



NOVÉ TECHNOLOGIE
VÝZKUMNÉ CENTRUM
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

ODBOR TERMOMECHANIKA TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ

AUTORIZOVANÝ SOFTWARE

SLQT 2010

***SOFTWARE PRO NUMERICKÉ VYHODNOCENÍ TEPELNÉ
VODIVOSTI POVLAKŮ A TENKÝCH VRSTEV METODOU
LQT***

Autor: *Ing. Zdeněk Veselý, Ph.D.*

Číslo projektu: *N*

Číslo výsledku: *NTC-SW-08-10*

Odpovědný pracovník: *doc. Ing. Milan Honner, Ph.D.*

Vedoucí odboru: *doc. Ing. Milan Honner, Ph.D.*

Ředitel centra: *doc. Dr. RNDr. Miroslav Holeček*

PLZEŇ, PROSINEC 2010

Jazyk výsledku: CZE

Hlavní obor: JB

Uplatněn: ANO

Název výsledku česky:

SLQT 2010 - Software pro numerické vyhodnocení tepelné vodivosti povlaků a tenkých vrstev metodou LQT

Název výsledku anglicky:

SLQT 2010 - Software for numerical evaluation of thermal conductivity of coatings and thin layers using LQT method

Abstrakt k výsledku česky:

Software SQLT je vyvinut pro numerické vyhodnocení tepelné vodivosti povlaků a tenkých vrstev metodou LQT. SLQT je vybaven grafickým uživatelským prostředím, které umožňuje zadání volitelných parametrů počítačového modelu metody LQT, sestavení simulačního modelu s využitím příkazů výpočetního systému Cosmos/M, výpočet přímé tepelné úlohy, načtení numerických a experimentálních dat včetně jejich následného porovnání.

Abstrakt k výsledku anglicky:

The software SQLT is developed for numerical evaluation of thermal conductivity of coatings and thin layers using LQT method. SLQT is equipped with graphical user interface that enables the input of optional parameters of computer model of LQT method, the compilation of simulation model using commands of computational system Cosmos/M, the computation of direct thermal task, and input of numerical and experimental data including their subsequent comparison.

Klíčová slova česky:

tepelná vodivost; LQT metoda; simulační model

Klíčová slova anglicky:

thermal conductivity; LQT method; simulation model

Vlastník výsledku: *Západočeská univerzita v Plzni*

IČ vlastníka výsledku: *49777513*

Stát: *Česká republika*

Lokalizace: <http://www.zcu.cz/ntc/vysledky/sw/NTC-SW-08-10.html>

Licence: *ANO*

Licenční poplatek: *ANO*

Ekonomické parametry: *Ekonomické přínosy vyplývající ze zkvalitnění a zrychlení vyhodnocování měření tepelné vodivosti vrstev.*

Technické parametry: *Luděk Hynčík, Západočeská univerzita v Plzni, Nové technologie - Výzkumné centrum v západočeském regionu, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, 377634709, hyncik@ntc.zcu.cz*

Autorizovaný software

Software pro numerické vyhodnocení
tepelné vodivosti povlaků a tenkých vrstev
metodou LQT

SLQT 2010

Ing. Zdeněk Veselý, Ph.D.

Anotace

Popisuje se software SQLT, který je vyvinut pro numerické vyhodnocení tepelné vodivosti povlaků a tenkých vrstev metodou LQT. SLQT je vybaven grafickým uživatelským prostředím, které umožňuje zadávání volitelných parametrů počítačového modelu metody LQT, sestavení simulačního modelu s využitím příkazů výpočetního systému Cosmos/M a spuštění výpočtu přímé tepelné úlohy ve výpočetním systému Cosmos/M. Následně software SLQT umožňuje načtení výsledkových numerických dat z počítačového modelu a experimentálních dat z měření za účelem jejich vzájemného porovnání.

Obsah

1. Metoda LQT

- 1.1 Základ metody
- 1.2 Měřicí část
- 1.3 Vyhodnocovací část

2. Vývojová prostředí SLQT

- 2.1 Vývojová prostředí
- 2.2 Programovací prostředí Visual C++ 2010 Express
- 2.3 Výpočetní prostředí Cosmos/M

3. Popis SLQT

- 3.1 Struktura programu
- 3.2 Instalace a spuštění

4. Hlavní funkce SLQT

- 4.1 Spuštění a načtení parametrů ze skriptového souboru
- 4.2 Příprava úlohy – geometrie
- 4.3 Příprava úlohy – výpočetní síť
- 4.4 Příprava úlohy – podmínky jednoznačnosti
- 4.5 Příprava úlohy – materiálové vlastnosti
- 4.6 Příprava úlohy – rozměrová analýza
- 4.7 Řešení úlohy – výpočet
- 4.8 Zpracování výsledků úlohy – příprava dat
- 4.9 Zpracování výsledků úlohy – vyhodnocení
- 4.10 Informace – princip LQT
- 4.11 Ukončení programu

1. Metoda LQT

1.1 Základ metody

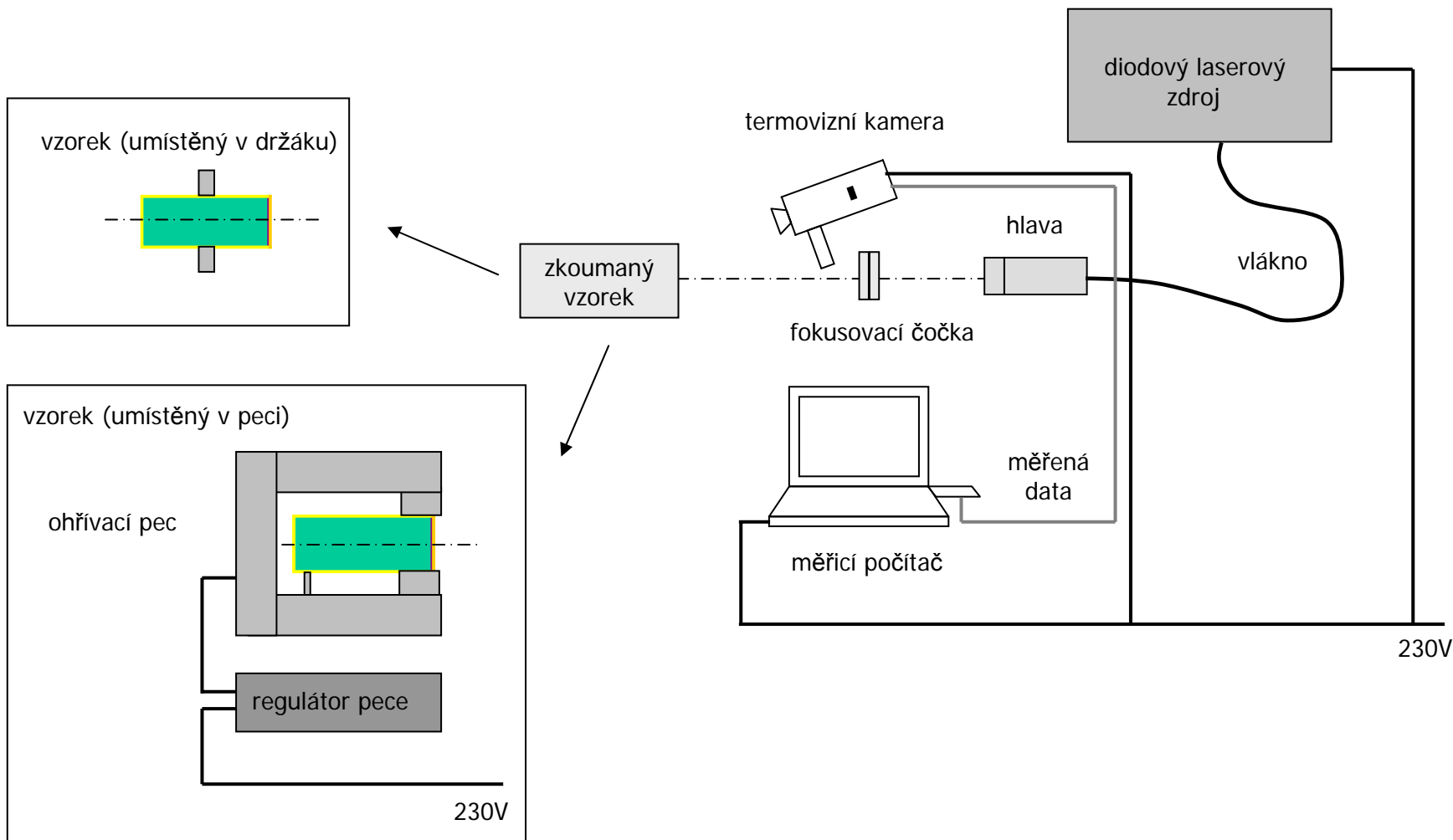
Laserová termografická metoda (LQT) je kvazistatická bezkontaktní metoda umožňující stanovení tepelné vodivosti vrstev. Tepelným zdrojem je záření kontinuálního laseru, které dopadá na vzorek. Rozložení teploty je souběžně měřeno termovizní kamerou.

Ohřev vzorků je proveden se stejnými parametry (výkon laseru, doba působení, průměr svazku, stejné počáteční a okrajové podmínky) nejdříve pro samotný substrát, jehož tepelně fyzikální vlastnosti jsou známy, a následně pro substrát se zkoumanou vrstvou. Oba dva substráty musí být ze stejného materiálu a musí mít stejný tvar a rozměry. S ohledem na požadavek stejných parametrů je na zkoumané povrchy obou vzorků nanášena tenká vrstva referenční barvy, která zajišťuje stejnou pohltivost laserového záření i stejnou (vysokou) emisivitu v oblasti infračerveného záření (zejména v oblasti vlnových délek termovizní kamery).

Z rozdílů mezi naměřenými povrchovými teplotami pro samotný substrát a substrát s vrstvou je vyhodnocována tepelná vodivost měřené vrstvy.

1. Metoda LQT

1.2 Měřicí část

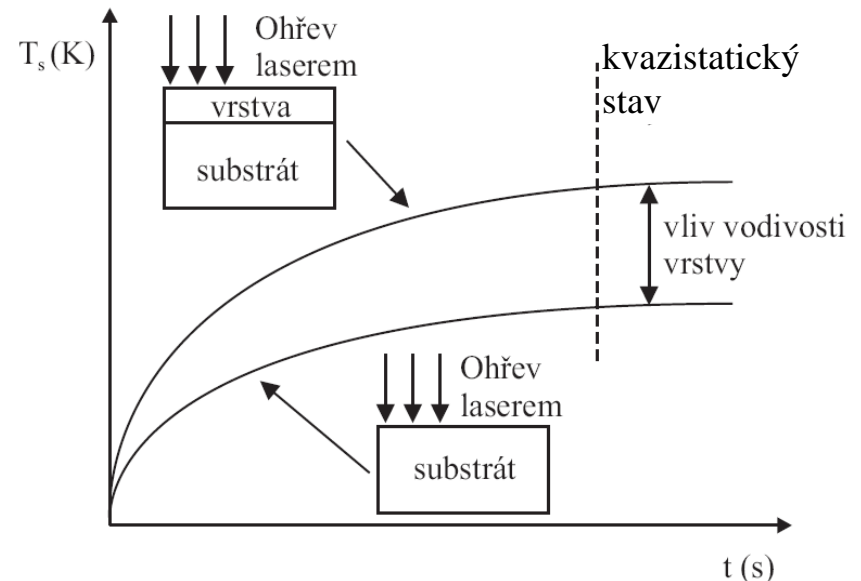


1. Metoda LQT

1.3 Vyhodnocovací část

Působením laserového záření na povrch dochází v místě dopadu záření nejdříve k rychlému nárůstu teploty. Po určitém čase nastává kvazistatický režim, teplota je téměř konstantní nebo se mění velmi pozvolna. Naměřený rozdíl teploty pro samotný substrát a substrát s vrstvou je v oblasti kvazistatického režimu způsoben zejména rozdílnou tepelnou vodivostí vrstvy oproti substrátu.

