



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

KKS/VSC

Návod k praktickému cvičení Teplotní úlohy

Prof. Václava Lašová, Ph.D. a kolektiv



Katedra konstruování strojů
Fakulta strojní

,verze -2.0

Stacionární teplotní úlohy

Řeší-li se jeden ustálený teplotní stav bez časové závislosti, jde o stacionární teplotní úlohu a přístup k řešení je lineární. Podle charakteru sdílení tepla se nasimuluje :

Vedení tepla (jednou součástí, nebo v případě více těles s užitím teplotního kontaktu mezi nimi) – zadá se vnější teplotní zatížení (ve formě teplot nebo teplotního zatížení) a konstantní koeficient teplotní vodivosti. Těleso nemusí být upevněno.

Proudění (kolem jedné součásti nebo více součástí spojených teplotním kontaktem) – zadá se teplotní zatížení analogicky jako u vedení tepla, navíc se musí označit teplosměnné plochy, definovat teplotu okolního média a zadat konstantní koeficient přestupu tepla. Těleso nemusí být upevněno.

Sálání (na jedné součásti nebo na více dílech spojených teplotním kontaktem) – zadá se teplotní zatížení a definují se termooptické vlastnosti materiálu. Těleso nemusí být upevněno.

Přístupy lze samozřejmě kombinovat.

Výstupem teplotních úloh je rozložení teplot v tělese, Pro praxi je ovšem více zajímavé, jaké deformace teplotní gradient způsobí. K tomu slouží termoelastické úlohy.

Termoelastické úlohy

Při ohřevu konstrukce se mění fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálů, které se projeví teplotní roztažností konstrukce – výsledkem této analýzy je deformační a napěťový stav konstrukce vzniklý vlivem teplotního gradientu. Pro zjištění teplotních deformací se provede nejprve teplotní analýza a její výsledky jsou vstupními daty pro statickou analýzu. (Zjištěné teploty jsou ve statické úloze použity jako nucené posuvy uzlů).

Pro provedení této analýzy je třeba těleso upevnit (statické analýzy bez jednoznačného upevnění v prostoru jsou neřešitelné) a k materiálovým vlastnostem definovat konstanty potřebné pro statickou analýzu (E , μ) a dále koeficient objemové roztažnosti použitého materiálu.

Nestacionární úlohy

Pokud je třeba řešit teplotní úlohu , kdy teplota je navíc funkcí času, jde už o řešení nelineární a platí pro tuto úlohu všechna doporučení pro řízení nelineární úlohy. Problém chladnutí, nebo naopak ohřevu tělesa s časovou závislostí teploty a teplotního zatížení se tedy opět řeší definováním zatěžovacích kroků pro určité časové intervaly. Pro definici jednotlivých zatěžovacích kroků se užije stejných postupů definování druhů sdílení tepla, jako u úloh stacionárních.

Důležité je stanovení počátečních podmínek - tj stavu na začátku analýzy a podmínky pro které jsou definovány tepelné vlastnosti materiálů. V této úloze lze také zohlednit změny materiálových charakteristik v souvislosti s růstem teplot i zahrnout nelineární chování materiálu.

Nastavení řešiče

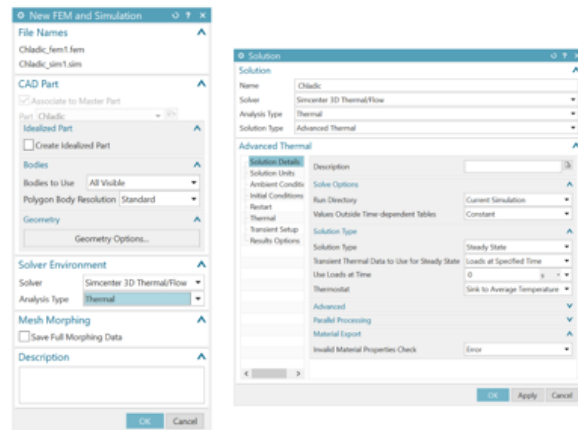
Teplotní úlohy se řeší teplotním řešičem *Simcenter Thermal/Flow*. Tento řešič je třeba nastavit a definovat teplotní úlohu.

Vytvoření FEM a SIM souboru

File > Pre/Post

New Fem and Simulation

- Bodies to Use > All Visible
- Solver Environment
 - Solver > Simcenter 3D Thermal/Flow
 - Analysis type > Thermal
- Solution
 - Name > ... zadejte název úlohy
 - Solver > Simcenter 3D Thermal/Flow
// Nastavení typu řešiče
 - Analysis type > Thermal
// Nastavení typu analýzy
 - Solution Type > Advanced Thermal

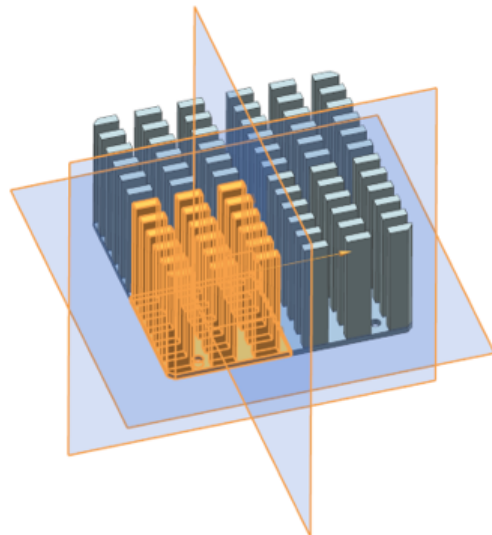


Příklad chladič – stacionární úloha

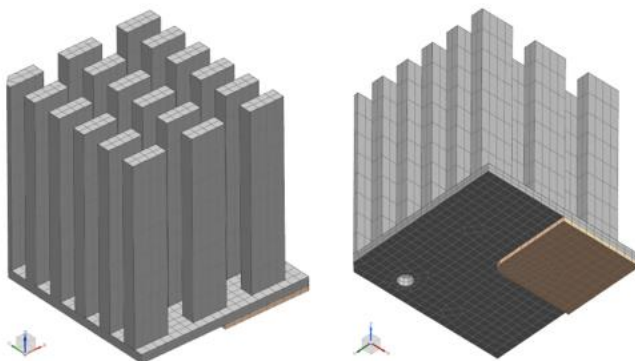
I u teplotních úloh se nabízí zjednodušení z hlediska symetrie – zde bude řešena čtvrtina modelu.

Zjednodušení modelu

- Z geometrie modelu i zátěžných stavů je patrná rovinná symetrie modelu hned ve dvou rovinách > tzn. je možno použít zjednodušení ve formě $\frac{1}{4}$ modelu.
 - Dělení modelu provedeme například za pomoci fce. *Trim Body*.



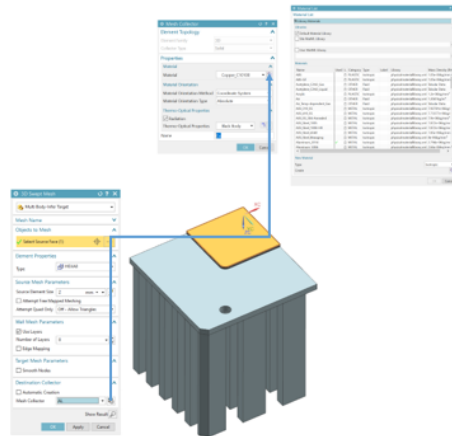
U teplotních úloh se doporučuje jemná kvalitní síť, zde je vytvořena z briků.



