevnosť v ťahu $R_m = 1217$ MPa. Po redukcii prierezu na hodnotu \varnothing 5,18 mm sa pevnosť drôtu v dôsledku jeho deformačného spevňovania zvýšila na hodnotu $R_m = 1900$ MPa. To znamená, že pretvorenie s hodnotou $\varphi = 1,51$ spôsobilo zvýšenie pevnosti o 683 MPa.



Obr. 4. Priebeh spevňovania drôtu
a – podľa literatúry [1]; b – podľa autorov článku

Intenzita deformačného spevňovanie drôtu v rozsahu pretvoreni $\varphi = 0 - 1,51$ by mala mať podľa literatúry [1] iba dve štádia: 1. štádium $\varphi = 0 - 0,42$ v rozsahu pretvorenia a 2. štádium v intervale pretvorenia $\varphi = 0,42 - 1,51$. Pri našich experimentoch sme v každom štádiu (obr. 4a) cez namerané body preložili metódou najmenších štvorcov priamku. Zistili sme, že pre 1. štádium má rovnica priamky tvar:

$$R_m = 535,85 * \varphi + 1214,7 , \quad (2)$$

pre 2. štádium platí:

$$R_m = 386,98 * \varphi + 1280,3 . \quad (3)$$

Z obr. č. 4a a rovníc (2, 3) je zrejmé, že spevňovanie v prvom štádiu je väčšie ako v druhom, čo zodpovedá literárnym údajom. Veľkosťou intenzity spevňovania je smernica uhlu α , teda $\text{tg } \alpha$. Z obrázku č. 4a je zrejmé, že $\text{tg } \alpha_1 > \text{tg } \alpha_2$.

Pri podrobnejšom sledovaní priebehu deformačného spevňovania lamelárneho perlitu v našich experimentoch však je možné rozdeliť priebeh nasledovne: prvé štádium $\varphi = 0 - 0,42$, druhé štádium $\varphi = 0,42 - 1,28$ a tretie štádium $\varphi = 1,28 - 1,51$ (obr. č. 4b). Znamenalo by to, že najintenzívnejšie spevňovanie t.j. tretie štádium spevňovania tejto ocele začína skôr, ako je uvádzané v literatúre [1]. Priebeh spevňovania pre skúmaný ROVD je znázornený na obr. č. 4b. Zistili sme, že rovnice priamky majú pre jednotlivé štádia nasledovne tvary:

pre 1. štádium platí:

$$R_m = 535,85 * \varphi + 1214,7 , \quad (4)$$

pre 2. štádium platí:

$$R_m = 340,3 * \varphi + 1313,6 , \quad (5)$$

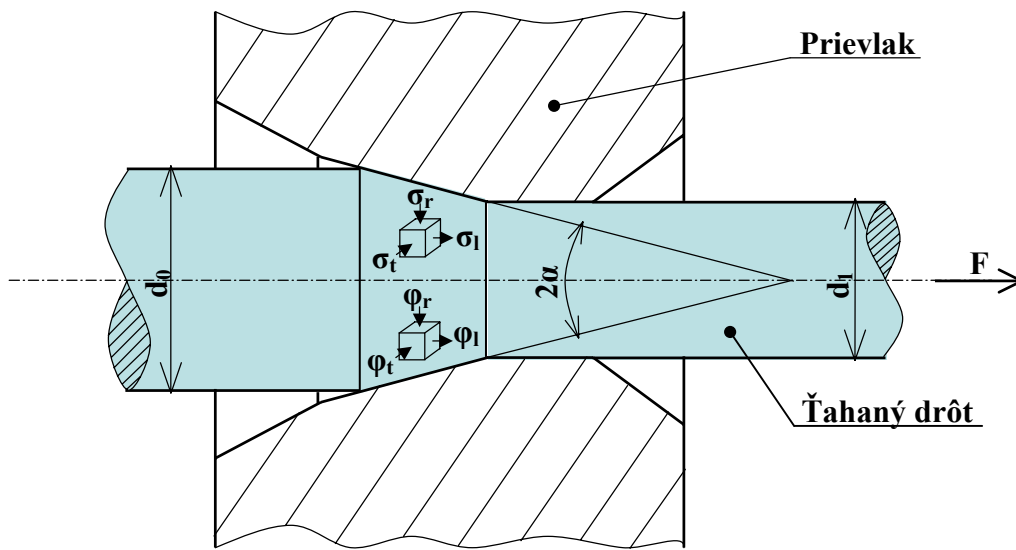
pre 3. štádium platí:

$$R_m = 715,6 * \varphi + 813,51 . \quad (6)$$

Z obrázku 4b je zrejmé, že $\text{tg } \alpha_3 > \text{tg } \alpha_1 > \text{tg } \alpha_2$.

Pre jednoznačnejšie potvrdenie našich výsledkov (t. j. že tretie štádium deformačného spevnenia začína pri menšom pretvorení ako $\varphi = 2$) bude potrebné priebeh krivky i mikroštruktúrne zmeny detailnejšie preskúmať v ďalších experimentoch, avšak s podstatne viacerými vzorkami a pri väčších pretvoreniach, ako $\varphi = 1,51$.

Pretvorenie a deformačné spevňovanie pri ťahaní drôtu je výsledkom trojosového stavu napätosti a trojosového stavu pretvorenia, ktoré sú schematicky znázornené na obr. 5.



Obr. 5. Schéma napäťovo – deformačného stavu pri ťahaní drôtu

kde:

F – ťažná sila

d_0 – vstupný priemer drôtu

d_1 – výstupný priemer drôtu

2α – uhol ťažného kužeľa

σ_l – pozdĺžne (absolútne najväčšie) ťahové napätie

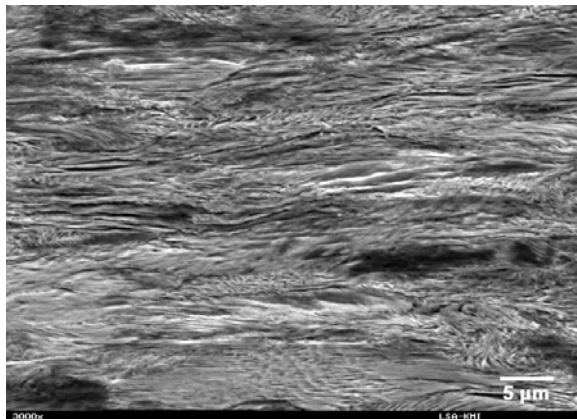
σ_r – radiálne tlakové napätie

σ_t – obvodové tlakové napätie

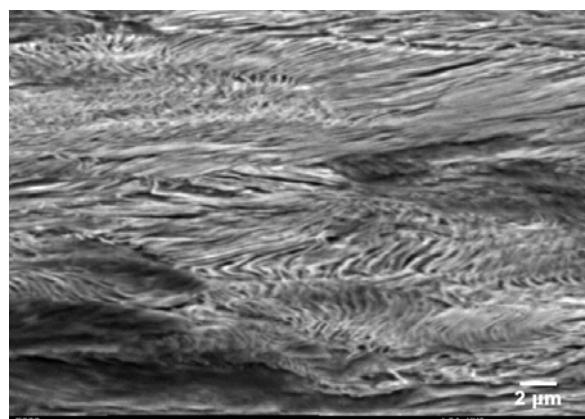
φ_l – pozdĺžne pretvorenie v smere ťahového napätia

φ_r – radiálne pretvorenie

φ_t – tangenciálne pretvorenie.



Obr. 6. Drôt C82D s priemerom $\varnothing 5,18$ mm (po redukcií s pretvorením $\varphi = 1,51$). Lamely cementitu sú prednostne orientované v smere ťahania drôtu.



Obr. 7. Drôt C82D priemeru $\varnothing 5,18$ mm (po redukcií s pretvorením $\varphi = 1,51$). Detail na deformované lamely cementitu.