Prvním krokem ve stanovení tepelné vodivosti vrstvy je nalezení okrajových podmínek procesu. Ty jsou zjištěny řešením nepřímé úlohy pro substrát, jehož tepelně fyzikální vlastnosti jsou známy. Druhým krokem je použití nalezených parametrů pro řešení nepřímé úlohy pro substrát s vrstvou. Hodnota tepelné vodivosti je nastavována tak, aby vypočtené průběhy teploty v definovaných místech na povrchu vzorku byly v oblasti kvazistatického režimu shodné s naměřenými průběhy. Nepřímá úloha nalezení tepelné vodivosti je tak řešena postupným sledem úloh přímých.



2. Vývojová prostředí SLQT

2.1 Vývojová prostředí

- **Grafické uživatelské rozhraní (GUI) je vytvořeno v prostředí Visual C++ 2010 Express**

Visual C++ 2010 Express je integrované prostředí pro tvorbu aplikací pro MS Windows. Je založeno na objektově orientovaném programování v jazyce C++. Pro tvorbu aplikací a grafického uživatelského prostředí je možné použití knihoven, např. wxWidgets.

- **Výpočetní část programu je vytvořena ve výpočetním systému Cosmos/M**

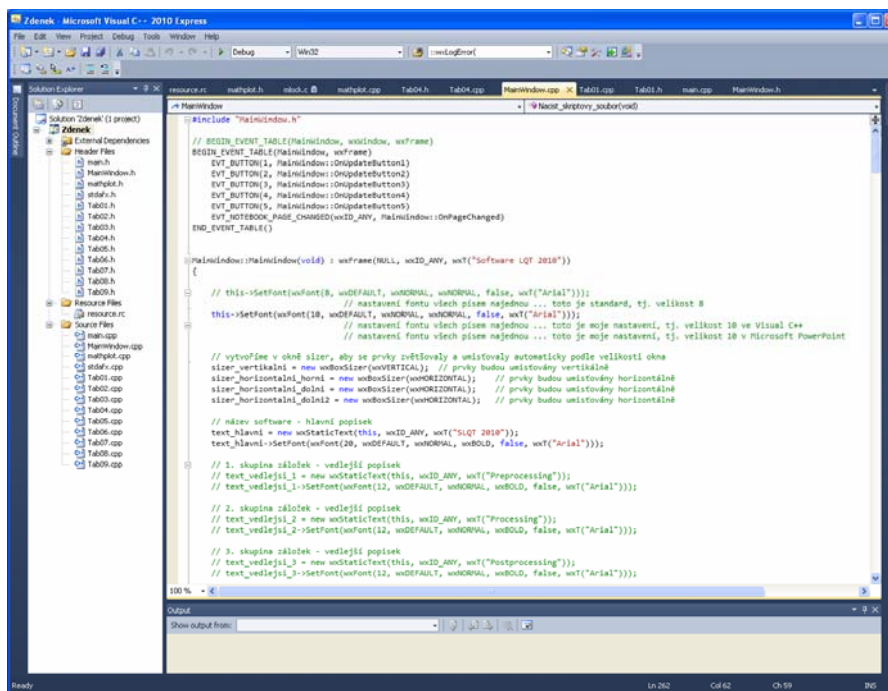
Cosmos/M je numerický systém a programovací prostředí pro analýzy metodou konečných prvků. Systém je původní produkt firmy SRAC (Structural Research & Analysis Corporation), která je v současné době jednou z divizí společnosti Dassault Systemes S.A. (SolidWorks).

2. Vývojová prostředí SLQT

2.2 Programovací prostředí Visual C++ 2010 Express

Hlavní charakteristiky programovacího systému Visual C++ 2010 Express:

- "High-level" programovací jazyk pro obecné programování
- Použití a tvorba komponent, možnost importu komponent třetích stran
- Kompilace do jednoduchého spustitelného programu (exe)
- Předností je pokročilý debugger pro ladění vytvářených aplikací



```

#include "MainWindow.h"

// BEGIN EVENT TABLE(MainWindow, wxWindow, wxFrame)
REQD_EVENT_TABLE(MainWindow, wxFrame)
EVT_BUTTON(1, MainWindow::OnUpdateButtons)
EVT_BUTTON(2, MainWindow::OnUpdateButtons)
EVT_BUTTON(3, MainWindow::OnUpdateButtons)
EVT_BUTTON(4, MainWindow::OnUpdateButtons)
EVT_BUTTON(5, MainWindow::OnUpdateButtons)
EVT_SIZE(MainWindow::OnSize)
EVT_PAGECHANGED(MainWindow::OnPageChanged)
END_EVENT_TABLE()

MainWindow::MainWindow(void) : wxFrame(NULL, wxID_ANY, wxT("Software LQT 2010"))
{
    // this->SetFont(wxFont(8, wxDEFAULT, wxNORMAL, wxNORMAL, false, wxT("Arial")));
    // nastavení fontu všech písem najednou ... toto je standard, tj. velikost 8
    this->SetFont(wxFont(18, wxDEFAULT, wxNORMAL, wxNORMAL, false, wxT("Arial")));
    // nastavení fontu všech písem najednou ... toto je moje nastavení, tj. velikost 18 ve Visual C++
    // nastavení fontu všech písem najednou ... toto je moje nastavení, tj. velikost 18 v Microsoft PowerPoint

    // vytvořím v okněSizer, aby se prvky zvětšovaly a umísťovaly automaticky podle velikosti okna
    sizer_vertikalni = new wxBoxSizer(wxVERTICAL); // prvky budou umísťovány vertikálně
    sizer_horizontální_horní = new wxBoxSizer(wxHORIZONTAL); // prvky budou umísťovány horizontálně
    sizer_horizontální_dolní1 = new wxBoxSizer(wxHORIZONTAL); // prvky budou umísťovány horizontálně
    sizer_horizontální_dolní2 = new wxBoxSizer(wxHORIZONTAL); // prvky budou umísťovány horizontálně

    // název software - hlavní popisek
    text_hlavni = new wxStaticText(this, wxID_ANY, wxT("SLQT 2010"));
    text_hlavni->SetFont(wxFont(28, wxDEFAULT, wxNORMAL, wxBOLD, false, wxT("Arial")));

    // 1. skupina záloek - vedlejší popisek
    text_vedlejsi_1 = new wxStaticText(this, wxID_ANY, wxT("Preprocessing"));
    text_vedlejsi_1->SetFont(wxFont(12, wxDEFAULT, wxNORMAL, wxBOLD, false, wxT("Arial")));

    // 2. skupina záloek - vedlejší popisek
    text_vedlejsi_2 = new wxStaticText(this, wxID_ANY, wxT("Processing"));
    text_vedlejsi_2->SetFont(wxFont(12, wxDEFAULT, wxNORMAL, wxBOLD, false, wxT("Arial")));

    // 3. skupina záloek - vedlejší popisek
    text_vedlejsi_3 = new wxStaticText(this, wxID_ANY, wxT("Postprocessing"));
    text_vedlejsi_3->SetFont(wxFont(12, wxDEFAULT, wxNORMAL, wxBOLD, false, wxT("Arial")));
}

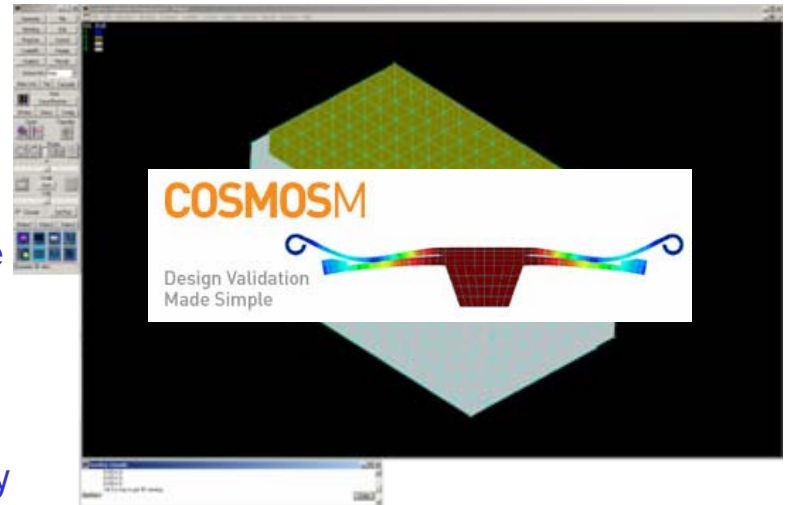
```

2. Vývojová prostředí SLQT

2.3 Výpočetní prostředí Cosmos/M

Cosmos/M je modulární výpočetní systém s grafickým uživatelským rozhraním (GUI) jehož hlavní součásti a charakteristiky jsou:

- **Preprocesor** – je integrován v GUI Geostar. Umožňuje kompletní přípravu úlohy (geometrie, vlastnosti, MKP síť apod.). Lze využít interaktivního grafického prostředí, menu, ikonového menu nebo příkazové řádky.
- **Procesor** – samostatné moduly pro provedení vlastní analýzy (řešiče). Spouští se z Geostaru, počet a možnosti modulů jsou dány typem licence.
 - Strukturní analýzu (lineární i nelineární)
 - Tepelnou analýzu (včetně sdružených tepelně-mechanických úloh)
 - Další analýzy (dynamická, únavová, elektromagnetická, ...)
- **Postprocesor** – je integrován v GUI Geostar. Umožňuje načtení výsledků analýzy a její numerické nebo grafické zobrazení.
- **Nástroje pro export a import** - načtení geometrie, uložení výsledků apod.
- **Využití skriptů** – možnost provedení kompletní analýzy pomocí programového kódu (včetně zadání geometrie, tvorby sítě až po export výsledků). V kódu lze využívat proměnné parametry, cykly, podmínky apod. Možnost využití skriptů je významnou vlastností systému Cosmos/M.



3. Popis SLQT

3.1 Struktura programu 1/2

Program SLQT je funkčně rozdělen na dvě části – **výpočetní část** a **uživatelské rozhraní**.

Výpočetní část zahrnuje vytvořený popis simulačního modelu procesu ohřevu vzorku při LQT metodě formou skriptu v textovém souboru. Tento popis využívá příkazy systému Cosmos/M. Celý skript (skriptový soubor) lze spustit v systému Cosmos/M a podle příkazů v něm zapsaných se automaticky provede tvorba geometrie modelu, výpočetní sítě, přiřazení počátečních a okrajových podmínek, nastavení parametrů výpočtu, provedení výpočtu a uložení příslušných výsledkových dat. K běhu výpočetní části programu SLQT je potřeba mít na počítači nainstalovaný výpočetní software Cosmos/M.

