

## Porovnání laboratorních výsledků a numerické simulace tahové zkoušky řetězu

### Comparison of Experimental Results and Numerical Simulation of the Chain Tensile Test

Mgr. Marek Vindyš<sup>1</sup>; Ing. Miroslav Melkus<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava, Česká Republika

<sup>2</sup> Řetězárna a.s., Polská 48, 790 81 Česká Ves, Česká Republika

*V článku je popsáno využití numerické simulace při návrhu a vývoji nového typu kombinovaného důlního řetězu u výrobce Řetězárna a.s. Ve společnosti Materiálový a metalurgický výzkum s.r.o. se provedly numerické simulace tahových zkoušek rozměrových variant řetězů  $38 \times 146$  mm a  $42 \times 146$  mm, přípustných podle normy DIN 22255. V jednotlivých variantách se měnily rozměry  $a$ ,  $b$  u profilu  $D$  a hlavní zaoblení profilu  $R$ . Hodnocení variant simulovaných řetězů se provedlo na základě pevnosti a prodloužení při tahové zkoušce. Následně se v modelovém měřítku přibližně 2:1 vyrobily prototypové řetězy. Vyroběné řetězy se podrobily tahovým zkouškám, při kterých se zjistila vysoká míra shody výsledků numerické simulace s průběhem zkoušek řetězů. Numerická simulace při zavádění nového výrobku efektivně zkrátila čas na vývoj, výrobu i zkoušení při jinak obvyklém testování velkého množství reálných zkušebních vzorků.*

**Klíčová slova:** numerická simulace; metoda konečných prvků; tahová zkouška řetězu

*Numerical simulation in Forge version NxT 2.0 of the French company Transvalor with licensed 12 computational cores was used in the design and development of a new type of combined mine chain at Řetězárna a.s. Numerical simulations of dimensional chain variants according to DIN 22255 and their tensile tests were performed. In different simulated variants the dimensions  $a$ ,  $b$  of the profile  $D$  were changed, as well as the main radius  $R$  of the profile. The evaluation of variants of the simulated chains was made on the basis of tensile strength and elongation at the tensile test. Consideration was also given to the equilibrium of the tensile stress deformation effect on the circular versus the  $D$  chain link according to the size of the deformation heating of the individual links. Subsequently in the model scale approximately 2:1 prototype chains were produced in two dimensional chain link variants, namely  $38 \times 146$  and  $42 \times 146$  mm. This production of the samples of new chain in fact took place with a high proportion of manual work. The produced chains were subjected to tensile tests, in which a high degree of correspondence with numerical simulation was observed concerning the course of the chain tests. The paper refers to the gradual development of the numerical simulation methodology from the use of the two half-link variant to the four-links variant. The simulation of the chain tension test had to solve the role of interaction between four chain links defined as objects with a full spatial finite element mesh. Certain differences in prototype chain simulations and tests are the result of the production process of the tested chain samples and the use of the strengthening model in numerical simulation for different steel compared to the actually used steel. Numerical simulations during introduction of a new product effectively reduced time of development, production and testing compared with otherwise customary testing of a large number of real test specimens. The results of this work provide a prerequisite for the use of this method and the cooperation of the manufacturer with the MMV company workplace in the development of other products of this type.*

**Key words:** numerical simulation; finite element method; chain tensile test

Řetězárna a.s. jako příjemce a MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. (dále jen MMV) jako partner řeší v programu Aplikace OP PIK projekt Vývoj důlního kombinovaného článkového řetězu o průměrech článků kruhového průřezu 38 a 42 mm dle normy DIN 22255. Řetěz se skládá z kombinací dvou článků různých profilů, které se neustále střídavě opakují až do dosažení požadované délky řetězu. Jeden z článků má profil kruhový a druhý má profil tvaru  $D$  po celém obvodu (obr. 1). Základní rozměry a pevnostní

parametry těchto řetězů jsou shrnuty v tab. 1 a 2 a na obr. 2. Standardní zkouškou řetězů je tahová zkouška, která se provádí na reálném vzorku řetězu o délce 5 článků [1].