Tvorba MKP modelu

- Tvorba tažené 3D sítě s brickovými elementy pasivního chladiče

- Mesh > 3D Swept Mesh
 - Type > HEX8
 - Elementy prvního řádu (bez mezi-uzlů)
 - Element size > 2 mm
// definování velikosti elementů
 - Wall Mesh Parameters
 - Use Layers = 2
// definování počtu elementů napříč objemem
 - Destination Collector
 - Mesh Collector > Copper_C10100
// přiřazení materiálu z knihovny



Pro nastavení teplotních vazeb je využito možností NX definovat 3 typy definice :

- Home >> Simulation Object Type >> Surface-To-Surface Contact
- Home >> Simulation Object Type >> Thermal Coupling
- Home >> Simulation Object Type >> Thermal Coupling - Advanced

FAKULTA STROJNÍ
VÝROBNÍ
ČESKÉHO VYSOKÉHO UČENÍ
V BRNĚ

Stacionární teplotní úlohy

Okrajové podmínky úlohy - vedení

□ Nastavení přenosu tepla mezi měděnou deskou a chladičem z hliníkové slitiny.

- V tomto případě bylo použito okrajové podmínky Surface-to-Surface Contact, a to s nastavením přenosu typu Perfect Contact (není uvažováno žádných ztrát/ tepelného odporu na rozhraní).
- Popř. je možné aplikovat specifické:
 - Celková vodivost [W/°C]
 - Celkový odpor [°C/W]
 - Součinitel tepelné vodivosti [W/m².°C]
 - Vedení mezerou [W/m.°C]

▪ Home >> Simulation Object Type >> Surface-To-Surface Contact

!!! Pro zajištění správného zadání této okrajové podmínky je důležité dodržet správného výběru primárních a sekundárních oblastí >> primární se vybírají v oblasti s větší velikostí elementů než je u oblasti sekundární (pořadí výběru neovlivňuje směr proudění tepla).

Pro nastavení proudění je možno v NX využít dvou typů definice :

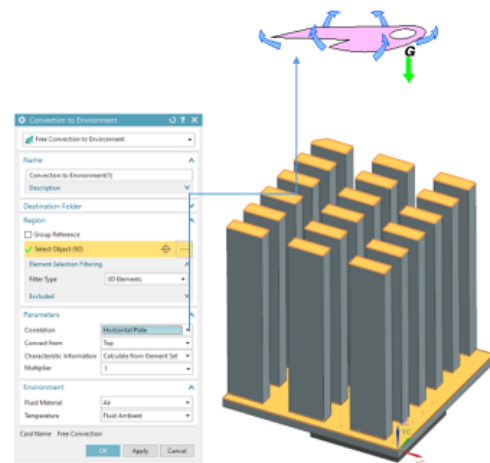
- Home >> Constraint Type >> Convection to Environment
- Home >> Simulation Object Type >> Thermal Coupling - Convection

Okrajové podmínky úlohy - proudění

- Nastavení přenosu tepla volným prouděním (konvekcí).
 - V tomto případě bylo použito okrajové podmínky *Convection to Environment*, a to s nastavením přenosu typu *Free Convection to Environment* (volná konvekce do okolí).
 - Pro tento typ podmínky jsou přednastaveny základní korelační součinitele.
 - Z hlediska vlastního nastavení korelace je možné nastavit typ povrchu, na kterém dochází ke konvekci. Definuje se normálový vektor, charakteristická velikost a zakřivení (tvar) povrchu.
 - V tomto případě byly plochy povrchu rozděleny do tří skupin:

1. Horní horizontální plochy chladiče CPU:

- Home >> Constraint Type >> Convection to Environment
- Type >> Free Convection to Environment
- Region >> vybrány veškeré spodní horizontální plochy
- Correlation >> Horizontal Plate
- Convect from >> Top

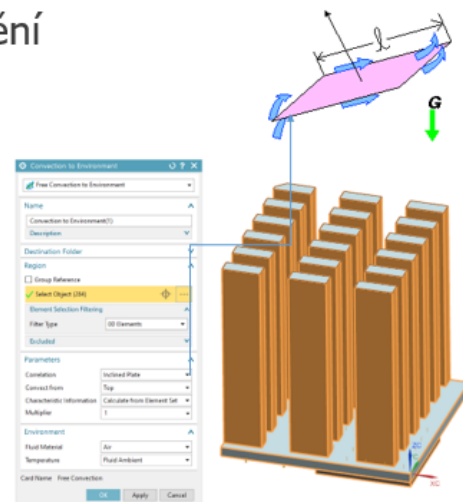


Okrajové podmínky úlohy - proudění

- Nastavení přenosu tepla volným prouděním (konvekcí).
 - V tomto případě bylo použito okrajové podmínky *Convection to Environment*, a to s nastavením přenosu typu *Free Convection to Environment* (volná konvekce do okolí).
 - Pro tento typ podmínky jsou přednastaveny základní korelační součinitele.
 - Z hlediska vlastního nastavení korelace je možné nastavit typ povrchu, na kterém dochází ke konvekci. Definuje se normálový vektor, charakteristická velikost a zakřivení (tvar) povrchu.
 - V tomto případě byly plochy povrchu rozděleny do tří skupin:

2. Zbylé plochy chladiče:

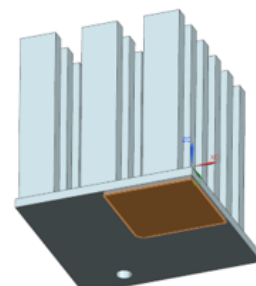
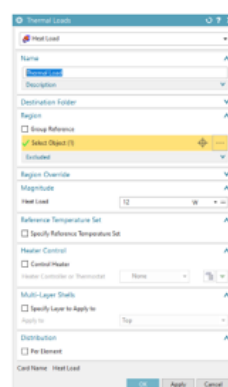
- Home >> Constraint Type >> Convection to Environment
- Type >> Free Convection to Environment
- Region >> vybrány veškeré zbylé plochy
- Correlation >> Inclined Plate
- Convect from >> Top



Nastavení teplotního zatížení :

Okrajové podmínky úlohy

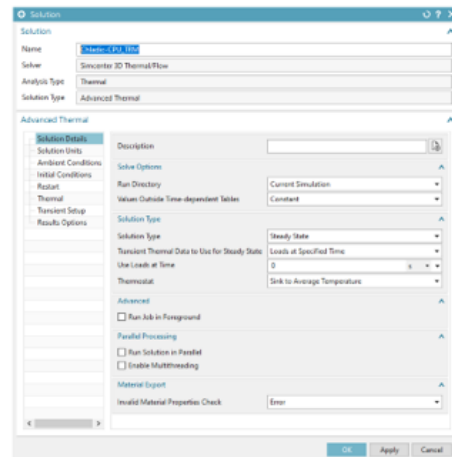
- Teplotní zatížení je zde ve formě výkonu 48W (na 1/4 modelu 12W).
 - Teplotní zatížení je možno definovat za pomoci okrajové podmínky *Thermal Loads (Load Type >> Thermal Loads)*
 - Type = Heat Load
 - Region = vyberte spodní plochu Cu pasty
 - Heat Load = 12W