Popis struktury skriptového souboru a funkcí jednotlivých jeho částí není pro uživatele potřebný, z tohoto důvodu zde není uváděn. Simulační model LQT metody je vytvořen se snahou o maximální parametrizovatelnost. Pro uživatele potřebné parametry simulačního modelu (tzv. vybrané parametry) jsou modifikovatelné právě z uživatelského rozhraní, kde je též nastíněna jejich funkce.

3. Popis SLQT

3.1 Struktura programu 2/2

Uživatelské rozhraní pracuje se skriptovým souborem. Pomocí uživatelského rozhraní je možné snadným způsobem zadávat a modifikovat vybrané parametry simulačního modelu. Z uživatelského rozhraní je možné též spustit výpočetní systém Cosmos/M a spustit v něm provádění skriptového souboru. Pro vyhodnocení disponuje program SLQT možností načíst experimentální data z ohřevu vzorku a provést jejich úpravu, dále načíst výsledková data ze simulačního modelu. Dle porovnání experimentálních dat a vybraných modelových dat je následně možné upravit parametry simulačního modelu a provést nový výpočet. Cyklickým postupem je tak možné řešit nepřímou úlohu nalezení tepelné vodivosti měřené vrstvy postupným řešením úloh přímých.

3. Popis SLQT

3.2 Instalace a spuštění

Software SLQT je přeložen do formy spustitelného souboru (exe) pro platformu Windows.

Program se spouští standardním způsobem přímo, není potřeba instalovat.

Má svůj inicializační soubor, ve kterém je uveden název skriptového souboru, se kterým bude SLQT pracovat.

Pro vlastní běh programu není potřeba instalovat žádné dodatečné ovladače nebo knihovny, podmínkou běhu programu je instalace výpočetního systému Cosmos/M.

Software SLQT je šířen v adresáři, který obsahuje soubory:

slqt_2010.exe; slqt_2010.ini; soubory s obrázky, které se využívají v SLQT; soubory s knihovnamí, které potřebuje k běhu SLQT (neinstalují se); vlastní skriptový soubor s popisem simulačního modelu LQT metody.

Samozřejmou podmínkou je mít v souboru připravená experimentální data z LQT metody.

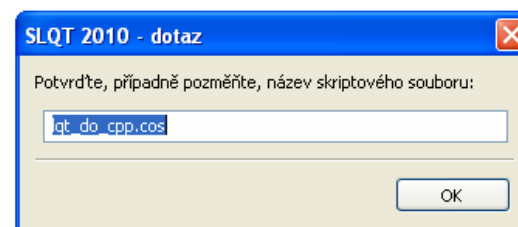
4. Hlavní funkce SLQT

4.1 Spuštění a načtení parametrů ze skriptového souboru

Po spuštění software SLQT dotazuje uživatele, zda se má použít přednastavený název skriptového souboru (uložený v slqt_2010.ini), nebo zda chce zadat název jiného skriptového souboru. Pokud uživatel změní název skriptového souboru, je nový název uložen do inicializačního souboru slqt_2010.ini a je v příštím běhu programu rovnou nabídnut.

Po výběru (odsouhlasení přednastaveného) skriptového souboru, je tento skriptový soubor zpracován a jsou načteny aktuální hodnoty vybraných (volitelných) parametrů simulačního modelu LQT metody. Tyto aktuální hodnoty jsou zobrazeny v jednotlivých záložkách programu, kde je možné je modifikovat.

Pro lepší orientaci jsou jednotlivé záložky programu SLQT seskupeny do tří oblastí: Preprocessing, Processing, Postprocessing a Informace.

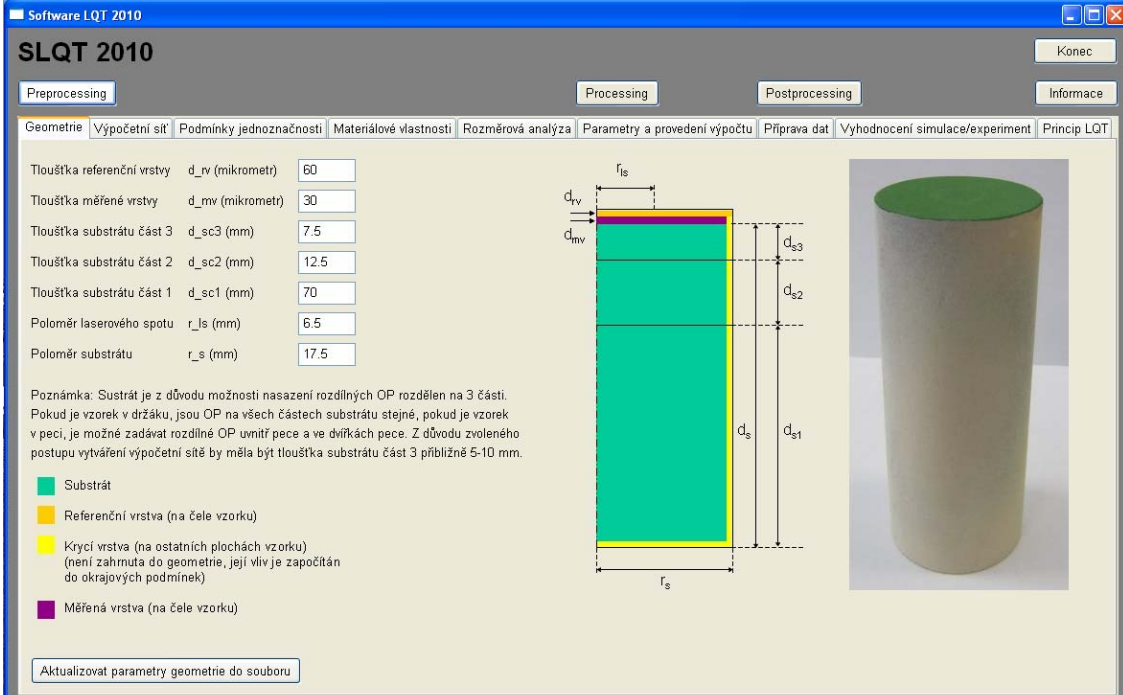


4. Hlavní funkce SLQT

4.2 Příprava úlohy - geometrie

Skupina záložek Preprocessing – záložka Geometrie.

Zde je možné zadávat
volitelné parametry pro
geometrii modelu.
Model je tvořen
osově symetrický.



Software LQT 2010

SLQT 2010

Preprocessing Processing Postprocessing

Geometrie Výpočetní síť Podmínky jednoznačnosti Materiálové vlastnosti Rozměrová analýza Parametry a provedení výpočtu Příprava dat Vyhodnocení simulace/experiment Princip LQT

Tloušťka referenční vrstvy	d_rv (mikrometr)	60
Tloušťka měřené vrstvy	d_mv (mikrometr)	30
Tloušťka substrátu část 3	d_sc3 (mm)	7.5
Tloušťka substrátu část 2	d_sc2 (mm)	12.5
Tloušťka substrátu část 1	d_sc1 (mm)	70
Poloměr laserového spotu	r_ls (mm)	6.5
Poloměr substrátu	r_s (mm)	17.5

Poznámka: Sustrát je z důvodu možnosti nasazení rozdílných OP rozdělen na 3 části. Pokud je vzorek v držáku, jsou OP na všech částech substrátu stejné, pokud je vzorek v peci, je možné zadávat rozdílné OP uvnitř pece a ve dvířkách pece. Z důvodu zvoleného postupu vytváření výpočetní sítě by měla být tloušťka substrátu část 3 přibližně 5-10 mm.

- Substrát
- Referenční vrstva (na čele vzorku)
- Krycí vrstva (na ostatních plochách vzorku) (není zahrnuta do geometrie, její vliv je započítán do okrajových podmínek)
- Měřená vrstva (na čele vzorku)

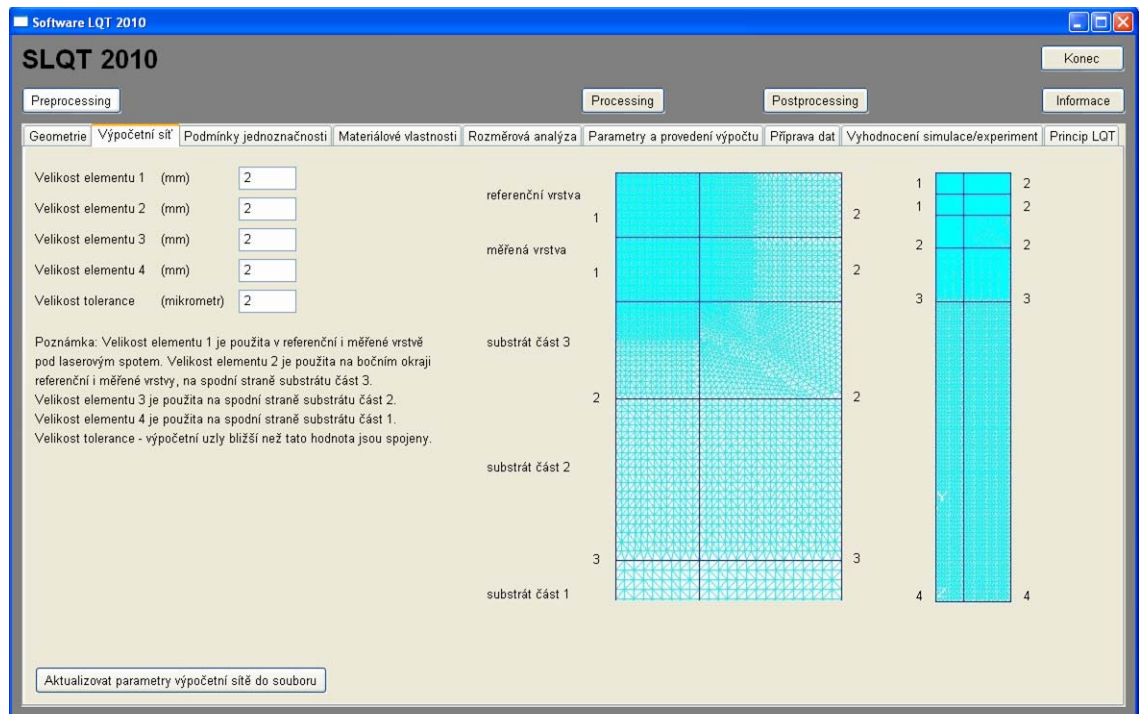
Aktualizovat parametry geometrie do souboru

4. Hlavní funkce SLQT

4.3 Příprava úlohy – výpočetní síť

Skupina záložek Preprocessing – záložka Výpočetní síť.

Zde se zadávají volitelné parametry pro tvorbu výpočetní sítě.

