

# Výpočet délky vývalku (VDV) ver. 1.0

*Produktový help*



Technologická agentura  
České republiky

*Projekt TE01020197 „Centrum aplikované kybernetiky 3“,  
Program Centra kompetence TA ČR*

Tento software byl vyvinut v rámci pracovního balíčku WP 11 projektu TE01020197 centra kompetence „Centrum aplikované kybernetiky 3“ podpořeného Technologickou agenturou České republiky. Na vývoji softwaru se podílela výzkumná skupina [Laboratoře aplikované kybernetiky](#) na [Fakultě strojní Českého vysokého učení technického v Praze](#) a firma PIKE Automation, s.r.o.

VDV (ver. 1.0) je software, který slouží k přepočtu délky vývalku za tepla na délku za studena. Výsledný matematický model pro přepočet délky vývalku je implementován v rámci jediného programu vytvořeného v jazyce C#. Požadavek na vytvoření matematického modelu pro přepočet délky vývalku za tepla na délku, na kterou se zkrátí ve studeném stavu, tj. při normální teplotě 20°C, vzešel ze spolupráce s firmou PIKE Automation, s.r.o. Software umožňuje stanovit okrajové podmínky pro přepočet délky vývalku za studena takové, jakými jsou relativní chyby měření teploty vývalku, délky vývalku za tepla a koeficientu teplotní roztažnosti. Po stanovení okrajových podmínek a druhu oceli tento software kromě délky vývalku za studena vypočítá odhad maximální relativní chyby výpočtu délky vývalku při teplotě 20 °C. Dále součástí výpočtu délky vývalku je určení koeficientu teplotní roztažnosti podle normy EN 1993-1-2:2005<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> (1) (2)

# Obsah

<b>Obsah .....</b>	<b>2</b>
<b>1 Hlavní okno – Výpočet délky vývalku za studena .....</b>	<b>3</b>
1.1 Panel vstupů .....	4
1.1.1 Druh oceli .....	4
1.1.2 Teplota vývalku .....	4
1.1.3 Délka vývalku za tepla .....	4
1.2 Panel nastavení relativních chyb .....	4
1.2.1 Relativní chyba měření délky vývalku za tepla .....	4
1.2.2 Relativní chyba měření teploty vývalku .....	5
1.2.3 Relativní chyba určení koeficientu teplotní roztažnosti .....	5
1.3 Panel výstupů .....	5
1.3.1 Koeficient teplotní roztažnosti .....	5
1.3.2 Délka vývalku za studena .....	6
1.3.3 Relativní chyba výpočtu délky vývalku za studena .....	6
<b>2 Vedlejší okno – Náповěda .....</b>	<b>7</b>
<b>3 Ukládání a čtení dat .....</b>	<b>9</b>
<b>4 Help .....</b>	<b>10</b>
<b>5 Bibliografie .....</b>	<b>11</b>

# 1 Hlavní okno – Výpočet délky vývalku za studena

Hlavní okno na obr. 1.1 se skládá ze tří panelů, panelu vstupů, panelu nastavení chyb a panelu výstupů. V panelu vstupů se volí druh oceli, zadávají se teplota vývalku a délka vývalku za tepla. V panelu nastavení se specifikují relativní chyby měření teploty vývalku, délky vývalku za tepla a koeficientu teplotní roztažnosti. Nakonec v posledním, třetím panelu jsou vypočteny výstupy softwaru VDV ver. 1.0. Jsou jimi délka vývalku za studena (při teplotě 20 °C), odhad maximální relativní chyby výpočtu délky vývalku při teplotě 20 °C a koeficient teplotní roztažnosti.

Výpočet délky vývalku (VDV)

Zobrazit nápovědu >>

**Vstupy**

Druh oceli:

Teplota vývalku [°C]: 900,0

Délka vývalku za tepla [m]: 0,000

**Nastavení chyb**

$\Delta L/L$  [%]: 0,20

$\Delta T/T$  [%]: 2,00

$\Delta \alpha/\alpha$  [%]: 10,00

**Výstupy**

$\alpha$  [1/°C]: 0

Délka vývalku za studena [m]: 0

Chyba délky za studena [%]: 0

Provést výpočet

Fig. 1.1 Hlavní okno – Výpočet délky vývalku za studena

Samotný výpočet výstupů nastane stisknutím tlačítka „Provést výpočet“. Pokud je stisknuto tlačítko „Zobrazit nápovědu“ rozšíří se hlavní okno o okno vedlejší s nápovědou k programu VDV ver. 1.0.