Nastavení řešiče : stacionární úloha

Nastavení řešiče úlohy

- U řešiče NX Advanced Flow lze použít stacionární a nestacionární (tzv. transientní) typ úlohy.
 - V tomto případě byla úloha řešena jako stacionární (ustálený děj – bez závislosti na čase).
 - Solution Type: Steady State
 - U výpočetně náročnějších úloh je možné spustit úlohu na více jádrech (CPU) a tím snížit výpočetní čas.
 - Je nutné nastavit počet jader pro daný typ řešiče v: Parallel Processing.
 - U procesorů s více logickými jádry je možné nastavit i Multithreading



Následuje reference okolí - normální podmínky :

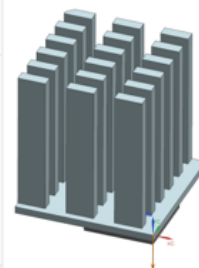
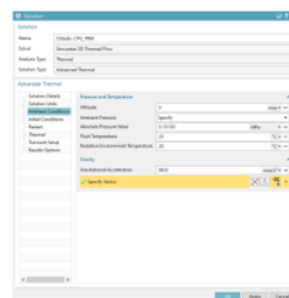


Stacionární teplotní úloha

Nastavení řešiče úlohy

Nastavení okolního prostředí

- V tomto nastavení lze definovat základní nastavení okolí:
 - teploty prostředí (přednastaveno na 20°C),
 - okolního tlaku (přednastaveno na atmosférický tlak 101 kPa),
 - gravitace.
 - U podmínky gravitace je zapotřebí definovat směr působení gravitačního zrychlení.
- Edit >> Solution >> Ambient Conditions

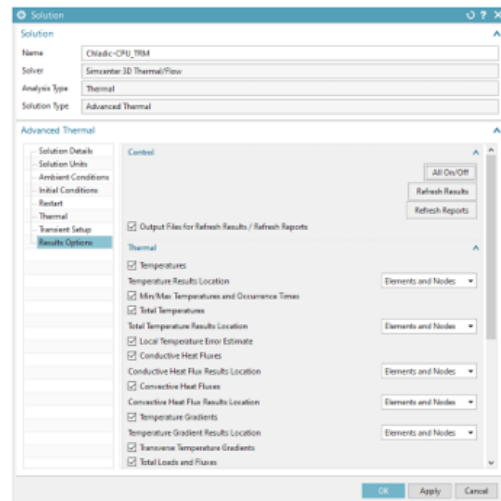


Nastaví se požadovaný typ výsledků a spustí se řešení. Průběh řešení lze monitorovat :

Nastavení řešiče úlohy

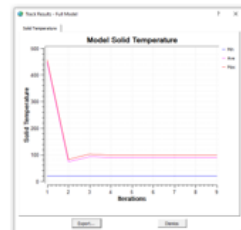
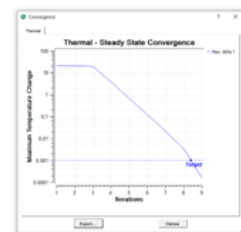
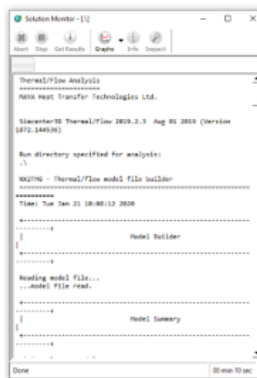
Nastavení výsledků

- Požadovaný typ výsledků, který má být vygenerován po dokončení úlohy je možné vybrat po záložce Results Options.
- Edit >> Solution >> Results Options



Výpočet úlohy

- Po spuštění výpočtu je možno monitorovat celkový průběh analýzy pomocí dialogového okna a grafického zobrazení.
 - Průběhu rychlostí kapaliny a tlaků,
 - průběhu maximální, minimální a průměrné teploty (u nestacionárních úloh v závislosti na čase).
- Průběh konvergence je možno sledovat v grafickém okně Convergence.
 - Výpočet úlohy je dopočten při poklesu všech sledovaných parametrů pod zadanou hodnotu residuí > v tomto případě 0,001 po 7 iteracích.

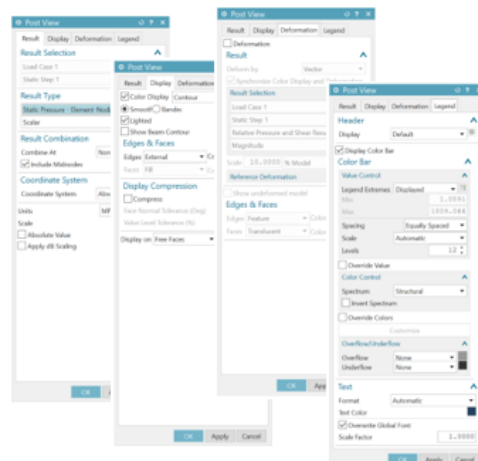


Postprocessing úlohy :

Výběr zobrazovaných výsledků

Výsledky úlohy

- Výsledky otevřeme po proběhnutí analýzy pod složkou Results v záložce Simulation Navigator.
- Veškeré základní funkce z hlediska zobrazení výsledků jsou shromážděny v dialogovém okně Edit Post View.
 - Results >> Post View >> Edit Post View
- Edit Post View
 - Result – výběr výsledků úlohy
 - Result Selection – výběr výsledků úlohy nebo pod-úlohy
 - Result Type – výběr typu výsledků a způsob zobrazení
 - Result Combination – možnost zprůměrování výsledků (na rozhraní elementů nebo uzlů)
 - Coordinate System – volba souřadného systému
 - Units – výběr jednotek výsledků
 - Scale – měřítko výsledků (možné použít např. u úloh lineární statiky)
 - Display – nastavení způsobu vykreslení výsledků, možnost zobrazení výsledků v řezu
 - Deformation – nastavení deformace výsledků
 - Legend – nastavení zobrazení legendy a anotací výsledků



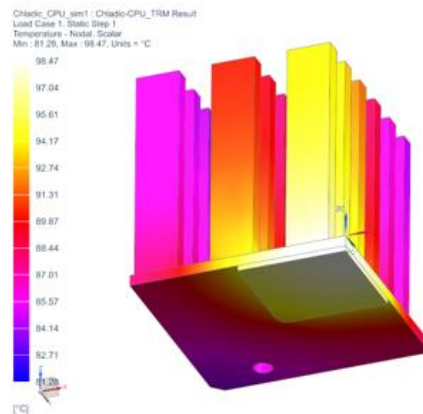
Zobrazení výsledků :

Výsledky úlohy

Průběh teplot

Doporučení:

- Přepnutí barevného spektra na teplotní
 - Edit Post View >> Legend >> Spectrum >> Thermal
- Volba vhodných jednotek
 - Edit Post View >> Result >> Units
- Vypnutí zobrazení sítě
 - Edit Post View >> Display >> Edges >> None
- Řez výsledky
 - Edit Post View >> Display >> Edges >> Display on >> Cutting Plane