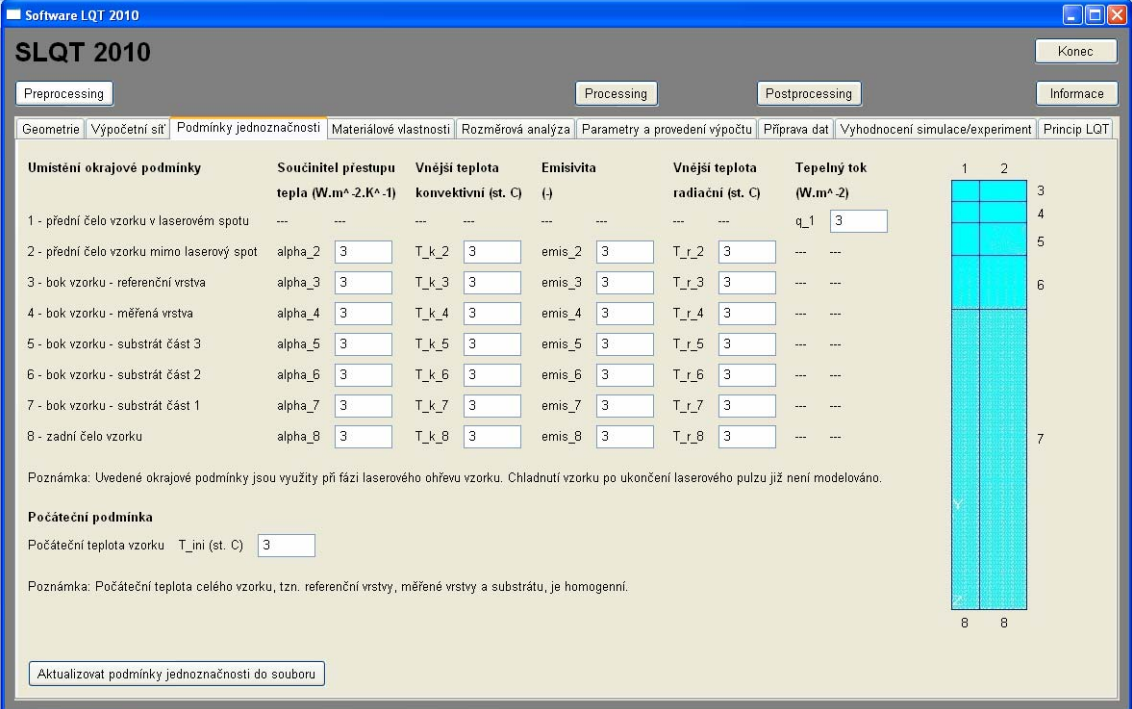


4. Hlavní funkce SLQT

4.4 Příprava úlohy – podmínky jednoznačnosti

Skupina záložek Preprocessing – záložka Podmínky jednoznačnosti.

Zde se zadává zatěžující tepelný tok v místě laserového spotu a okrajové podmínky pro chladnutí na ostatním povrchu vzorku. Dále se specifikuje počáteční teplota vzorku.



Software LQT 2010

SLQT 2010

Preprocessing Processing Postprocessing Informace

Geometrie Výpočetní síť Podmínky jednoznačnosti Materiálové vlastnosti Rozměrová analýza Parametry a provedení výpočtu Příprava dat Vyhodnocení simulace/experiment Princip LQT

Umístění okrajové podmínky	Součinitel přestupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	Vnější teplota konvektivní (st. C)	Emisivita (-)	Vnější teplota radiční (st. C)	Tepelný tok ($W \cdot m^{-2}$)
1 - přední čelo vzorku v laserovém spotu	---	---	---	---	q_1 3
2 - přední čelo vzorku mimo laserový spot	alpha_2 3	T_k_2 3	emis_2 3	T_r_2 3	---
3 - bok vzorku - referenční vrstva	alpha_3 3	T_k_3 3	emis_3 3	T_r_3 3	---
4 - bok vzorku - měřená vrstva	alpha_4 3	T_k_4 3	emis_4 3	T_r_4 3	---
5 - bok vzorku - substrát část 3	alpha_5 3	T_k_5 3	emis_5 3	T_r_5 3	---
6 - bok vzorku - substrát část 2	alpha_6 3	T_k_6 3	emis_6 3	T_r_6 3	---
7 - bok vzorku - substrát část 1	alpha_7 3	T_k_7 3	emis_7 3	T_r_7 3	---
8 - zadní čelo vzorku	alpha_8 3	T_k_8 3	emis_8 3	T_r_8 3	---

Poznámka: Uvedené okrajové podmínky jsou využity při fázi laserového ohřevu vzorku. Chladnutí vzorku po ukončení laserového pulzu již není modelováno.

Počáteční podmínka

Počáteční teplota vzorku T_ini (st. C) 3

Poznámka: Počáteční teplota celého vzorku, tzn. referenční vrstvy, měřené vrstvy a substrátu, je homogenní.

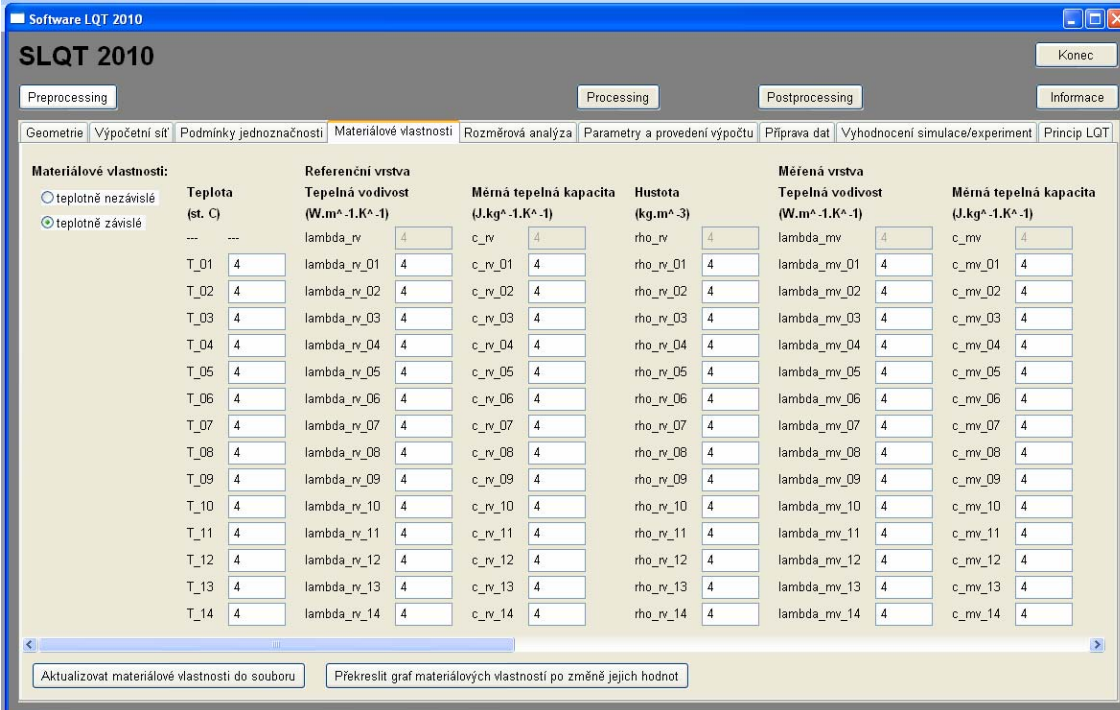
Aktualizovat podmínky jednoznačnosti do souboru

4. Hlavní funkce SLQT

4.5 Příprava úlohy – materiálové vlastnosti 1/3

Skupina záložek Preprocessing – záložka Materiálové vlastnosti.

Zde je možné zadat
teplotně nezávislé nebo
teplotně závislé materiálové
vlastnosti referenční vrstvy,
měřené vrstvy a ...



Software LQT 2010

SLQT 2010

Preprocessing Processing Postprocessing

Geometrie Výpočetní síť Podmínky jednoznačnosti **Materiálové vlastnosti** Rozměrová analýza Parametry a provedení výpočtu Příprava dat Vyhodnocení simulace/experiment Princip LQT

Materiálové vlastnosti:

teplotně nezávislé
 teplotně závislé

Teplota (st. C)	Referenční vrstva Teplotná vodivost (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Měrná tepelná kapacita (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Hustota (kg.m ⁻³)	Měřená vrstva Teplotná vodivost (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Měrná tepelná kapacita (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
---	lambda_rv	c_rv	rho_rv	lambda_mv	c_mv
T_01	lambda_rv_01	c_rv_01	rho_rv_01	lambda_mv_01	c_mv_01
T_02	lambda_rv_02	c_rv_02	rho_rv_02	lambda_mv_02	c_mv_02
T_03	lambda_rv_03	c_rv_03	rho_rv_03	lambda_mv_03	c_mv_03
T_04	lambda_rv_04	c_rv_04	rho_rv_04	lambda_mv_04	c_mv_04
T_05	lambda_rv_05	c_rv_05	rho_rv_05	lambda_mv_05	c_mv_05
T_06	lambda_rv_06	c_rv_06	rho_rv_06	lambda_mv_06	c_mv_06
T_07	lambda_rv_07	c_rv_07	rho_rv_07	lambda_mv_07	c_mv_07
T_08	lambda_rv_08	c_rv_08	rho_rv_08	lambda_mv_08	c_mv_08
T_09	lambda_rv_09	c_rv_09	rho_rv_09	lambda_mv_09	c_mv_09
T_10	lambda_rv_10	c_rv_10	rho_rv_10	lambda_mv_10	c_mv_10
T_11	lambda_rv_11	c_rv_11	rho_rv_11	lambda_mv_11	c_mv_11
T_12	lambda_rv_12	c_rv_12	rho_rv_12	lambda_mv_12	c_mv_12
T_13	lambda_rv_13	c_rv_13	rho_rv_13	lambda_mv_13	c_mv_13
T_14	lambda_rv_14	c_rv_14	rho_rv_14	lambda_mv_14	c_mv_14

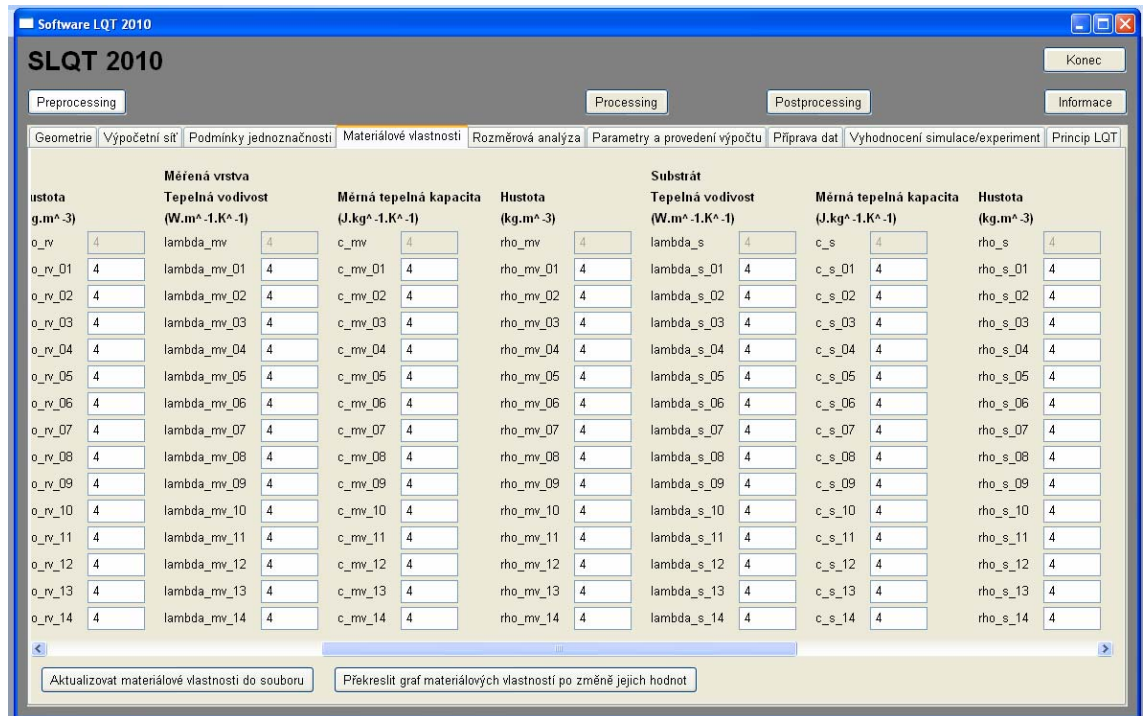
Aktualizovat materiálové vlastnosti do souboru Překreslit graf materiálových vlastností po změně jejich hodnot

4. Hlavní funkce SLQT

4.5 Příprava úlohy – materiálové vlastnosti 2/3

Skupina záložek Preprocessing – záložka Materiálové vlastnosti.