Pro zvýšení efektivnosti výzkumně-vývojového řešení se v MMV řešila numerická simulace těchto tahových zkoušek u navržených rozměrů profilů. Byly vybrány řetězy s rozměry článků  $38 \times 146$  a  $42 \times 146$  mm (v dalším textu rozměrové varianty uváděny bez jednotek), přičemž pro oba tyto řetězy se uvažovala

sada rozměrových variant přípustných podle normy DIN 22255. V jednotlivých variantách se měnily rozměry  $D$  profilu:  $a$ ,  $b$  a hlavní zaoblení profilu  $R$  (tab. 1). Nejvhodnější zástupce, vybraný na základě provedených simulací, se následně fyzicky vyrobil a vyzkoušel ve firmě Řetězárna a.s. Pro snadnější odzkoušení a jednodušší výrobu řetězu byly pokusné modelové řetězy zmenšeny v měřítku 1,9:1 u řetězového vzorku  $38 \times 146$  a 2,1:1 u řetězového vzorku  $42 \times 146$ .

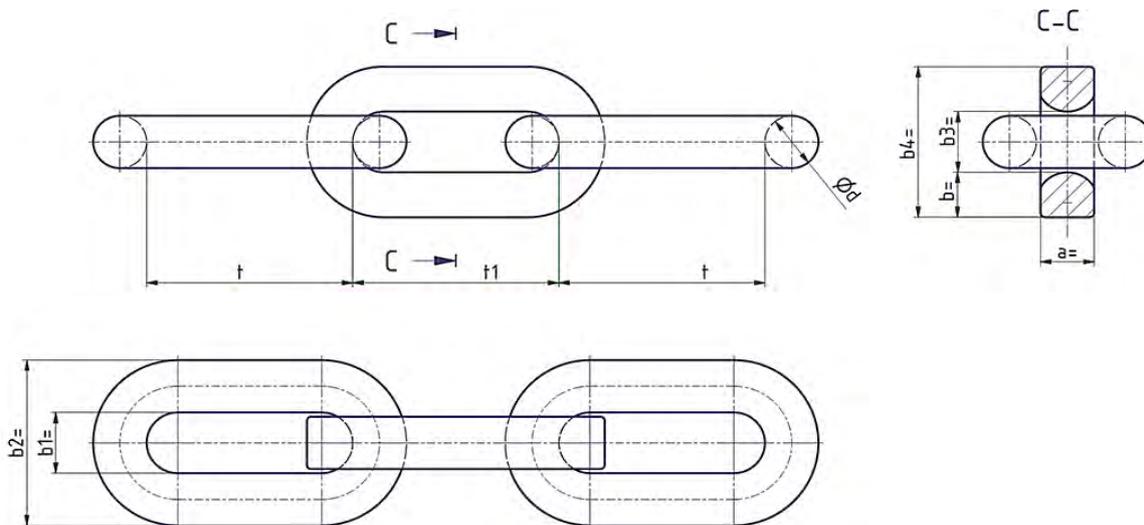
Zkušební vzorky řetězu se vyrobily s vysokým podílem ruční práce. Řetězové články byly ručně ohýbány za tepla na stroji ZKBH12 a svařeny odporovým odtavovacím svařením s předehřevem na stroji ASE3. Poté se tepelně zpracovaly a vyzkoušely na trhacím stroji Labtest 5 4000 [2].



Obr. 1 Důlní kombinovaný článkový řetěz  
Fig. 1 Combined mine link chain

Tab. 1 Rozměry a tolerance důlního kombinovaného řetězu dle normy DIN 22255 [1]  
Tab. 1 Dimensions and tolerances of the mine combined chain according to DIN 22255 specification [1]

Název	Rozměry kruhového článku				Rozměry $D$ článku			
	jmenovitý průměr $d$	rozteč $t$	vnitřní šířka	vnější šířka	profil $D$	rozteč $t1$	vnitřní šířka	vnější šířka
			$b1$ min.	$b2$ max.	max. $a \times b$		$b3$ min.	$b4$ max.
38×146/D	$38 \pm 1,1$	$146 \pm 1,5$	42,1	123	$42 \times 34,5$	$146 \pm 1,5$	42	111
42×146/D	$42 \pm 1,1$	$146 \pm 1,5$	48,6	139	$48,5 \times 34,5$	$146 \pm 1,3$	46	115



Obr. 2 Výkres kombinovaného řetězu [1]  
Fig. 2 Combined chain drawing [1]

Tab. 2 Pevnostní parametry důlního kombinovaného řetězu dle normy DIN 22255 [1]  
Tab. 2 Strength parameters of the mine combined chain according to DIN 22255 specification [1]