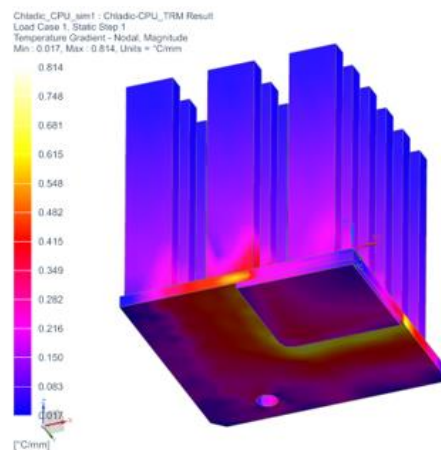


Výsledky úlohy

Průběh teplotního gradientu

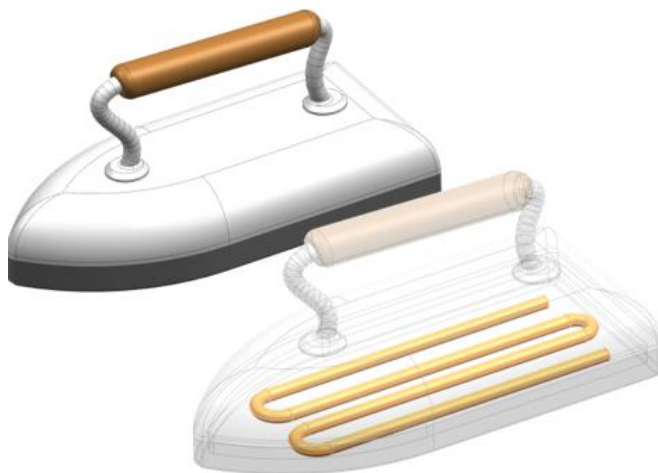
Doporučení:

- Přepnutí barevného spektra na teplotní
 - Edit Post View >> Legend >> Spectrum >> Thermal
- Volba vhodných jednotek
 - Edit Post View >> Result >> Units
- Vypnutí zobrazení sítě
 - Edit Post View >> Display >> Edges >> None
- Řez výsledky
 - Edit Post View >> Display >> Edges >> Display on >> Cutting Plane



Příklad teplotní úlohy žehlička

Žehlička bude ohřívána topným tělesem. Úloha bude řešena jako nestacionární (žehlička se nahřívá a ochlazuje v závislosti na čase) . Těleso nebude upevněno.



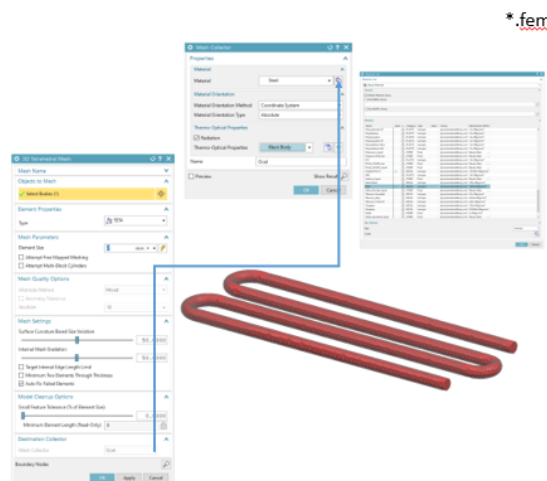
Sítování

Topné těleso

Tvorba MKP modelu

- ▣ Tvorba tažené 3D sítě s tetrahedrovými elementy topného tělesa.

- Mesh > 3D tetrahedral mesh
 - Type > TET4
 - Elementy prvního řádu (bez mezi-uzlů)
 - Element size = 2 mm
 - // definování velikosti elementů
 - Destination Collector
 - Mesh Collector > Steel
 - // přiřazení materiálu z knihovny

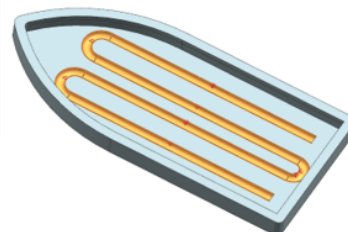
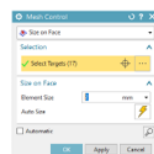


*.fem

Tvorba MKP modelu

- ▣ Tvorba 3D sítě s tetrahedrovými elementy spodní části žehličky.

- Nejdříve je nutné provést zjemnění sítě v oblasti kontaktu spodní části žehličky s topným tělesem, a to aplikováním podmínky kontroly sítě Mesh Control :
 - Home >> Mesh >> Mesh Control
 - Type: Size on Face
 - Selection >> vyberte plochy, které jsou v kontaktu s topným tělesem
 - Element Size = 2 mm



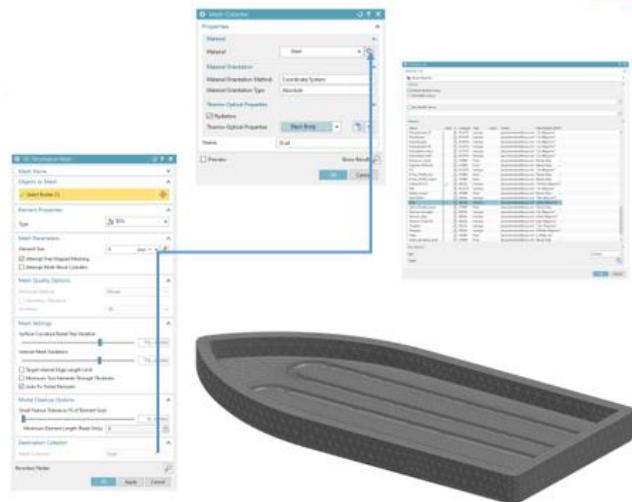
*.fem

Spodní část

Tvorba MKP modelu

- Tvorba tažené 3D sítě s tetrahedrovými elementy spodní části žehličky.

- Mesh > 3D tetrahedral mesh
 - Type > TET4
 - Elementy prvního řádu (bez mezi-uzlů)
 - Element size = 4 mm
 - // definování velikosti elementů
 - Destination Collector
 - Mesh Collector > Steel
 - // přiřazení materiálu z knihovny

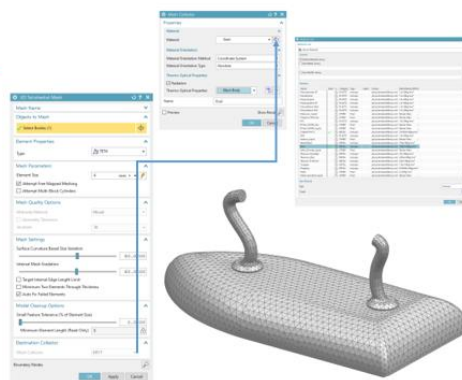


Horní část

Tvorba MKP modelu

- Tvorba tažené 3D sítě s tetrahedrovými elementy horní části žehličky.

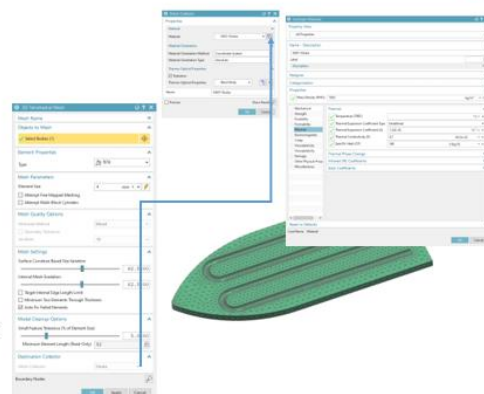
- Mesh > 3D tetrahedral mesh
 - Type > TET4
 - Elementy prvního řádu (bez mezi-uzlů)
 - Element size = 4 mm
 - // definování velikosti elementů
 - Destination Collector
 - Mesh Collector > Steel
 - // přiřazení materiálu z knihovny



Tvorba MKP modelu

- Tvorba 3D sítě s tetrahedrovými elementy vložky žehličky.