... substrátu.

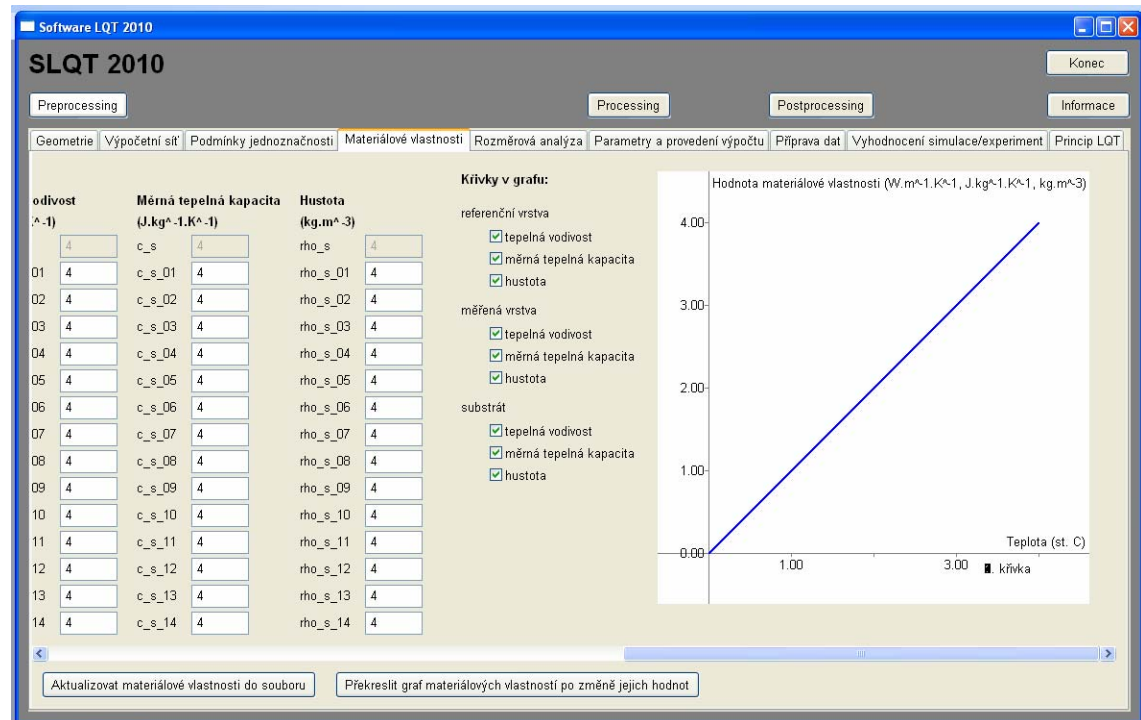


4. Hlavní funkce SLQT

4.5 Příprava úlohy – materiálové vlastnosti 3/3

Skupina záložek Preprocessing – záložka Materiálové vlastnosti.

Zadané materiálové vlastnosti si lze zobrazit v grafu.

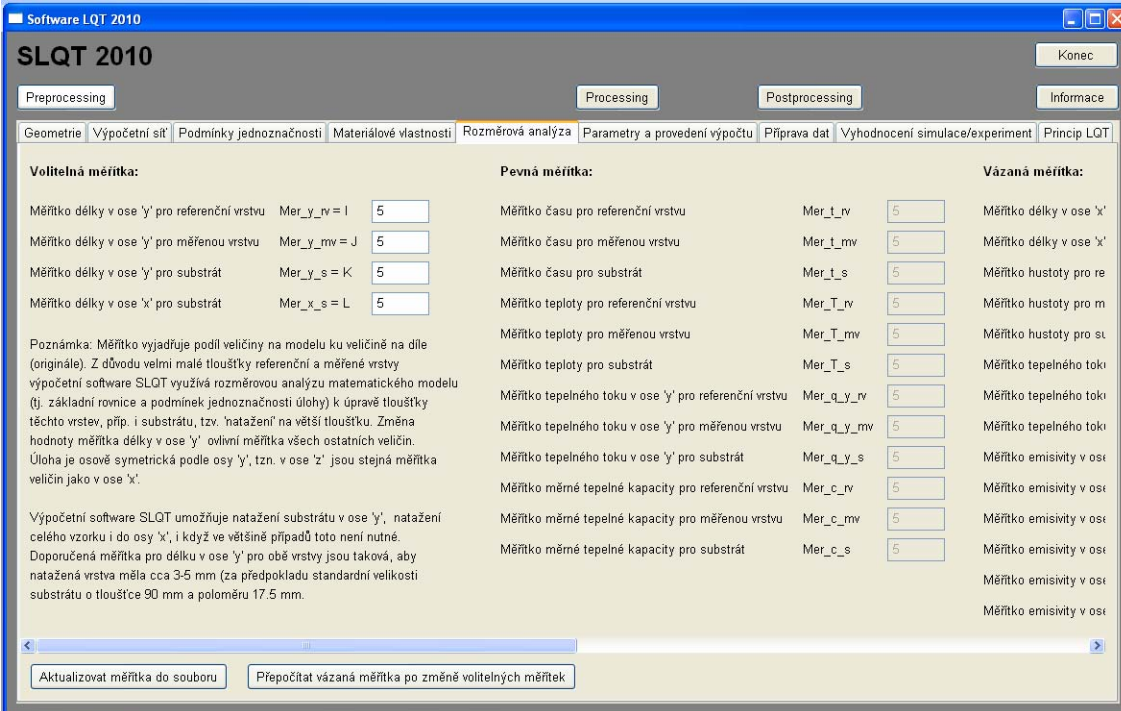


4. Hlavní funkce SLQT

4.6 Příprava úlohy – rozměrová analýza 1/2

Skupina záložek Preprocessing – záložka Rozměrová analýza.

Z důvodu možnosti využití velmi malé tloušťky referenční a měřené vrstvy je využita rozměrová analýza matematického modelu řešené úlohy k úpravě tloušťky těchto vrstev, případně i substrátu, tzv. „natažením“ na větší tloušťku. Změna hodnoty měřítka délky ovlivní měřítka všech ostatních veličin.



Software LQT 2010

SLQT 2010

Preprocessing Processing Postprocessing

Geometrie Výpočetní síť Podmínky jednoznačnosti Materiálové vlastnosti **Rozměrová analýza** Parametry a provedení výpočtu Příprava dat Vyhodnocení simulace/experiment Princip LQT

Volitelná měřítka:

Měřítka délky v ose 'y' pro referenční vrstvu	Mer_y_rv = I	5
Měřítka délky v ose 'y' pro měřenou vrstvu	Mer_y_mv = J	5
Měřítka délky v ose 'y' pro substrát	Mer_y_s = K	5
Měřítka délky v ose 'x' pro substrát	Mer_x_s = L	5

Pevná měřítka:

Měřítka času pro referenční vrstvu	Mer_t_rv	5
Měřítka času pro měřenou vrstvu	Mer_t_mv	5
Měřítka času pro substrát	Mer_t_s	5
Měřítka teploty pro referenční vrstvu	Mer_T_rv	5
Měřítka teploty pro měřenou vrstvu	Mer_T_mv	5
Měřítka teploty pro substrát	Mer_T_s	5
Měřítka tepelného toku v ose 'y' pro referenční vrstvu	Mer_q_y_rv	5
Měřítka tepelného toku v ose 'y' pro měřenou vrstvu	Mer_q_y_mv	5
Měřítka tepelného toku v ose 'y' pro substrát	Mer_q_y_s	5
Měřítka měrné tepelné kapacity pro referenční vrstvu	Mer_c_rv	5
Měřítka měrné tepelné kapacity pro měřenou vrstvu	Mer_c_mv	5
Měřítka měrné tepelné kapacity pro substrát	Mer_c_s	5

Vázaná měřítka:

Měřítka délky v ose 'x'	
Měřítka délky v ose 'x'	
Měřítka hustoty pro re	
Měřítka hustoty pro m	
Měřítka hustoty pro s	
Měřítka tepelného toku	
Měřítka tepelného toku	
Měřítka tepelného toku	
Měřítka emisivity v ose	
Měřítka emisivity v ose	
Měřítka emisivity v ose	
Měřítka emisivity v ose	
Měřítka emisivity v ose	

Poznámka: Měřítka vyjadřují podíl veličiny na modelu ku veličině na díle (originále). Z důvodu velmi malé tloušťky referenční a měřené vrstvy výpočetní software SLQT využívá rozměrovou analýzu matematického modelu (tj. základní rovnice a podmínky jednoznačnosti úlohy) k úpravě tloušťky těchto vrstev, příp. i substrátu, tzv. 'natažením' na větší tloušťku. Změna hodnoty měřítka délky v ose 'y' ovlivní měřítka všech ostatních veličin. Úloha je osově symetrická podle osy 'y', tzn. v ose 'z' jsou stejná měřítka veličin jako v ose 'x'.

Výpočetní software SLQT umožňuje natažení substrátu v ose 'y', natažení celého vzorku i do osy 'x', i když ve většině případů toto není nutné. Doporučená měřítka pro délku v ose 'y' pro obě vrstvy jsou taková, aby natažená vrstva měla cca 3-5 mm (za předpokladu standardní velikosti substrátu o tloušťce 90 mm a poloměru 17,5 mm).