Název	Pevnostní parametry						
	provozní síla	zkušební síla		prodloužení při zkušební síle	trhací síla	prodloužení do přetržení	ohyb článku
	max. kN	min. kN	max. kN	% max.	(min.)	% min.	
38×146/D	1130	1360	1564	1,6	1820	11	38
42×146/D	1380	1660	1909		2220	11	42

## 1. Numerická simulace tahové zkoušky řetězu

Kromě nástrojů matematického modelování a laboratorních zařízení pro fyzikální simulaci se pro řešení tvářecí problematiky ve společnosti MMV používá také přístup numerické simulace, pracující na bázi metody konečných prvků, a to program Forge verze NxT 2.0 francouzské firmy Transvalor s licencovanými 12 výpočetními jádry.

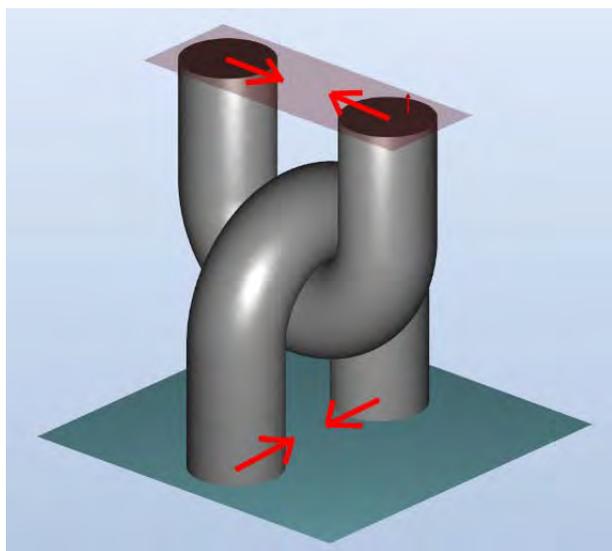
V konečně-prvkových (dále jen KP) úlohách zpracovaných v programu Forge se objevují (kromě specifických okrajových podmínek simulujících nástroje - manipulátory) dva typy objektů: tvářené kusy a nástroje. Tvářené kusy obsahují objemovou KP síť, jsou deformovatelné a jejich fyzikální veličiny jsou definované v celém objemu. Nástroje mají pouze povrchovou KP síť, nejsou deformovatelné a nemají veličiny definované v celém objemu.

Problém tahové zkoušky řetězu je unikátní v tom, že při namáhání interagují jednotlivé články řetězu mezi sebou a musí být definovány jako tvářené kusy. V naprosté většině úloh z oblasti tváření se objevují interakce pouze typu nástroj-tvářený kus nebo několik nástrojů-tvářený kus a ne tvářený kus-tvářený kus, které se řeší u úloh s deformovatelnými nástroji [odkazy na jiné práce].

### 1.1 Zpracování simulace v podobě dvou půlčlánků

V prvním přístupu byla simulace zpracována tak, že celý řetěz byl nahrazen nejmenším opakujícím se prvkem – dvěma půlčlánky, na které byly aplikovány okrajové podmínky zajišťující namáhání tahem.

Okrajové plochy půlčlánků ovšem musí mít možnost se volně pohybovat ve směrech kolmých na směr tahového namáhání, aby respektovaly přirozené deformační účinky tohoto namáhání v těchto směrech (obr. 3).



Obr. 3 Znárodnění očekávaných posunů okrajových ploch ve dvou půlčlánkovém provedení

Fig. 3 Illustration of the expected displacements of marginal surfaces in two half-cell designs

Nutný předpoklad zachování dvou stupňů volnosti elementů na okrajových plochách ovšem vede ke vzniku velmi rychlé rotace řetězu kolem osy namáhání. Příčinou tohoto jevu je pravděpodobně nesymetrie KP sítě a nutné opakované přesíťování v průběhu procesu. Hodnoty rychlosti otáčivého pohybu se dostaly řádově až na jednotky otáček za sekundu, přičemž rychlost posuvného pohybu při tahové zkoušce byla jen 50 mm·min<sup>-1</sup>. To sice nemělo vliv na výsledek (hodnota odstředivé síly otáčivého pohybu vzhledem k velikosti tahové síly byla stále zanedbatelná), ale vedlo to k neúměrně velkému výpočetnímu času, který navíc značně kolísal.