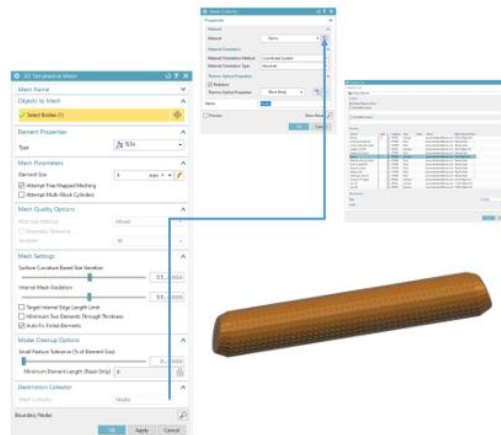
- Mesh > 3D tetrahedral mesh
 - Type > TET4
 - Elementy prvního řádu (bez mezi-uzlů)
 - Element size = 4 mm
 - // definování velikosti elementů
 - Destination Collector
 - Mesh Collector > Vytvoření nového materiálu
 - Material >> Create New Material (isotropic)
 - Karta >> Thermal
 - Thermal Expansion Coefficient = 1,25E-05 1/°C
 - Thermal Conductivity = 8,7 W/(m.K)
 - Specific Heat = 390 J/(kg.K)



Tvorba MKP modelu

- Tvorba 3D sítě s tetraedrovými elementy madla žehličky z epoxidové pryskyřice.

- Mesh > 3D tetrahedral mesh
 - Type > TET4
 - Elementy prvního řádu (bez mezi-uzlů)
 - Element size = 4 mm
// definování velikosti elementů
 - Destination Collector
 - Mesh Collector > Epoxy
// přiřazení materiálu z knihovny



Pozn. Tvorbě sítě je třeba věnovat dost pozornosti. Teplotní úlohy vyžadují kvalitní a jemnou síť. Tam, kde není tak vysoká oblast zájmu (např. vršek žehličky, madlo) mohou být prvky větší.

Okrajové podmínky úlohy

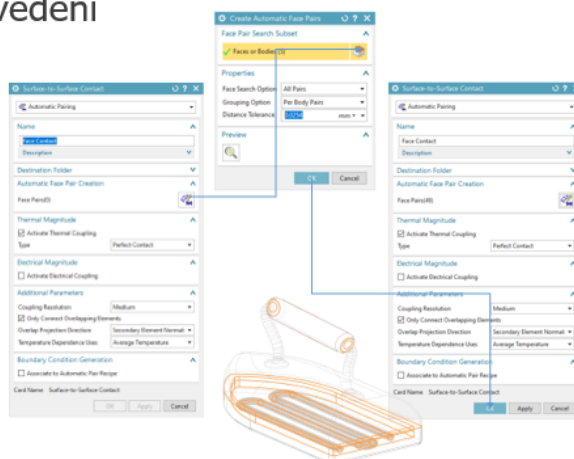
Teplelné zatížení je vzniká v topném tělese a je vedeno do vložky žehličky. V NX lze přenos tepla vedením modelovat třemi způsoby :

- *Home >> Simulation Object Type >> Surface-To-Surface Contact*
- *Home >> Simulation Object Type >> Thermal Coupling*
- *Home >> Simulation Object Type >> Thermal Coupling - Advanced*

Okrajové podmínky úlohy - vedení

- Nastavení přenosu tepla mezi jednotlivými díly žehličky

- V tomto případě bylo použito okrajové podmínky *Surface-to-Surface Contact*, a to s nastavením přenosu typu *Perfect Contact* (není uvažováno žádných ztrát/ tepelného odporu na rozhraní).
- Celkem dojde k vytvoření 6 kontaktních oblastí
 - Popř. je možné aplikovat specifické:
 - Celková vodivost [W/°C]
 - Celkový odpor [°C/W]
 - Součinitel tepelné vodivosti [W/m².°C]
 - Vedení mezerou [W/m.°C]



▪ *Home >> Simulation Object Type >> Surface-To-Surface Contact*

Pro nastavení přenosu tepla prouděním lze použít dvou způsobů modelování :

- *Home >> Constraint Type >> Convection to Enviroment*
- *Home >> Simulation Object Type >> Thermal Coupling - Convection*

Žehlička je na volných plochách ochlazovaná vzduchem. Jedná se o vrchní plochu, držadlo a stěny žehličky. Při modelování bude využito možnosti NX definovat typ ochlazované (nebo ohřívané) plochy a způsob proudění, což umožní využít systémem předdefinovaných koeficientů proudění tepla.

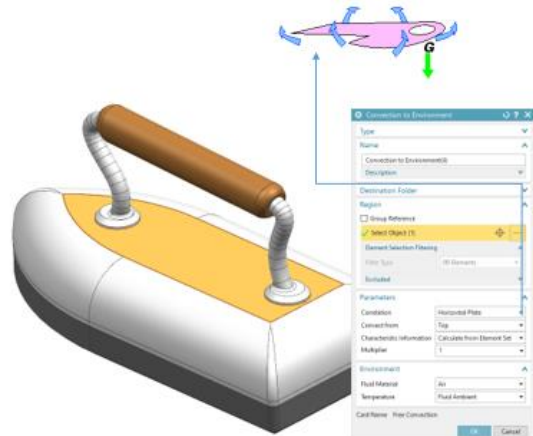
Okrajové podmínky úlohy - proudění

Nastavení přenosu tepla volným prouděním (konvekcí).

- V tomto případě bylo použito okrajové podmínky *Convection to Environment*, a to s nastavením přenosu typu *Free Convection to Environment* (volná konvekce do okolí).
- Pro tento typ podmínky jsou přednastaveny základní korelační součinitele.
 - Z hlediska vlastního nastavení korelace je možné nastavit typ povrchu, na kterém dochází ke konvekci. Definuje se normálový vektor, charakteristická velikost a zakřivení (tvar) povrchu.
- V tomto případě byly plochy povrchu rozděleny do tří skupin:

1. Horní horizontální plocha žehličky:

- Home >> Constraint Type >> Convection to Environment
- Type >> Free Convection to Environment
- Region >> vybrány veškeré spodní horizontální plochy
- Correlation >> Horizontal Plate
- Convect from >> Top



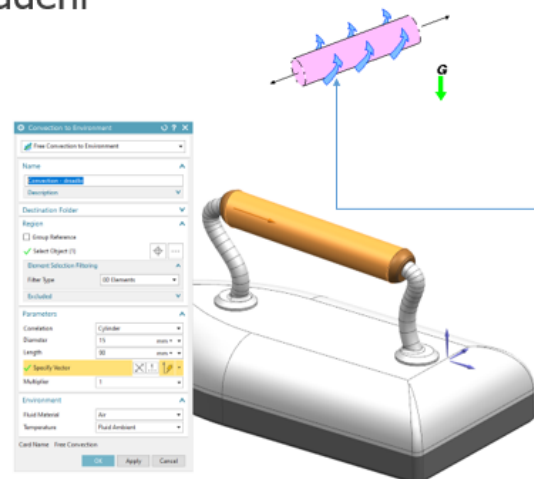
Okrajové podmínky úlohy - proudění

Nastavení přenosu tepla volným prouděním (konvekcí).