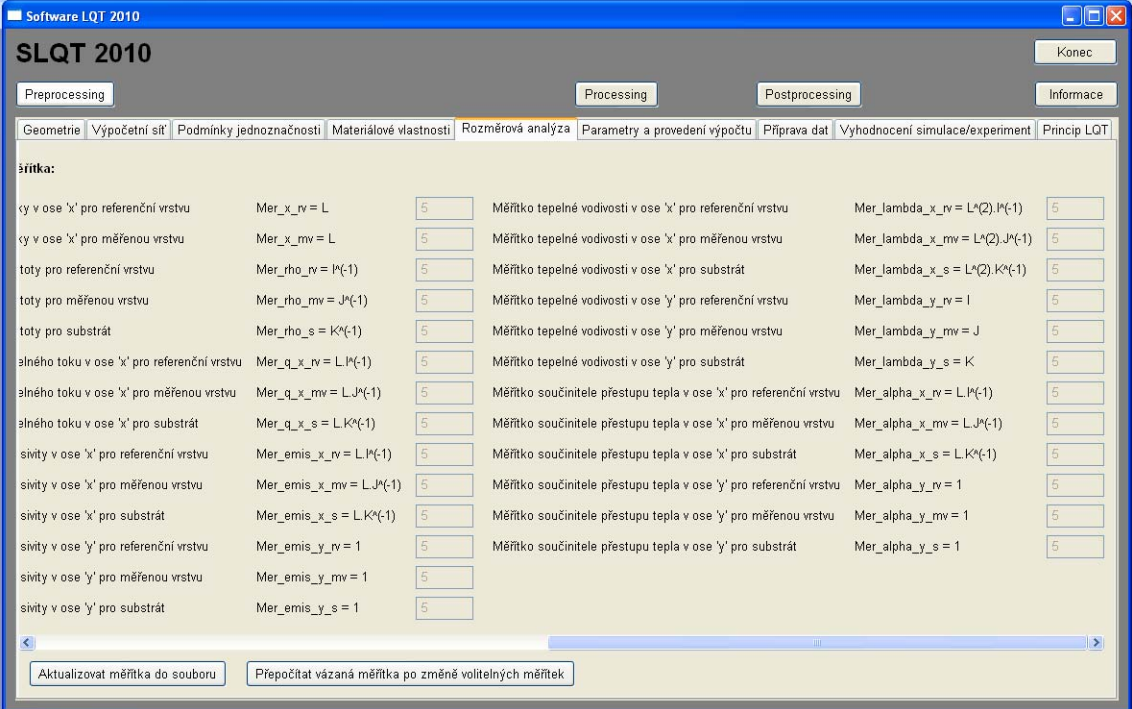
Aktualizovat měřítka do souboru Přepočítat vázaná měřítka po změně volitelných měřítka

4. Hlavní funkce SLQT

4.6 Příprava úlohy – rozměrová analýza 2/2

Skupina záložek Preprocessing – záložka Rozměrová analýza.

Měřítka veličin v úloze jsou rozdělena do tří skupin: volitelná (zadávaná), pevná (nelze měnit) a vázaná (jejich hodnota se mění na základě hodnot volitelných měřítek).



Software LQT 2010

SLQT 2010

Preprocessing Processing Postprocessing Informace

Geometrie Výpočetní síť Podmínky jednoznačnosti Materiálové vlastnosti Rozměrová analýza Parametry a provedení výpočtu Příprava dat Vyhodnocení simulace/experiment Princip LQT

šřítka:

y v ose 'x' pro referenční vrstvu	Mer_x_nv = L	5	Měřítka tepelné vodivosti v ose 'x' pro referenční vrstvu	Mer_lambda_x_nv = L ² .I ⁽⁻¹⁾	5
y v ose 'x' pro měřenou vrstvu	Mer_x_mv = L	5	Měřítka tepelné vodivosti v ose 'x' pro měřenou vrstvu	Mer_lambda_x_mv = L ² .J ⁽⁻¹⁾	5
toty pro referenční vrstvu	Mer_rho_nv = I ⁽⁻¹⁾	5	Měřítka tepelné vodivosti v ose 'y' pro substrát	Mer_lambda_x_s = L ² .K ⁽⁻¹⁾	5
toty pro měřenou vrstvu	Mer_rho_mv = J ⁽⁻¹⁾	5	Měřítka tepelné vodivosti v ose 'y' pro referenční vrstvu	Mer_lambda_y_nv = I	5
toty pro substrát	Mer_rho_s = K ⁽⁻¹⁾	5	Měřítka tepelné vodivosti v ose 'y' pro měřenou vrstvu	Mer_lambda_y_mv = J	5
slného toku v ose 'x' pro referenční vrstvu	Mer_q_x_nv = L.I ⁽⁻¹⁾	5	Měřítka tepelné vodivosti v ose 'y' pro substrát	Mer_lambda_y_s = K	5
slného toku v ose 'x' pro měřenou vrstvu	Mer_q_x_mv = L.J ⁽⁻¹⁾	5	Měřítka součinitele přestupu tepla v ose 'x' pro referenční vrstvu	Mer_alpha_x_nv = L.I ⁽⁻¹⁾	5
slného toku v ose 'x' pro substrát	Mer_q_x_s = L.K ⁽⁻¹⁾	5	Měřítka součinitele přestupu tepla v ose 'x' pro měřenou vrstvu	Mer_alpha_x_mv = L.J ⁽⁻¹⁾	5
sivity v ose 'x' pro referenční vrstvu	Mer_emis_x_nv = L.I ⁽⁻¹⁾	5	Měřítka součinitele přestupu tepla v ose 'x' pro substrát	Mer_alpha_x_s = L.K ⁽⁻¹⁾	5
sivity v ose 'x' pro měřenou vrstvu	Mer_emis_x_mv = L.J ⁽⁻¹⁾	5	Měřítka součinitele přestupu tepla v ose 'y' pro referenční vrstvu	Mer_alpha_y_nv = 1	5
sivity v ose 'x' pro substrát	Mer_emis_x_s = L.K ⁽⁻¹⁾	5	Měřítka součinitele přestupu tepla v ose 'y' pro měřenou vrstvu	Mer_alpha_y_mv = 1	5
sivity v ose 'y' pro referenční vrstvu	Mer_emis_y_nv = 1	5	Měřítka součinitele přestupu tepla v ose 'y' pro substrát	Mer_alpha_y_s = 1	5
sivity v ose 'y' pro měřenou vrstvu	Mer_emis_y_mv = 1	5			
sivity v ose 'y' pro substrát	Mer_emis_y_s = 1	5			

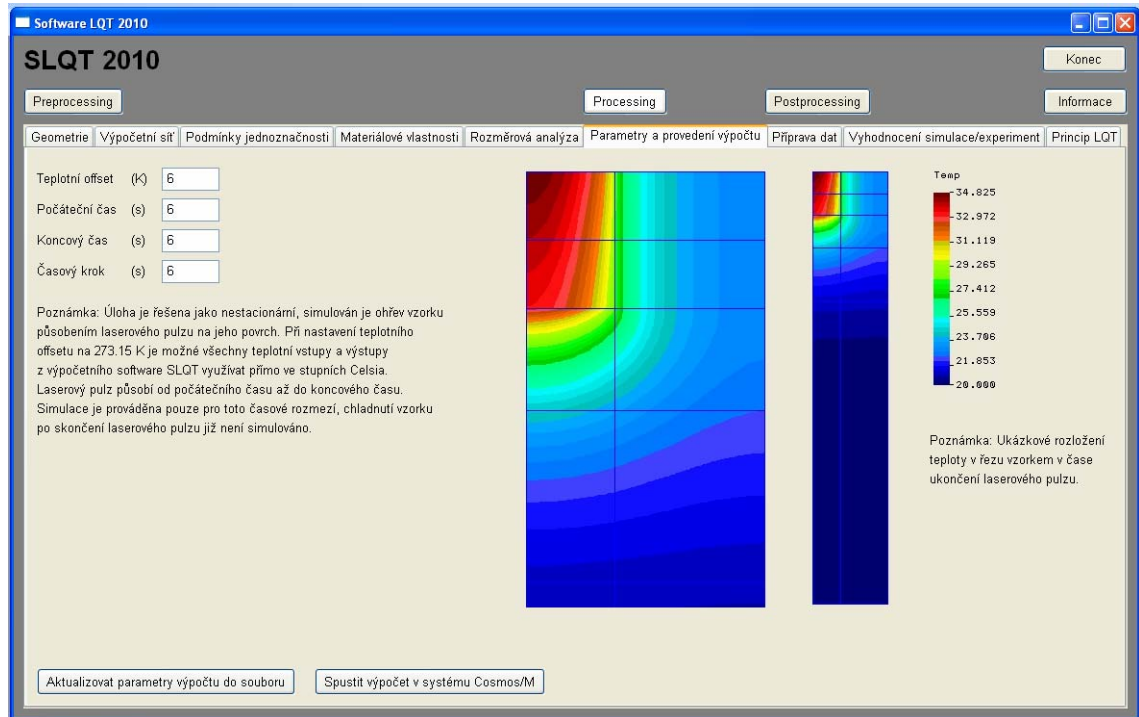
Aktualizovat měřítka do souboru Přepočítat vázaná měřítka po změně volitelných měřítek

4. Hlavní funkce SLQT

4.7 Řešení úlohy – výpočet

Skupina záložek Processing – záložka Parametry a provedení výpočtu.

Zde se zadávají parametry výpočtu a spouští vlastní výpočet s využitím výpočetního systému Cosmos/M.



Software LQT 2010

SLQT 2010

Preprocessing Processing Postprocessing

Geometrie Výpočetní síť Podmínky jednoznačnosti Materiálové vlastnosti Rozměrová analýza **Parametry a provedení výpočtu** Příprava dat Vyhodnocení simulace/experiment Princip LQT

Teplotní offset (K)

Počáteční čas (s)

Koncový čas (s)

Časový krok (s)

Poznámka: Úloha je řešena jako nestacionární, simulován je ohřev vzorku působením laserového pulzu na jeho povrch. Při nastavení teplotního offsetu na 273.15 K je možné všechny teplotní vstupy a výstupy z výpočetního softwaru SLQT využívat přímo ve stupních Celsia. Laserový pulz působí od počátečního času až do koncového času. Simulace je prováděna pouze pro toto časové rozmezí, chlazení vzorku po skončení laserového pulzu již není simulováno.

Temp

34.825
32.872
31.119
29.265
27.412
25.559
23.706
21.853
20.000

Poznámka: Ukázkové rozložení teploty v řezu vzorkem v čase ukončení laserového pulzu.