## **1.1 Panel vstupů**

V panelu vstupů se volí druh oceli, zadávají se teplota vývalku a délka vývalku za tepla. Program umožňuje volit ze tří základních druhů oceli vývalku, kterými jsou nízkouhlíkaté oceli, uhlíkaté oceli a nerezové oceli. Teplota vývalku se specifikuje ve stupních Celsia a délka vývalku za tepla v metrech.

### **1.1.1 Druh oceli**

Celkem tři základní druhy oceli vývalku je možné volit (nízkouhlíkatou, uhlíkatou a nerezovou). Běžné válcované oceli spadají do třídy nízkouhlíkatých ocelí, které jsou nelegované nebo mikrolegované. U ocelí uhlíkatých se předpokládá, že obsah uhlíku je alespoň 0,2 % hmotnostní koncentrace. Nerezové oceli, který se označují také jako speciální oceli, jsou v programu uvažovány austenitického typu.

### **1.1.2 Teplota vývalku**

Teplotu vývalku v programu je možné zadat v rozsahu od 20 do 1200 °C. Protože k dělení vývalku za tepla dochází technologicky za poslední válcovací stolicí a zároveň před vstupem na výstupní chladicí linku („runout table“), lze předpokládat, že teplota vývalku při jeho dělení se může pohybovat mezi 800 až 900 °C.

### **1.1.3 Délka vývalku za tepla**

Délka vývalku za tepla má dostatečný rozsah pro zadání a to mezi 0 až 1000 m.

## **1.2 Panel nastavení relativních chyb**

V panelu nastavení se specifikují relativní chyby měření teploty vývalku, délky vývalku za tepla a koeficientu teplotní roztažnosti. Přitom na výslednou relativní chybu výpočtu délky vývalku za studena má také vliv relativní chyba určení koeficientu teplotní roztažnosti.

### **1.2.1 Relativní chyba měření délky vývalku za tepla**

Relativní chybu měření délky vývalku za tepla je samozřejmě možné nastavit v rozsahu 0-100%. Její hodnotu udávají výrobci měřidel vysokých teplot, tj. pyrometrů.

### 1.2.2 Relativní chyba měření teploty vývalku

Relativní chybu měření teploty vývalku je samozřejmě možné nastavit v rozsahu 0-100%. Její hodnotu udávají výrobci měřidel vysokých teplot, tj. pyrometrů, v závislosti na pracovním bodu. Tento pracovní bod by měl být v rozsahu 800 - 900 °C, viz teplotu vývalku.

### 1.2.3 Relativní chyba určení koeficientu teplotní roztažnosti

Relativní chybu určení koeficientu teplotní roztažnosti je samozřejmě možné nastavit v rozsahu 0-100%. Nejnižší vliv na maximální [relativní chybu výpočtu délky vývalku za studena](#) má relativní chyba určení koeficientu teplotní roztažnosti, jejíž hodnota může být až  $\pm 10\%$ , aniž by došlo k překročení povolené meze maximální relativní chyby výpočtu délky vývalku za studena. Přesto tato, na první pohled, dostatečná rezerva na chybu určení koeficientu teplotní roztažnosti nemusí být u některých [druhů ocelí](#) dostatečná, týká se to především běžných válcovaných (nelegovaných či mikrolegovaných) ocelí. Důvodem pro to je významná závislost [koeficientu teplotní roztažnosti](#) na [teplotě vývalku](#) především v blízkosti kolem Curie teploty a teploty rekrystalizační, v kterých nastávají body nespojitosti. Curie teplota je definována pod 800°C, zatímco rekrystalizační teplota překračuje 900°C. Jelikož k dělení vývalku dochází až po vyválnování vývalku, tak teplota vývalku při dělení je daleko pod rekrystalizační teplotou, tedy nižší než 900°C, ale zároveň bývá nad 800°C, tedy o dost vyšší než Curie teplota. Díky vhodně technologicky zařazenému dělení plechů či pásů na válcovně, lze s mnohem menší relativní chybou než  $\pm 10\%$  určit koeficient teplotní roztažnosti v předpokládaném rozsahu teplot vývalku 800-900°C. U ostatních druhů ocelí, které se válcují, t.j. uhlíková a nerezová ocel, body nespojitosti v závislosti koeficientu teplotní roztažnosti na teplotě ve sledovaném rozsahu teplot (pod 1000°C) nenastávají. Jen je třeba si uvědomit, že koeficient teplotní roztažnosti rovněž velmi závisí na chemickém složení oceli. Proto u nerezových ocelí, které jsou podstatně legované, může koeficient teplotní roztažnosti být větší až o 18% než tento koeficient u běžné válcovací oceli a v porovnání s uhlíkatou ocelí dokonce až o 33%.