### 1.2 Zpracování simulace v podobě čtyř článků

Uvedené komplikace byly důvodem pro změnu přístupu při numerické simulaci, takže se vypracovala simulace, kde řetěz nabývá obvyklé podoby, jen počet článků testovaného řetězu byl ze standardního počtu pěti článků redukován na čtyři, a to z důvodu omezené výpočetní kapacity. Toto zpracování také zajišťuje ve skutečnosti lépe odpovídající hodnotu prodloužení řetězu do lomu. Ve finální fázi napínání řetězu je značně deformován pouze jeden článek ze čtyř, na rozdíl od předešlého případu, kde se deformoval jeden půlčlánek ze dvou. Přesto, podle zkušenosti Řetězárna a.s., má čtyřčlánková varianta cca o 1,5 % menší poměrné prodloužení při dosažení lomu než obvyklá zkouška sestávající z pěti článků. Na obr. 4 jsou znázorněny nasimulované lomy, v obou případech s aplikovaným normalizovaným Latham-Cockroft kritériem. Dva krajní úchyty byly definovány jako absolutně tuhé nástroje. Je nutno rovněž brát v potaz, že články sousedící s tuhými úchyty nevyjadřují stav namáhaného článku úplně věrně. Vzhledem ke kombinované formě řetězu proto nebylo možné redukovat počet článků na tři a méně.

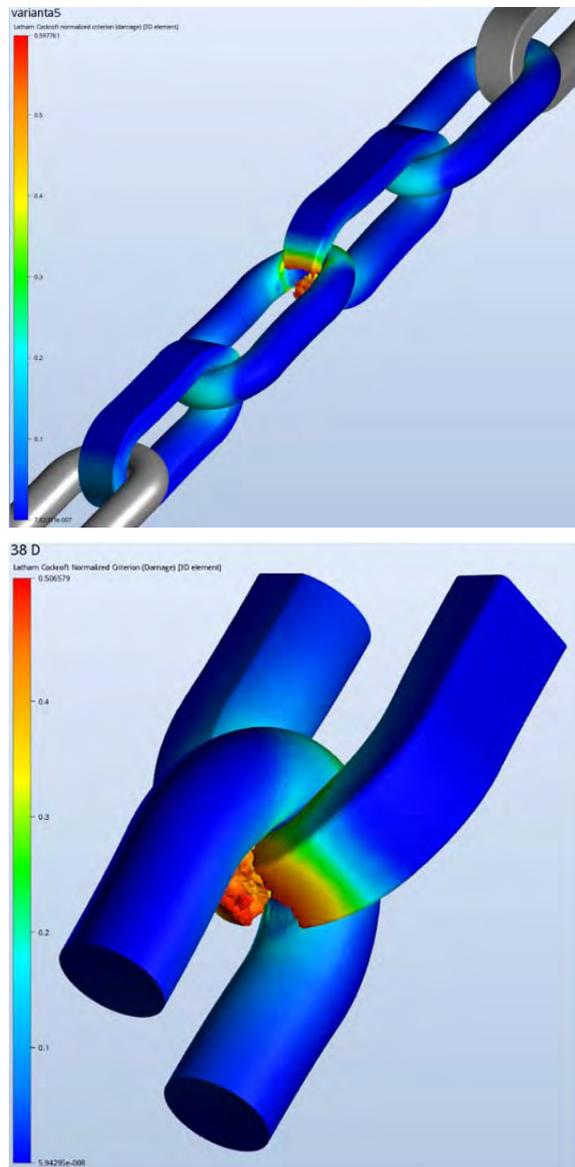
Materiálový model pro KP numerickou simulaci tahové zkoušky řetězu byl zvolen z materiálové databáze programu Forge pro ocel 40NiCrMo6, protože nebyla k dispozici data skutečně používané oceli 23MnNiMoCr5-4 [3]. Adekvátní experimentální data pro tvorbu nového materiálového modelu deformačního zpevnění oceli a zvolený materiál vykazují podobné mechanické vlastnosti jako výše uvedená skutečně používaná ocel. Model deformačního zpevnění materiálu je popsán Spittelovou aproximací ve zjednodušeném tvaru obsahujícím 4 parametry [4]:

$$\sigma = A e^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} e^{\frac{m_4}{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}^{m_3}, \quad (1)$$

Kde  $\varepsilon$  je skutečná deformace,  $\sigma$  přetvárný odpor materiálu,  $A$  konstanta konzistence,  $m_1$  teplotní koeficient,  $m_2$  citlivost deformačního zpevnění,  $m_3$  citlivost rychlosti deformace,  $m_4$  koeficient povolování deformace.