Pretvorenú mikroštruktúru valcovaného oceľového drôtu s lamelárnym perlitom sme po ťahaní drôtu podrobne analyzovali pomocou REM, pričom pre lepšie rozlíšenie tvaru a konti-

nuitu cementitických lamiel sme predĺžili čas leptania. Mikroštruktúrnou analýzou sa potvrdila vhodnosť východiskovej perlitickej štruktúry s jemnými cementitickými lamelami na tvárnosť drôtu až do maximálneho pretvorenia $\varphi = 1,51$. V pretvorených drôtoch sme nepozorovali praskanie cementitických lamiel, ktoré by viedlo k tvorbe mikrotrhlín. Na obr. 6 a 7 je vidieť, že jemné cementitické lamely sú prednostne orientované v smere ťahania drôtu, čo svedčí o ich vysokej tvárnosti pri danom stave napätosti a technologických podmienkach deformácie.

Záver

Z experimentov vyplynuli nasledovne závery. Priebeh spevňovania perlitickej ocele v rozsahu $\varphi = 0 - 1,51$ môžeme podľa literatúry [1] rozdeliť na dve štádia a to $\varphi = 0 - 0,42$ je 1. štádium a $\varphi = 0,42 - 1,51$ je 2. štádium. Priebeh spevňovania skúmaného ROVD, však naznačuje, že v rozsahu pretvorenia $\varphi = 0 - 1,51$ by sme priebeh deformačného spevňovania mohli rozdeliť až na tri štádia, resp. že oblasť $\varphi > 1,28$ by mohla byť 3. štádium spevňovania.

Výchisková pevnosť v ťahu valcovaného drôtu s priemerom $\varnothing 11$ mm bola $R_m = 1\,217$ MPa. Po redukcii prierezu na hodnotu $\varnothing 5,18$ mm sa pevnosť drôtu v dôsledku jeho deformačného spevňovania zvýšila až na hodnotu $R_m = 1\,900$ MPa. To znamená, že pretvorenie s hodnotou $\varphi = 1,51$ spôsobilo zvýšenie pevnosti o 683 MPa.

Detailnou mikroštruktúrnou analýzou na REM sa zistilo, že v materiáli nedošlo k praskaniu lamiel cementitu ani po pretvorení $\varphi = 1,51$.

Experimenty a výsledky riešenia boli realizované v Drôtovni Hlohovec.

Zoznam bibliografických odkazov:

- [1] MARCOL, J. *Tažený ocelový drát*. Bohumín: ŽDB, a.s. Bohumín, 1996.
- [2] KUO OCHIAI, MICHIIHIKO NAGUMO, TETSUYA AMAKAWA, TOSCHIIHIKO TAKAHASCHI. Direct-patenting high strength steel wire rod strengthened by silicon. In *Wire journal international*, júl 1983.
- [3] TITTEL, V. The development of technology of steel wires production for reinforcing elements of high strength for prestressed concrete. In *CO-MAT-TECH 2004*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2004.
- [4] GOTWALDOVÁ, I. Vliv vybraných činitelů na vlastnosti perlitických drátů po tažení. In *Sborník Perlitické oceli*. VUHŽ Dobruška, 1981.
- [5] STN EN 10016 – 2: 1994 Valcovaný drôt z nelegovanej ocele na ťahanie a/alebo valcovanie za studena, Časť 2: Osobitné požiadavky na valcovaný drôt pre všeobecné použitie.
- [6] prEN 10138-2: 2000 „Prestressing steel Part 3: Strand“.
- [7] KAPUSTOVÁ, M., BÍLIK, J. Využitie výpočtovej techniky v oblasti tvárnenia. In *Trendy technického vzdelávania 2000*. Olomouc: PF UP, 2000, s. 161-194.
- [8] TITTEL, V. *Výskum technológie výroby drôtu výroby drôtu $\varnothing 7,5$ mm a lán $\varnothing 15,7$ mm pre predpätú výstuž*. Záverečná správa. Hlohovec: Drôtovňa, 2000, 28 s.