- V tomto případě bylo použito okrajové podmínky *Convection to Environment*, a to s nastavením přenosu typu *Free Convection to Environment* (volná konvekce do okolí).
- Pro tento typ podmínky jsou přednastaveny základní korelační součinitele.
 - Z hlediska vlastního nastavení korelace je možné nastavit typ povrchu, na kterém dochází ke konvekci. Definuje se normálový vektor, charakteristická velikost a zakřivení (tvar) povrchu.
- V tomto případě byly plochy povrchu rozděleny do tří skupin:

2. Válcové držadlo žehličky:

- Home >> Constraint Type >> Convection to Environment
- Type >> Free Convection to Environment
- Region >> vybrány válcové plochy držadla žehličky
- Correlation >> Cylinder
- Diameter = průměr válcové plochy (zde 15mm)
- Length = výška válcového tělesa (zde 90mm)



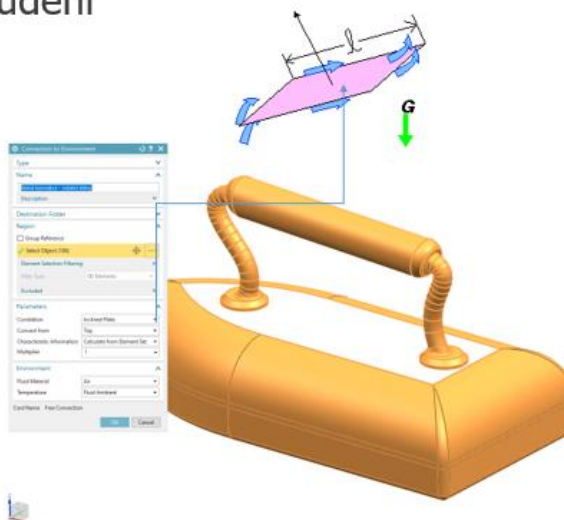
Okrajové podmínky úlohy - proudění

Nastavení přenosu tepla volným prouděním (konvekcí).

- V tomto případě bylo použito okrajové podmínky *Convection to Environment*, a to s nastavením přenosu typu *Free Convection to Environment* (volná konvekce do okolí).
- Pro tento typ podmínky jsou přednastaveny základní korelační součinitele.
 - Z hlediska vlastního nastavení korelace je možné nastavit typ povrchu, na kterém dochází ke konvekcí. Definuje se normálový vektor, charakteristická velikost a zakřivení (tvar) povrchu.
- V tomto případě byly plochy povrchu rozděleny do tří skupin:

3. Ostatní volné stěny žehličky:

- Home >> Constraint Type >> Convection to Environment
- Type >> Free Convection to Environment
- Region >> vybrány válcové plochy držadla žehličky
- Correlation >> Inclined Plate



Pro spodní plochu žehličky bylo využito přestupu tepla definicí volné konvekce do okolí se zadanými hodnotami.

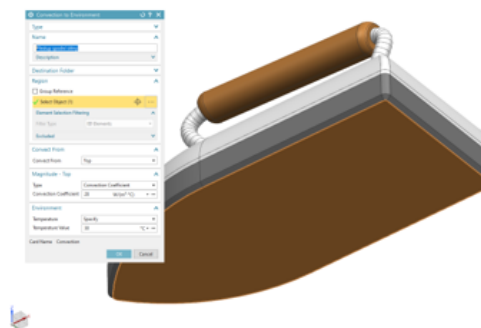
Okrajové podmínky úlohy - proudění

Nastavení přenosu tepla prouděním (konvekcí) mezi dotýkovou plochou žehličky a kontaktní stěnou, u které je uvažováno koeficientu přestupu tepla $28 \text{ W/m}^2\text{C}$ se specifickou teplotou 30°C .

- V tomto případě bylo použito okrajové podmínky *Convection to Environment*, a to s nastavením přenosu typu *Convection to Environment* (volná konvekce do okolí).
- Pro tento typ podmínky jsou přednastaveny základní korelační součinitele.
 - Z hlediska vlastního nastavení korelace je možné nastavit typ povrchu, na kterém dochází ke konvekcí. Definuje se normálový vektor, charakteristická velikost a zakřivení (tvar) povrchu.
- V tomto případě byly plochy povrchu rozděleny do tří skupin:

4. Kontaktní plocha žehličky:

- Home >> Constraint Type >> Convection to Environment
- Type >> Convection to Environment
- Region >> vybrána spodní kontaktní plocha žehličky
- Type >> Convection Coefficient
- Conv. Coefficient = $28 \text{ W/m}^2\text{C}$
- Environment > Specify
 - Temperature = 30°C

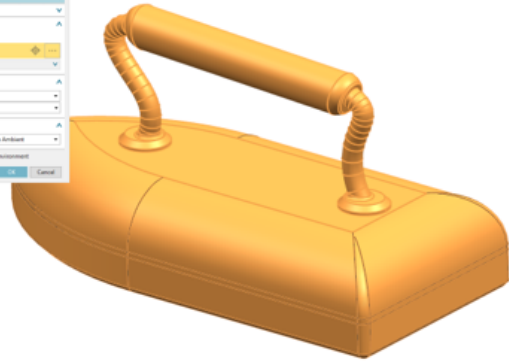
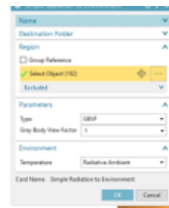


Pro sálání je možno využít několika typů okrajových podmínek:

- Home >> Constraint Type >> Simple Radiation to Environment (základní „zjednodušený“ typ)
- Home >> Simulation Object Type >> Radiation (pokročilý typ – avšak značně náročný na výpočetní čas (v první fázi výpočtu je využíváno i GPU)

Na všechny plochy tělesa byly použity zjednodušené podmínky :

- V tomto případě bylo použito okrajové podmínky Simple Radiation to Environment, a to s nastavením typu GBVF (Gray body view factor – tzn., že je použito šedého tělesa s emisivitou definovanou v Termo-Optických parametrech MKP sítě)
 - Termo-optické vlastnosti materiálu lze definovat zjednodušeně nebo s pokročilým nastavením.
 - U základního nastavení se zadává pouze emisivita (intenzita záření) daného materiálu, která udává poměr energie vyzařované (z určitého materiálu) k energii vyzařované černým tělesem při stejné teplotě.
 - U pokročilého nastavení se včetně emisivity zadává též i absorptivita materiálu (poměr záření absorbovaného povrchem k celkovému záření dopadajícího na povrch), reflektivita (odrazivost) povrchu materiálu, transmisivita (propustnost) materiálu a index lomu světla.
- Region >> byly vybrány veškeré volné plochy tělesa chladiče.
- Home >> Constraint Type >> Simple Radiation to Environment (základní „zjednodušený“ typ)

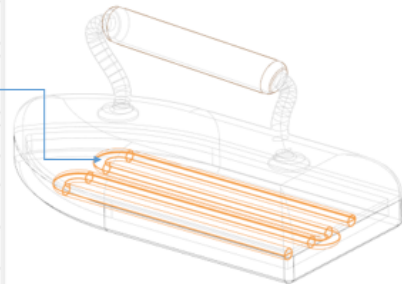
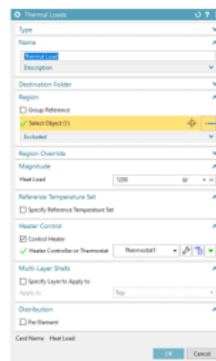


Definice teplotního zatížení (definovaný teplotní tok) :