Přestup tepla mezi články řetězu byl definován jako střední hodnota za studena se součinitelem přestupu tepla  $\alpha = 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Tření mezi články řetězu bylo definováno jako střední hodnota z databáze programu

Forge popsaného zákonem Coulomba-Trescy s koeficienty  $\bar{m} = 0,1$ ,  $\mu = 0,05$  [5]. Obě varianty simulace používají k vytvoření lomu techniku umazávání elementů s aplikovaným normalizovaným Latham-Cocroft lomovým kritériem.



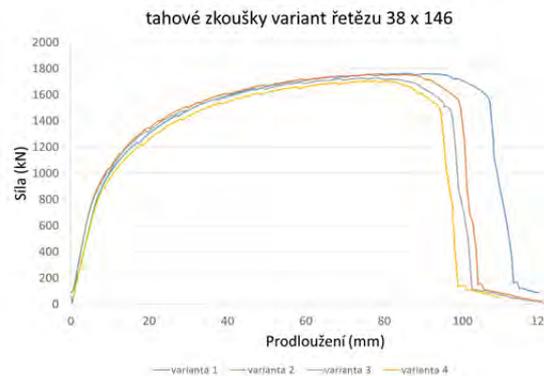
Obr. 4 Rozložení normalizovaného Latham-Cockroft kritéria při lomu - čtyřčlankové provedení (nahore), dvou půlčlankové provedení (dole). Rozsah stupnice je ca 0 až 0,6  
Fig. 4 Normalized Latham-Cockroft Criterion for fracture - four-elements design (above), two half-elements design (below) The scale range is about 0 to 0.6

## 2. Výsledky numerických simulací a tahových zkoušek modelových řetězců

Tahové křivky skutečné tahové zkoušky řetězů provedené Řetězárnou a.s. a tahové křivky určené simulací na obr. 5 a 8 nejsou přímo srovnatelné, protože Řetězárna a.s. prováděla zkoušky na zmenšených modelech 1,9:1 u řetězového vzorku  $38 \times 146$  a 2,1:1 u řetězového vzorku  $42 \times 146$ .

### 2.1 Varianty řetězů $38 \times 146$ mm

Ze čtyř simulovaných zkoušek s rozdílnými rozměry  $a$ ,  $b$  a zaoblením  $R$  článku D se vybral řetěz, který dosáhl nejlepší kombinace parametrů maximální tahové síly a relativního prodloužení po přetržení (obr. 5 a tab. 3). Současně se sledovala rovnováha deformačního účinku na kruhový článek versus D článek podle rozložení teploty (deformační ohřev). Příklad tohoto rozložení je znázorněn na obr. 6, kde je vidět relativní teplotní rovnováha mezi kruhovým článkem a D článkem.

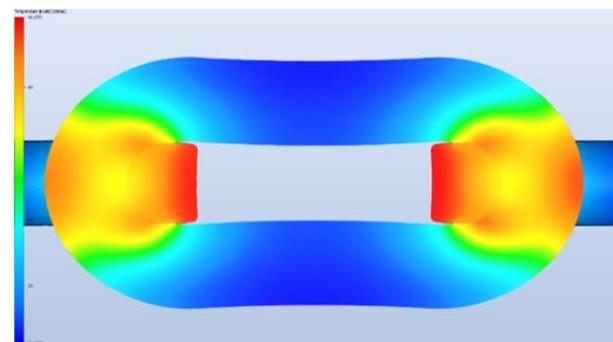


Obr. 5 Výsledné tahové křivky jednotlivých variant řetězů  $38 \times 146$  vypočtené simulací  
Fig. 5 The resulting tensile curves of each chain variant  $38 \times 146$  calculated by simulation

Tab. 3 Porovnání vypočtených maximálních tahových sil a relativních prodloužení 4 variant řetězů  $38 \times 146$ . Nejlepší kombinace označena tučně.