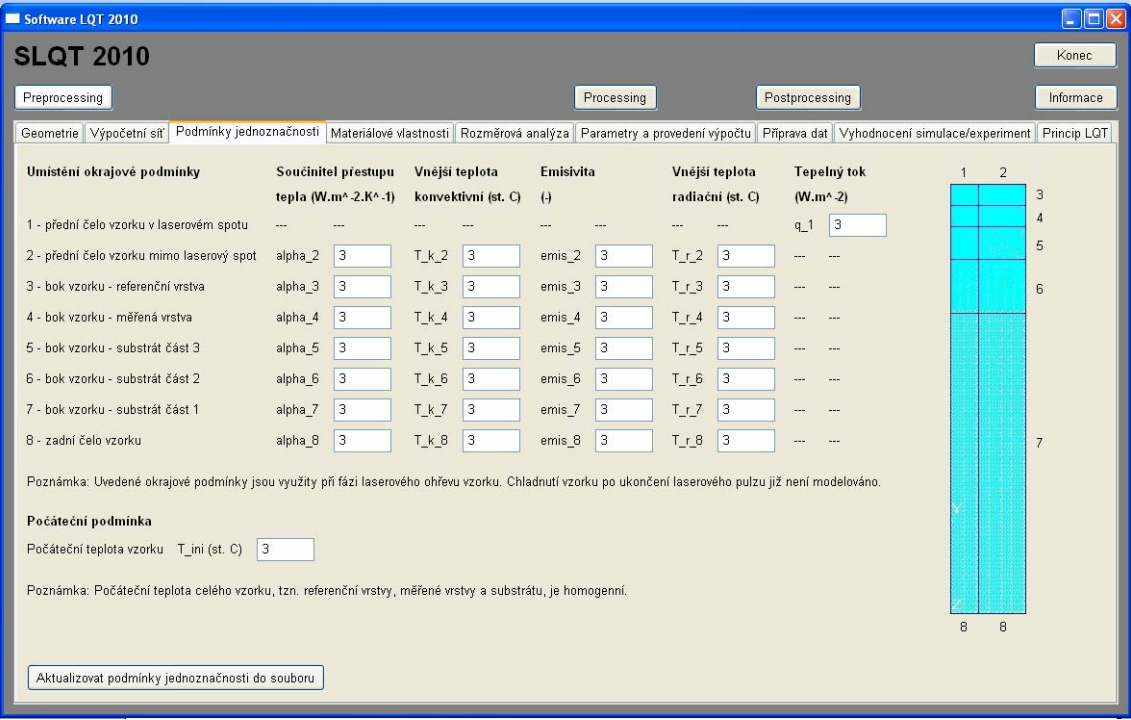
Aktualizovat parametry výpočtu do souboru Spustit výpočet v systému Cosmos/M

4. Hlavní funkce SLQT

4.8 Zpracování výsledků úlohy – příprava dat

Skupina záložek Postprocessing – záložka Příprava dat.

Zde jsou načtena a připravena naměřená data získaná z experimentální části metody LQT. Dále se zde načítají vypočítaná data z počítačového modelu.



Software LQT 2010

SLQT 2010

Preprocessing Processing Postprocessing Informace

Geometrie Výpočetní síť Podmínky jednoznačnosti Materiálové vlastnosti Rozměrová analýza Parametry a provedení výpočtu Příprava dat Vyhodnocení simulace/experiment Princip LQT

Umístění okrajové podmínky	Součinitel přestupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	Vnější teplota konvektivní (st. C)	Emisivita (-)	Vnější teplota radiční (st. C)	Tepelný tok ($W \cdot m^{-2}$)
1 - přední čelo vzorku v laserovém spotu	---	---	---	---	q_1 3
2 - přední čelo vzorku mimo laserový spot	alpha_2 3	T_k_2 3	emis_2 3	T_r_2 3	---
3 - bok vzorku - referenční vrstva	alpha_3 3	T_k_3 3	emis_3 3	T_r_3 3	---
4 - bok vzorku - měřená vrstva	alpha_4 3	T_k_4 3	emis_4 3	T_r_4 3	---
5 - bok vzorku - substrát část 3	alpha_5 3	T_k_5 3	emis_5 3	T_r_5 3	---
6 - bok vzorku - substrát část 2	alpha_6 3	T_k_6 3	emis_6 3	T_r_6 3	---
7 - bok vzorku - substrát část 1	alpha_7 3	T_k_7 3	emis_7 3	T_r_7 3	---
8 - zadní čelo vzorku	alpha_8 3	T_k_8 3	emis_8 3	T_r_8 3	---

Poznámka: Uvedené okrajové podmínky jsou využity při fázi laserového ohřevu vzorku. Chladnutí vzorku po ukončení laserového pulzu již není modelováno.

Počáteční podmínka

Počáteční teplota vzorku T_ini (st. C) 3

Poznámka: Počáteční teplota celého vzorku, tzn. referenční vrstvy, měřené vrstvy a substrátu, je homogenní.

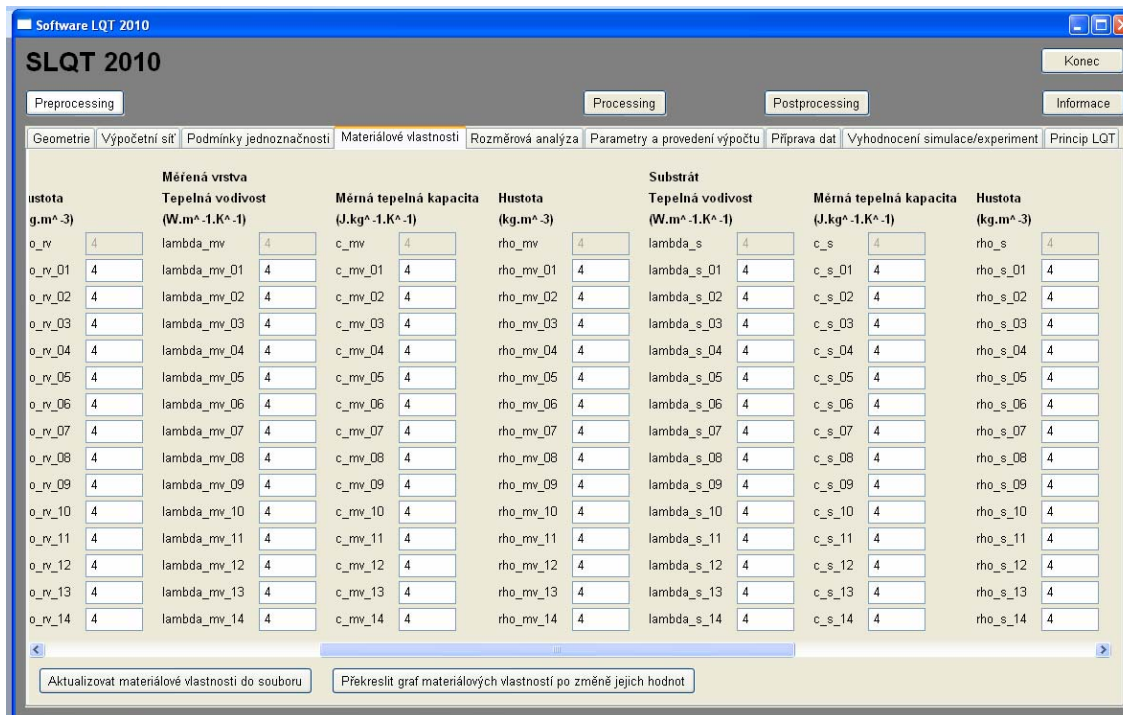
Aktualizovat podmínky jednoznačnosti do souboru

4. Hlavní funkce SLQT

4.9 Zpracování výsledků úlohy – vyhodnocení 1/2

Skupina záložek Postprocessing – záložka Vyhodnocení simulace/experiment.

Zde je možné graficky porovnat shodu naměřených dat a dat získaných ze simulace.



Software LQT 2010

SLQT 2010

Preprocessing Processing Postprocessing Informace

Geometrie Výpočetní síť Podmínky jednoznačnosti Materiálové vlastnosti Rozměrová analýza Parametry a provedení výpočtu Příprava dat Vyhodnocení simulace/experiment Princip LQT

Měřená vrstva				Substrát			
ustota	Tepelná vodivost	Měrná tepelná kapacita	Hustota	Tepelná vodivost	Měrná tepelná kapacita	Hustota	
(g.m^{-3})	($\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$)	($\text{J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$)	(kg.m^{-3})	($\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$)	($\text{J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$)	(kg.m^{-3})	
o_rv	lambda_mv	c_mv	rho_mv	lambda_s	c_s	rho_s	
o_rv_01	lambda_mv_01	c_mv_01	rho_mv_01	lambda_s_01	c_s_01	rho_s_01	
o_rv_02	lambda_mv_02	c_mv_02	rho_mv_02	lambda_s_02	c_s_02	rho_s_02	
o_rv_03	lambda_mv_03	c_mv_03	rho_mv_03	lambda_s_03	c_s_03	rho_s_03	
o_rv_04	lambda_mv_04	c_mv_04	rho_mv_04	lambda_s_04	c_s_04	rho_s_04	
o_rv_05	lambda_mv_05	c_mv_05	rho_mv_05	lambda_s_05	c_s_05	rho_s_05	
o_rv_06	lambda_mv_06	c_mv_06	rho_mv_06	lambda_s_06	c_s_06	rho_s_06	
o_rv_07	lambda_mv_07	c_mv_07	rho_mv_07	lambda_s_07	c_s_07	rho_s_07	
o_rv_08	lambda_mv_08	c_mv_08	rho_mv_08	lambda_s_08	c_s_08	rho_s_08	
o_rv_09	lambda_mv_09	c_mv_09	rho_mv_09	lambda_s_09	c_s_09	rho_s_09	
o_rv_10	lambda_mv_10	c_mv_10	rho_mv_10	lambda_s_10	c_s_10	rho_s_10	
o_rv_11	lambda_mv_11	c_mv_11	rho_mv_11	lambda_s_11	c_s_11	rho_s_11	
o_rv_12	lambda_mv_12	c_mv_12	rho_mv_12	lambda_s_12	c_s_12	rho_s_12	
o_rv_13	lambda_mv_13	c_mv_13	rho_mv_13	lambda_s_13	c_s_13	rho_s_13	
o_rv_14	lambda_mv_14	c_mv_14	rho_mv_14	lambda_s_14	c_s_14	rho_s_14	

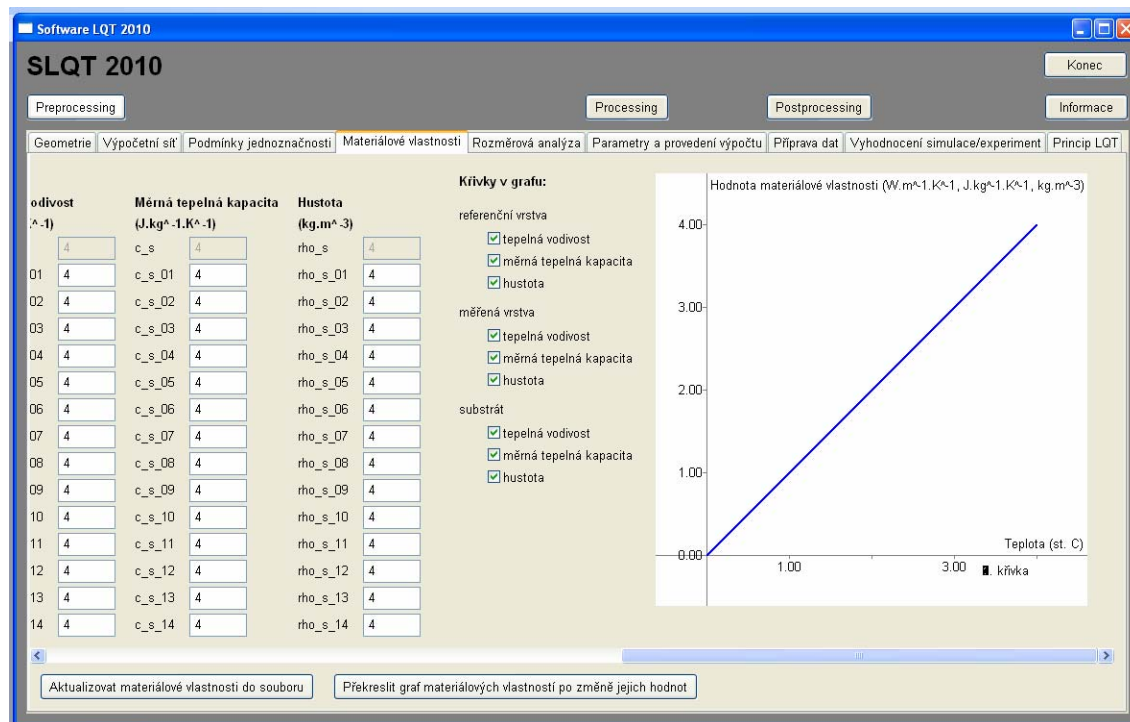
Aktualizovat materiálové vlastnosti do souboru Překreslit graf materiálových vlastností po změně jejich hodnot

4. Hlavní funkce SLQT

4.9 Zpracování výsledků úlohy – vyhodnocení 2/2

Skupina záložek Postprocessing – záložka Vyhodnocení simulace/experiment.