Okrajové podmínky úlohy – teplotní zatížení

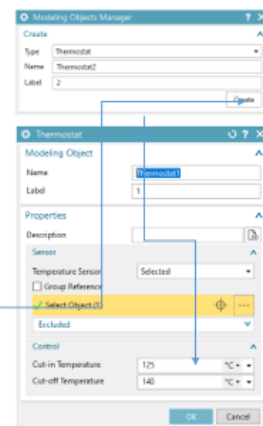
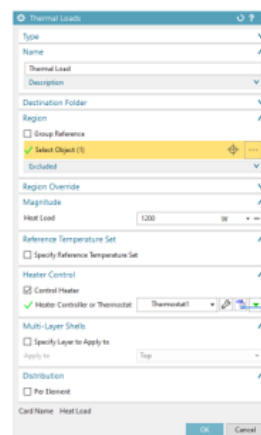
Teplotní zatížení

- Teplotní zatížení bylo aplikováno na topné těleso za pomoci okrajové podmínky Thermal Loads.
 - Home >> Constraint Type >> Thermal Loads
 - Typ >> Heat Load
 - Region >> veškeré plochy oválného otvoru
 - Heat Load >> 1200 W
 - Pro řízení teplotního zatížení byl přiřazen termostat > ... viz další slide



Okrajové podmínky úlohy – teplotní zatížení

- Teplotní zatížení – Vytvoření termostatu
- Všechny typy tepelného zatížení lze řídit využitím funkce termostat nebo aktivním regulátorem teploty.
 - Funkce termostatu zajišťuje kontrolu výdeje tepelného zatížení zapínáním/vypínáním tepelného zatížení u definovaných elementů.
 - Sepnutí/vypnutí termostatu je řízeno definovanou hodnotou teploty na přiřazeném elementu nebo ploše. Pokud je dosaženo zadané maximální teploty > tepelné zatížení se automaticky vypne do té doby, dokud teplota neklesne pod stanovené minimum.
 - Tato funkce je možná pouze u nestacionárních úloh. Kontrola teploty na definovaném elementu/u je kontrolována nastavenou frekvencí, při které ovladač termostatu osciluje. Tato frekvence pro zajištění nezkrácených výsledků musí být nižší než nastavený krok nestacionárního řešení.
 - U časově náročnějších úloh, které nemohou mít tak nízký iterační krok, je nutné použít integrační metodu typu – „implicit“.
 - V tomto případě byl vytvořen termostat aktivací funkce Control Heater >> Create >> Thermostat >> Create >> Edit
 - Cut-in Temperature = 125°C
 - Cut-off Temperature = 140°C
 - Select object ... vyberte jeden z elementů topného tělesa

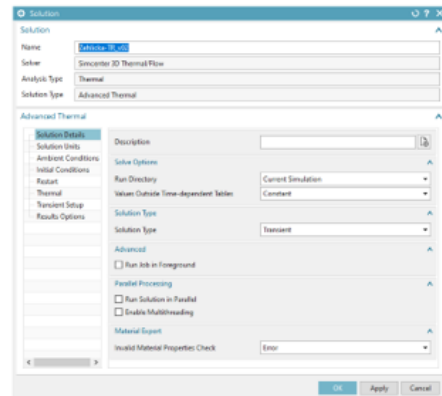


Nastavení řešiče:

Pro řešení nestacionární úlohy je třeba stanovit časový interval, počet kroků a které výsledky mají být archivovány (zde každý třetí krok).

Nastavení řešiče úlohy

- U řešiče NX Advanced Flow lze použít stacionární a nestacionární (tzv. transientní) typ úlohy.
 - V tomto případě byla úloha řešena jako stacionární (ustálený děj – bez závislosti na čase).
 - Solution Type: Transient
 - U výpočetně náročnějších úloh je možné spustit úlohu na více jádrech (CPU) a tím snížit výpočetní čas.
 - Je nutné nastavit počet jader pro daný typ řešiče v: Parallel Processing.
 - U procesorů s více logickými jádry je možné nastavit i Multithreading



Jako startovací hodnoty se nastavují počáteční podmínky řešení :

Nastavení řešiče úlohy

Nastavení okolního prostředí

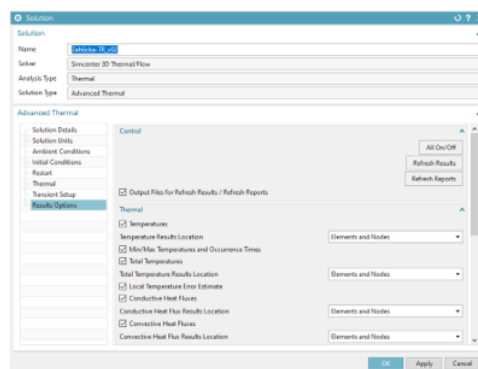
- V tomto nastavení lze definovat základní nastavení okolní:
 - teploty prostředí (přednastaveno na 20°C),
 - okolního tlaku (přednastaveno na atmosférický tlak 101 kPa),
 - gravitace.
 - U podmínky gravitace je zapotřebí definovat směr působení gravitačního zrychlení.
- Edit >> Solution >> Ambient Conditions

A jaké výsledky mají být archivovány :

Nastavení řešiče úlohy

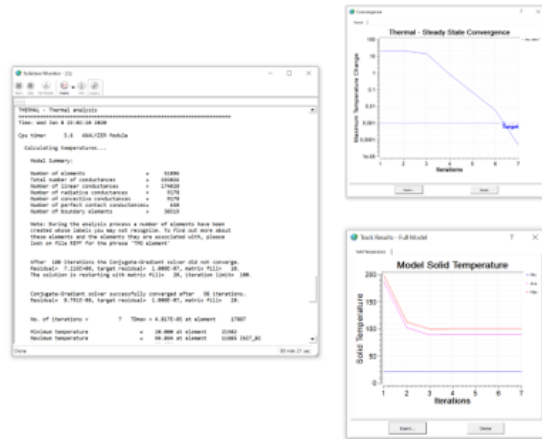
Nastavení výsledků

- Požadovaný typ výsledků, který má být vygenerován po dokončení úlohy je možné vybrat po záložkou Results Options.
- Edit >> Solution >> Results Options



Výpočet úlohy

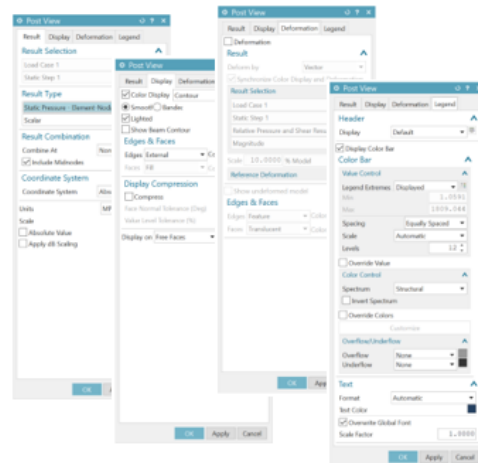
- Po spuštění výpočtu je možno monitorovat celkový průběh analýzy pomocí dialogového okna a grafického zobrazení.
 - Průběhu rychlostí kapaliny a tlaků,
 - průběhu maximální, minimální a průměrné teploty (u nestacionárních úloh v závislosti na čase).
- Průběh konvergence je možno sledovat v grafickém okně Convergence.
 - Výpočet úlohy je dopočten při poklesu všech sledovaných parametrů pod zadanou hodnotu residu > v tomto případě 0,001 po 7 iteracích.