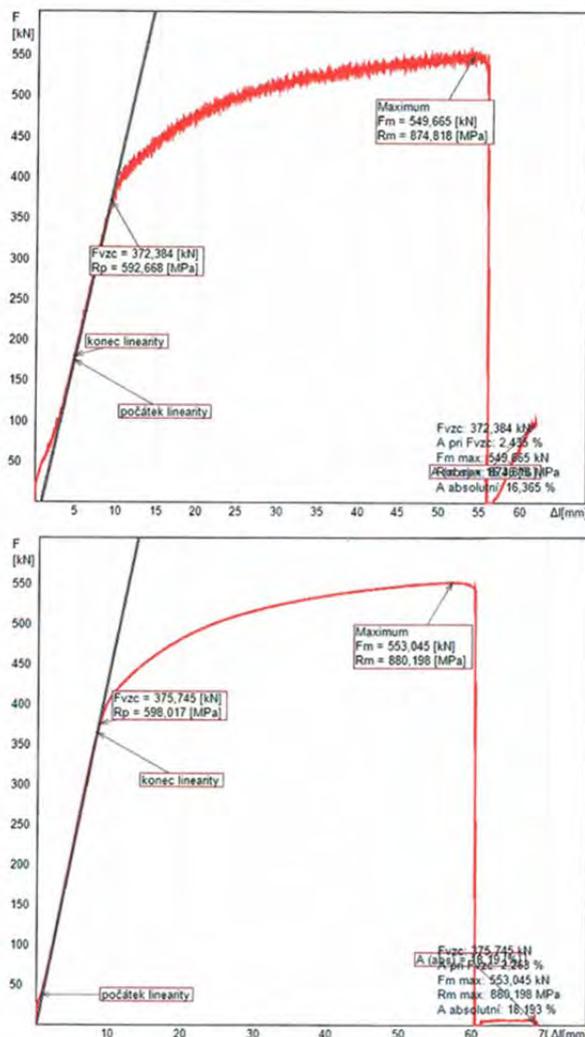
Tab. 3 Comparison of calculated maximum tensile forces and relative elongations of 4 chain variants  $38 \times 146$ . The best combination is marked in bold.

Varianta rozměru řetězů $38 \times 146$	Maximální tahová síla	Poměrné prodloužení při lomu
	(kN)	(%)
1	<b>1762,53</b>	<b>15,24</b>
2	1759,69	14,39
3	1725,59	14,16
4	1704,61	13,56



Obr. 6 Rozložení teplotního pole v příčném řezu pro 1. variantu řetězů  $38 \times 146$ . Rozsah stupnice 20 – 45 °C  
Fig. 6 Cross-sectional temperature field distribution for the 1<sup>st</sup> variant of the  $38 \times 146$  chain. Scale range 20 – 45°C

Skutečné záznamy tahových zkoušek varianty 1 řetězu 38 × 146 odzkoušeného Řetězárnou a.s. jsou znázorněny na obr. 7. Řetěz je zmenšen v poměru 1,9:1. Byli vybráni dva zástupci, označení experimentu 1 a 2.



Obr. 7 Záznam z tahových zkoušek varianty 1 řetězu 38 × 146 z tab. 3 provedené Řetězárnou a.s. Nahoře experiment 1, dole experiment 2 (tab. 5)

Fig. 7 Tensile test record of the chain variant 38 × 146 from tab. 3 made by the chain producer. Experiment 1 above, experiment 2 below (Tab. 5)

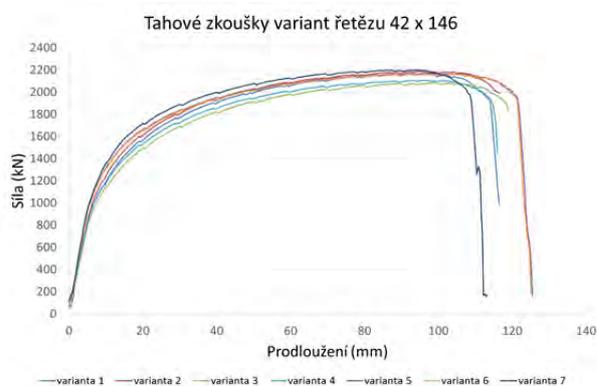
## 2.2 Varianty řetězu 42 × 146 mm

Obdobně jako v předchozím případě se provedlo tentokrát 7 simulací tahových zkoušek. Z nich se opět vybral nejlepší zástupce (tab. 4). Grafy tahových křivek ukazuje obr. 8. Teplotní pole nejlepší varianty nevykazovalo takovou rovnováhu jako v předchozím případě (obr. 9). Oproti rozměrové verzi řetězu 38 × 146 je zde větší deformační asymetrie mezi kruhovým článkem a D článkem řetězu.