## 1.3 Panel výstupů

V panelu výstupů jsou vypočteny výstupy softwaru VDV ver. 1.0. Jsou jimi [délka vývalku za studena](#) (při teplotě 20 °C), odhad maximální [relativní chyby výpočtu délky vývalku při teplotě 20 °C](#) a [koeficient teplotní roztažnosti](#).

### 1.3.1 Koeficient teplotní roztažnosti

Hodnota koeficientu teplotní roztažnosti při teplotě 900°C u nízkouhlíkatých ocelí je  $\alpha_{900} = 1.6 \cdot 10^{-5}$ , zatímco u uhlíkatých ocelí je pouze  $\alpha_{900} = 1.35 \cdot 10^{-5}$ . V případě nerezových austenitických ocelí je koeficient teplotní roztažnosti nejvyšší  $\alpha_{900} = 1.9 \cdot 10^{-5}$ . Údaje o teplotní roztažnosti ocelí mohou být v normách uvedeny nepřesně, jak uvádějí

někteří výrobci (Outokumpu, Damstahl) o evropských normách EN 10095 atd. Proto kontrola fyzikálních hodnot prostřednictvím fyzikálních tabulek se ukazuje být nezbytná<sup>2</sup>.

### 1.3.2 Délka vývalku za studena

Délka vývalku za studena vychází v metrech a musí být menší [délka vývalku za tepla](#). Výsledný matematický model pro přepočet délky vývalku za tepla na délku za studena se specifikací relativní chyby tohoto přepočtu tedy sestává z částí příslušejícím měřené [teplotě vývalku při dělení](#), měřené délce vývalku za tepla a nakonec [koeficientu teplotní roztažnosti](#) pro tři [druhy ocelí](#). Délka vývalku za studena (při teplotě 20°C) se tedy vypočte podle vztahu

$$L_{20} = L[1 + \alpha (T - T_{20})]^{-1} \quad [\text{m}] \quad (1)$$

kde  $L_{20}$  je teplota vývalku při teplotě 20°C,  $T_{20} = 20^\circ\text{C}$  a  $L$  je délka vývalku při teplotě  $T$  (teplota vývalku při jeho dělení).

### 1.3.3 Relativní chyba výpočtu délky vývalku za studena

Největší vliv na maximální relativní chybu výpočtu délky vývalku za studena mají [relativní chyba měření délky vývalku za tepla](#) a [relativní chyba měření teploty vývalku](#). Zatímco nejmenší vliv na maximální relativní chybu výpočtu délky vývalku za studena má [relativní chyba určení koeficientu teplotní roztažnosti](#). Odhad maximální relativní chyby výpočtu délky vývalku za studena lze stanovit podle vztahu

$$\delta L_0 = \delta L + \frac{(T - T_{20})\gamma_n}{1 + \alpha(T - T_{20})} \delta \alpha + \frac{\alpha T}{1 + \alpha(T - T_{20})} \delta T \quad [\%] \quad (2)$$

kde  $\delta T = 100 \frac{\Delta T}{T}$ ,  $\delta L = 100 \frac{\Delta L}{L}$ ,  $\delta L_0 = 100 \frac{\Delta L_0}{L_0}$ ,  $\delta \alpha = 100 \frac{\Delta \alpha}{\alpha}$  a jednotlivé proměnné jsou již popsány pod rovnicí (1).