Dále je zde možné nechat si graficky a numericky zobrazit další doplňková data ze simulace.

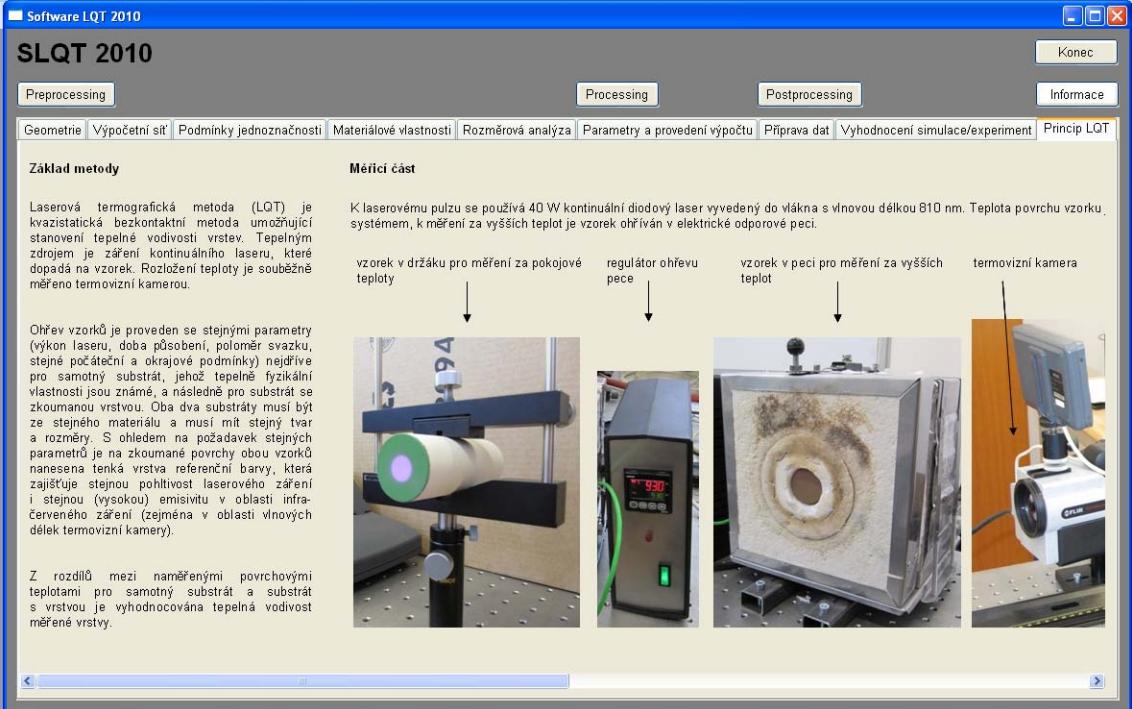


4. Hlavní funkce SLQT

4.10 Informace – princip LQT 1/2

Skupina záložek Informace – záložka Princip LQT.

Zde jsou popsány základy metody LQT. Stručně je zmíněna měřicí část metody.



Software LQT 2010

SLQT 2010 Konec

Preprocessing Processing Postprocessing Informace

Geometrie Výpočetní síť Podmínky jednoznačnosti Materiálové vlastnosti Rozměrová analýza Parametry a provedení výpočtu Příprava dat Vyhodnocení simulace/experiment **Princip LQT**

Základ metody

Laserová termografická metoda (LQT) je kvazistatická bezkontaktní metoda umožňující stanovení tepelné vodivosti vrstev. Tepelným zdrojem je záření kontinuálního laseru, které dopadá na vzorek. Rozložení teploty je souběžně měřeno termovizní kamerou.

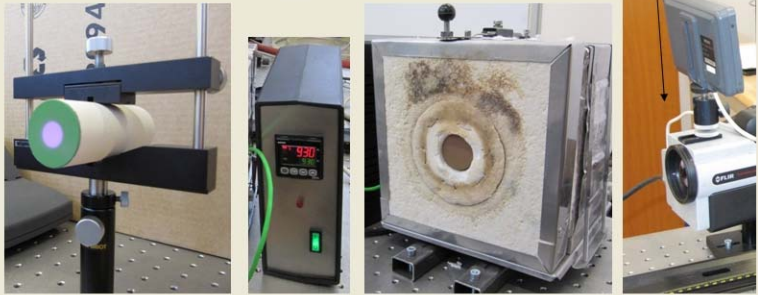
Ohřev vzorků je proveden se stejnými parametry (výkon laseru, doba působení, poloměr svazku, stejné počáteční a okrajové podmínky) nejdříve pro samotný substrát, jehož tepelné fyzikální vlastnosti jsou známy, a následně pro substrát se zkoumanou vrstvou. Oba dva substráty musí být ze stejného materiálu a musí mít stejný tvar a rozměry. S ohledem na požadavek stejných parametrů je na zkoumané povrchy obou vzorků nanášena tenká vrstva referenční barvy, která zajišťuje stejnou pohltivost laserového záření i stejnou (vysokou) emisivitu v oblasti infračerveného záření (zejména v oblasti vlnových délek termovizní kamery).

Z rozdílů mezi naměřenými povrchovými teplotami pro samotný substrát a substrát s vrstvou je vyhodnocována tepelná vodivost měřené vrstvy.

Měřicí část

K laserovému pulzu se používá 40 W kontinuální diodový laser vyvedený do vlákna s vlnovou délkou 810 nm. Teplota povrchu vzorku, systémem, k měření za vyšších teplot je vzorek ohříván v elektrické odporové peci.

vzorek v držáku pro měření za pokojové teploty regulátor ohřevu pece vzorek v peci pro měření za vyšších teplot termovizní kamera

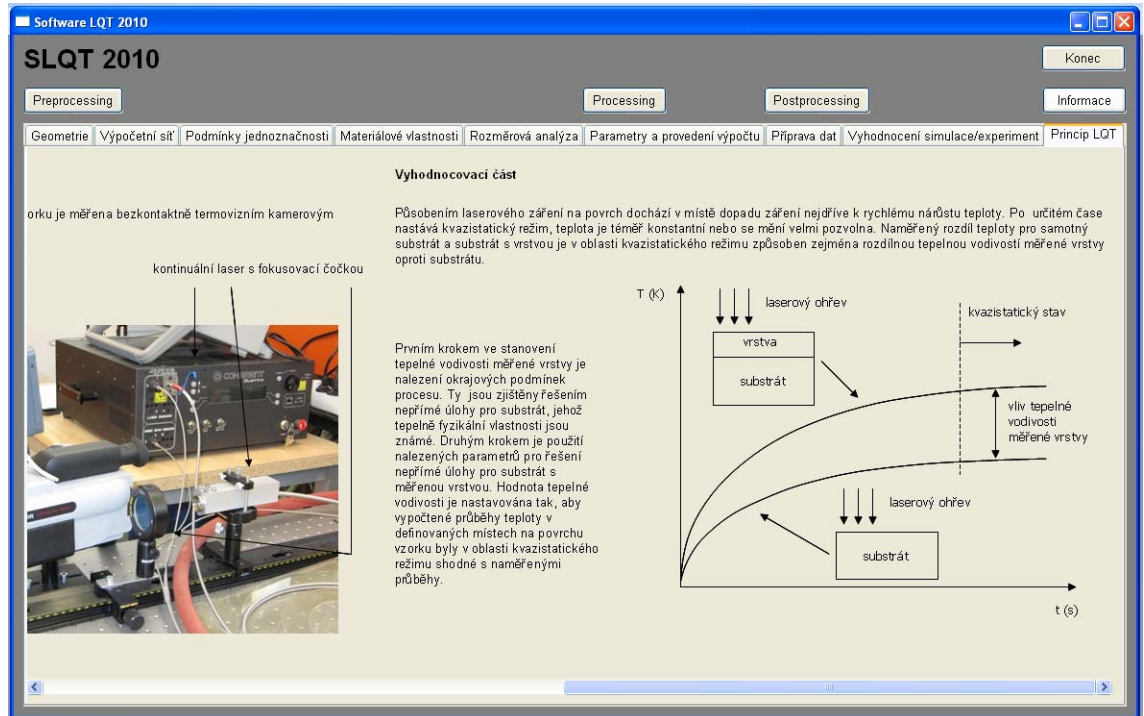


4. Hlavní funkce SLQT

4.10 Informace – princip LQT 2/2

Skupina záložek Informace – záložka Princip LQT.

Detailně je popsána
vyhodnocovací část metody
a nastíněn postup při
vyhodnocování tepelné
vodivosti měřené vrstvy.



Software LQT 2010

SLQT 2010

Preprocessing Processing Postprocessing Informace

Geometrie Výpočetní síť Podmínky jednoznačnosti Materiálové vlastnosti Rozměrová analýza Parametry a provedení výpočtu Příprava dat Vyhodnocení simulace/experiment **Princip LQT**

Vyhodnocovací část

orku je měřena bezkontaktně termovizním kamerovým

kontinuální laser s fokusovací čočkou

Působením laserového záření na povrch dochází v místě dopadu záření nejdříve k rychlému nárůstu teploty. Po určitém čase nastává kvazistatický režim, teplota je téměř konstantní nebo se mění velmi pozvolna. Naměřený rozdíl teploty pro samotný substrát a substrát s vrstvou je v oblasti kvazistatického režimu způsoben zejména rozdílnou tepelnou vodivostí měřené vrstvy proti substrátu.

Prvním krokem ve stanovení tepelné vodivosti měřené vrstvy je nalezení okrajových podmínek procesu. Ty jsou zjištěny řešením nepřímé úlohy pro substrát, jehož tepelné fyzikální vlastnosti jsou známy. Druhým krokem je použití nalezených parametrů pro řešení nepřímé úlohy pro substrát s měřenou vrstvou. Hodnota tepelné vodivosti je nastavována tak, aby vypočtené průběhy teploty v definovaných místech na povrchu vzorku byly v oblasti kvazistatického režimu shodné s naměřenými průběhy.

vrstva
substrát

laserový ohřev

kvazistatický stav

vliv tepelné vodivosti měřené vrstvy

laserový ohřev

substrát

T (K)

t (s)

4. Hlavní funkce SLQT

4.11 Ukončení programu

Ukončením programu nejsou smazány žádné soubory s výsledkovými daty.

Po ukončení vyhodnocování měřené vrstvy je nutné zálohovat potřebné datové soubory, neboť vyhodnocování další měřené vrstvy probíhá s využitím stejným datových souborů.