Tab. 4 Porovnání vypočtených maximálních tahových sil a relativních prodloužení 7 variant řetězu 42 × 146. Nejlepších hodnot dosáhla varianta 2, která je vyznačena tučně.

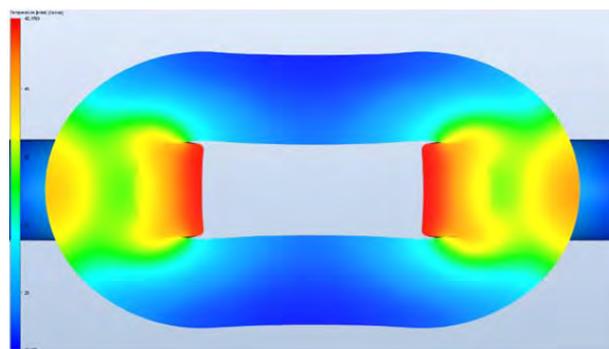
Tab. 4 Comparison of the calculated maximum tensile forces and relative elongations of 7 chain variants 42 × 146. The best value was achieved by option 2, which is highlighted in bold.

Varianta	Maximální tahová síla	Poměrné prodloužení při lomu
	(kN)	(%)
1	2161,19	17,30
<b>2</b>	<b>2185,79</b>	<b>17,67</b>
3	2081,72	18,01
4	2103,86	16,14
5	2170,50	17,92
6	2161,78	17,73
7	2197,36	15,82



Obr. 8 Výsledné tahové křivky jednotlivých variant řetězu 42 × 146 vypočtené simulací

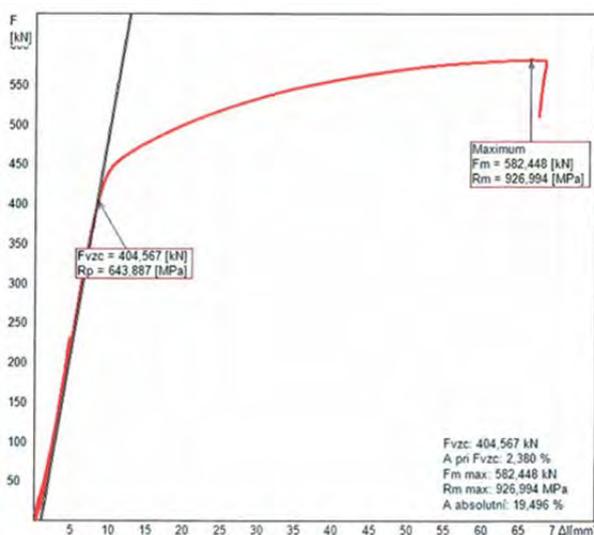
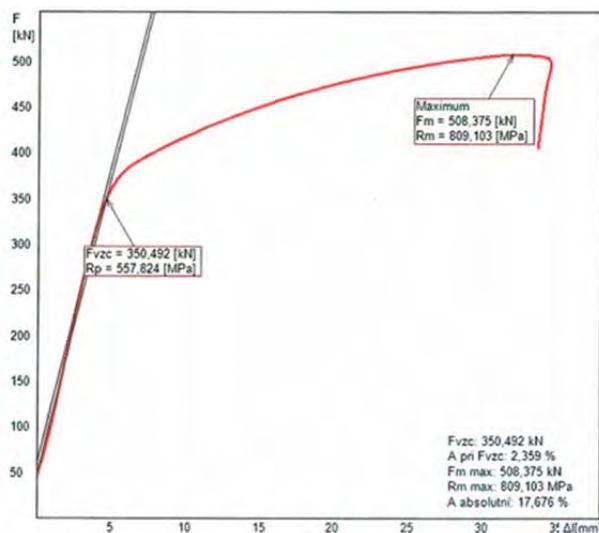
Fig. 8 The resulting tensile curves of the 42 × 146 chain variants calculated by simulation



Obr. 9 Rozložení teplotního pole v příčném řezu pro 1. variantu řetězu 42 × 146. Rozsah stupnice 20 – 45 °C

Fig. 9 Cross-sectional temperature distribution for the 1<sup>st</sup> chain variant 42 × 146. Scale range 20 – 45 °C

Skutečné záznamy tahových zkoušek varianty 2 řetězu 42 × 146 odzkoušeného Řetězárnou jsou znázorněny na obr. 10. Řetěz je zmenšen v poměru 2,1:1. Byli vybráni dva zástupci, označení experimentů 3 a 4.