---

<sup>2</sup> (4) (3)

## 2 Vedlejší okno – Nápověda

Vedlejší okno se rozbalí vedle hlavního okna na obr. 1.1 po stisknutí tlačítka „Zobrazit nápovědu“. Výsledné rozbalené okno je potom na obr. 2.1. Nápověda obsahuje základní položky programu s jejich krátkým popisem. Podrobný popis programu VDV ver. 1.0 lze nalézt v tomto produktovém helpu, který je vyvolán stisknutím tlačítka „Manuál k produktu“ na obr. 2.1. Opětovným stisknutím tlačítka „Zobrazit nápovědu“ na obr. 2.2 se lze vrátit ke krátké nápovědě.

Výpočet délky vývalku (VDV)

Manuál k produktu >>

**Vstupy**

Druh oceli:

Teplota vývalku [°C]:

Délka vývalku za tepla [m]:

**Nastavení chyb**

$\Delta L/L$  [%]:

$\Delta T/T$  [%]:

$\Delta \alpha/\alpha$  [%]:

**Výstupy**

$\alpha$  [1/°C]: 0

Délka vývalku za studena [m]: 0

Chyba délky za studena [%]: 0

Provést výpočet

**Výpočet délky vývalku (VDV) 1.0**

**Vstupy**

**Druh oceli** - zde je možné zvolit druh oceli vývalku, pro který se bude provádět výpočet. Možnosti jsou: "nizkouhlikaté oceli", "uhlíkaté oceli" a "nerezové a speciální oceli". Automaticky není nastavena žádná předvolba.

**Teplota vývalku [°C]** - teplota vývalku při dělení, t.j. před chladnutím, ve stupních Celsia. Předvolbou je nastavena teplota 900° C.

**Délka vývalku za tepla [m]** - délka, kterou má vývalek za tepla v metrech. Předvolbou je nastavena nulová délka.

**Výstupy**

$\alpha$  [1/°C] - určená hodnota délky koeficientu teplotní roztažnosti.

**Délka vývalku za studena [m]** - délka, kterou bude mít vývalek po vychladnutí na 20°C.

**Chyba délky za studena [%]** - relativní chyba délky, kterou bude mít vývalek po vychladnutí na 20°C vyznačená v %

Obr. 2.1 Vedlejší okno – Nápověda

Výpočet délky vývalku (VDV)

Zobrazit nápovědu >>

**Vstupy**

Druh oceli:

Teplota vývalku [°C]:

Délka vývalku za tepla [m]:

**Nastavení chyb**

$\Delta L/L$  [%]:

$\Delta T/T$  [%]:

$\Delta \alpha/\alpha$  [%]:

**Výstupy**

$\alpha$  [1/°C]:


Délka vývalku za studena [m]:

Chyba délky za studena [%]:

Provést výpočet

## Výpočet délky vývalku (VDV) ver. 1.0

*Produktový help*



**Technická a  
Technologická agentura  
České republiky**

*České vysoké učení technické v Praze*  
*Fakulta strojní*  
*Ústav přístrojové a řídicí techniky*

Tento software byl vyvinut v rámci projektu TE01020197 centra kompetence „Centrum aplikované kybernetiky 3“ podpořeného Technologickou agenturou České republiky na [Fakultě strojní Českého vysokého učení technického v Praze](#). Ústavu přístrojové a řídicí techniky

Obr. 2.2 Vedlejší okno – Manuál k produktu



### **3 Ukládání a čtení dat**

## 4 Help

Stiskněte tlačítko „Zobrazit nápovědu“ pro zkrácenou nápovědu k programu VDV ver. 1.0 a pro podrobnější nápovědu k tomuto programu si spusťte produktový help kliknutím na odkaz „Produktový help“ ve zkrácené nápovědě.

## 5 Bibliografie

1. **EN 1993-1-2:2005.** *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.* Praha : Český normalizační institut, 2006.
2. **ASME V&V 20-2009.** *Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer.* New York : ASME, 2009.
3. **Touloukian Y.S., Kirby R. K., Taylor R. E., Desai P. D.** *Thermal Expansion: Metallic Elements and Alloys.* New York : Plenum Press, 1975.
4. **Liu Y.C., Sommer F., Mittemeijer E. J.** Calibration of the differential dilatometric measurement signal upon heating and cooling: thermal expansion of pure iron. *Thermochimica Acta.* 2004, Vol. 413, pp. 215-225.