Obr. 10 Záznam z tahových zkoušek varianty 2 řetězu 442 × 146 z tab. 4 provedené výrobcem; nahoře experiment 3, dole experiment 4 (tab. 6)

Fig. 10 Record of the tensile test of the chain variant 42 × 146 from Tab. 4 made by the producer; above experiment 3, below experiment 4 (Tab. 6)

## Shrnutí výsledků a závěr

Simulace tahové zkoušky provedené v MMV velmi dobře odpovídají skutečným tahovým zkouškám provedeným v řetězárně, jak lze vidět z tab. 5 a 6. Jisté rozdíly mezi experimentem a simulací vznikly z důvodu velkého podílu ruční práce na řetězových vzorcích, kdy jednotlivé články neměly ideální tvar. U jednotlivých vzorků bylo rovněž mírně odlišné tepelné zpracování (především experimenty 1 a 2).

Z pohledu numerické simulace je určitá nepřesnost vnesena také použitím poněkud odlišného materiálu, než je v praxi skutečně používán, a poměrně hrubou KP sítí. Výpočetní čas se pohyboval většinou kolem 2 dnů, ale u některých zkoušek dosáhl i jednodenního trvání pro všech 12 výpočetních jader.

Tab. 5 Porovnání výsledků simulace a experimentálních hodnot skutečné tahové zkoušky řetězu 38 × 146

Tab. 5 Comparison of simulation results and experimental values of the actual 38 × 146 chain tensile test

	Maximální síla	Maximální tahové napětí	Maximální prodloužení
	(kN)	(MPa)	(%)
simulace	1762,5	778	15,24
experiment 1	1982,4*	875	16,30
experiment 2	2016,5*	880	18,20

\* přepočteno k měřítku 1,9:1

Tab. 6 Porovnání výsledků simulace a experimentálních hodnot skutečné tahové zkoušky řetězu 42 × 146

Tab. 6 Comparison of simulation results and experimental values of the actual 42 0078 146 chain tensile test

	Maximální síla	Maximální tahové napětí	Maximální prodloužení
	(kN)	(MPa)	(%)
simulace	2185,8	779	17,67
experiment 3	2241,9*	809	17,68
experiment 4	2 68,6*	927	19,50

\* přepočteno k měřítku 2,1:1

Simulované 4článekové zkoušky oproti zkoušeným 5článekovým mívají cca o 1,5 % nižší poměrné prodloužení při přetržení. Samotné relativní prodloužení u jednoho materiálu a stejného řetězu kolísá v praxi v intervalu cca 1 %.

I přes zmíněné okolnosti byly provedené práce efektivní, protože numerická simulace provedená v MMV ušetřila Řetězárnu a.s. nemalý čas na vývoj, výrobu i zkoušení při jinak obvyklém testování velkého množství reálných zkušebních vzorků. Shrnuté výsledky dávají předpoklad využití této metody i při vývoji jiných rozměrů řetězů.

## Poděkování

Tato práce vznikla v rámci realizace výzkumného projektu dotačního programu Aplikace – OP PIK, č. CZ.01.1.02/0.0/0.0/15\_019/0004942 – „Vývoj důlního kombinovaného článkového řetězu“ spolufinancovaného Evropskou unií a Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky.

## Literatura

- [1] DIN 22255 – Kloubové řetězy pro kontinuální dopravníky v hornictví.
- [2] DIN 51220 – Stroj pro zkoušení materiálu – Všeobecné požadavky na stroje pro zkoušení materiálu a jejich ověřování a kalibraci.
- [3] DIN 17115 – Oceli pro svařované kruhové článkové řetězy - Technické dodací podmínky.
- [4] Forge reference documentation: Part 5: Process data, Chapter I.A.6. Visco-plastic flow law according to the "Hansel-Spittel" model.
- [5] Forge reference documentation: Part 5: Process data, Chapter III. Friction.