Postprocessing – práce s výsledky

Výsledky úlohy

- Výsledky otevřeme po proběhnutí analýzy pod složkou Results v záložce Simulation Navigator.
- Veškeré základní funkce z hlediska zobrazení výsledků jsou shromážděny v dialogovém okně Edit Post View.
 - Results >> Post View >> Edit Post View
 - Edit Post View
 - Result – výběr výsledků úlohy
 - Result Selection – výběr výsledků úlohy nebo pod-úlohy
 - Result Type – výběr typu výsledků a způsob zobrazení
 - Result Combination – možnost zprůměrování výsledků (na rozhraní elementů nebo uzlů)
 - Coordinate System – volba souřadného systému
 - Units – výběr jednotek výsledků
 - Scale – měřítka výsledků (možné použít např. u úloh lineární statiky)
 - Display – nastavení způsobu vykreslení výsledků, možnost zobrazení výsledků v řezu
 - Deformation – nastavení deformace výsledků
 - Legend – nastavení zobrazení legendy a anotací výsledků

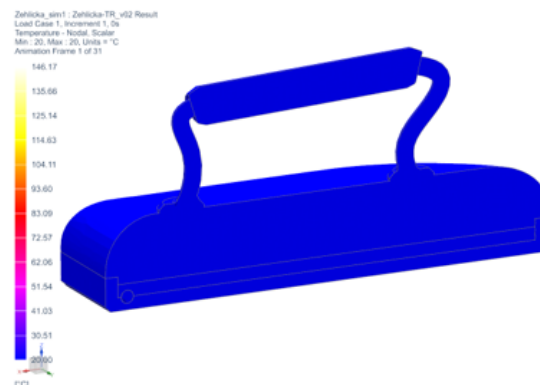


Výsledky úlohy

Průběh teplot

Doporučení:

- Přepnutí barevného spektra na teplotní
 - Edit Post View >> Legend >> Spectrum >> Thermal
- Volba vhodných jednotek
 - Edit Post View >> Result >> Units
- Vypnutí zobrazení sítě
 - Edit Post View >> Display >> Edges >> None
- Řez výsledky
 - Edit Post View >> Display >> Edges >> Display on >> Cutting Plane



Lze zobrazovat pokles (eventuálně nárůst) teploty po archivovaných krocích výsledků, zapnout (vypnout) zobrazování sítě, kreslit grafy teplot apod.

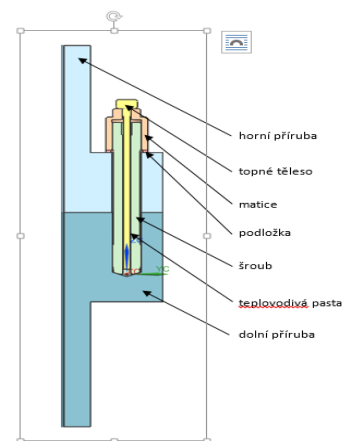
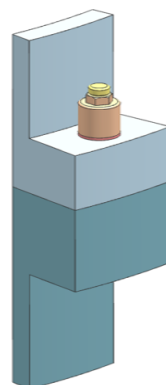
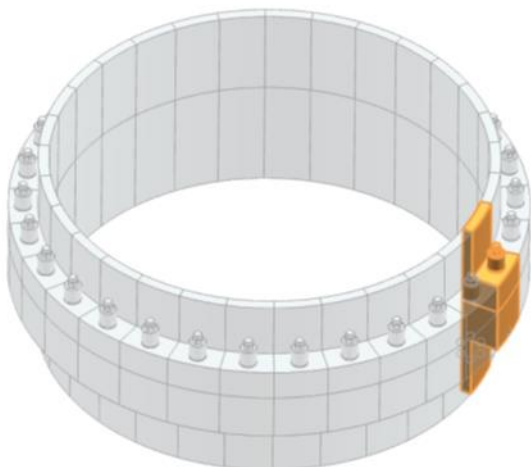
Příklad teplotně – mechanické úlohy předepnutého šroubového spojení.

Jedná se o šroubové spojení dvou přírub, používané například u plášťů parních turbín. Tento typ šroubového spojení se předepíná využitím teplotní roztažnosti šroubu. Přesněji , po umístění šroubu je našroubována matice tak, že je možno mezi ni a podložku vložit měrku o tloušťce 0,05mm. Následně dojde k zahřátí na teplotu, při které dojde k prodloužení dříku šroubu minimálně na vzdálenost při které je možné volné dotažení matice o úhel 66°.

K zahřátí tohoto rozměrného spojení je použito topného tělesa o výkonu 3650W, které je umístěno v dutině uvnitř šroubu, přenos tepla z topného tělesa je uskutečněn prostřednictvím teplovodivé pasty.

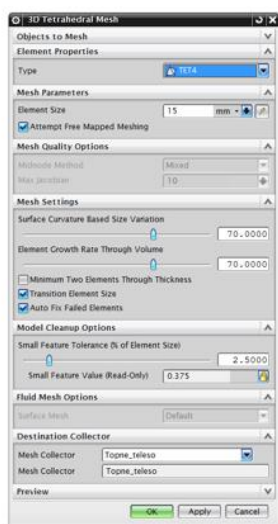
U tohoto příkladu bude uvažován pouze přenos tepla vedením a přirozenou konvekcí.

Jedná se o šroub M120x6 o délce 840mm. Díky geometrické symetričnosti přírub a pravidelného rozmístění šroubů (30 šroubů - po 12°) je úloha zjednodušena na výseč reprezentující 1/30 celkového modelu.

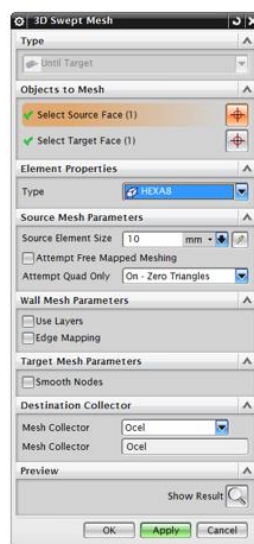
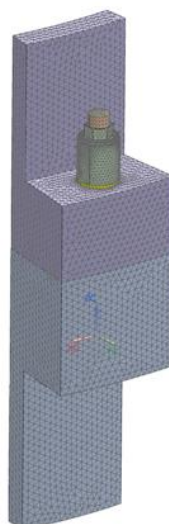


Síťování modelu

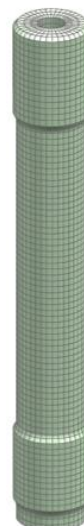
V příkladu je použito fce Mesh Mating Conditions typu Free Coincident. Tím je zajištěno vytvoření identické sítě u ploch těles, které jsou v dotyku (bez jejich propojení). Stejně sítě kontaktujících ploch přispějí k zajištění správné vazby mezi sítěmi z hlediska vedení tepla kondukci. Síť modelu je provedena kombinací tetrahedrových a brikových prvků. Síť přírub, matice s podložkou, topnou tyčí a vodivou pastou jsou vytvořeny z tetrahedrových elementů typu TET4 (bez meziuzlů) o velikosti prvků 10 až 30mm. Šroub, díky své osové symetrii je nasíťován 3D brikovým elementem typu HEXA8 o velikosti 10mm. Dále je mezi těmito sítěmi vytvořeno 3D pyramidového přechodu, který zajišťuje lineárnější přechod přestupu tepla mezi brikovými a tetrahedrovými elementy.



Obrázek 3 - 3D tetrahedrová síť

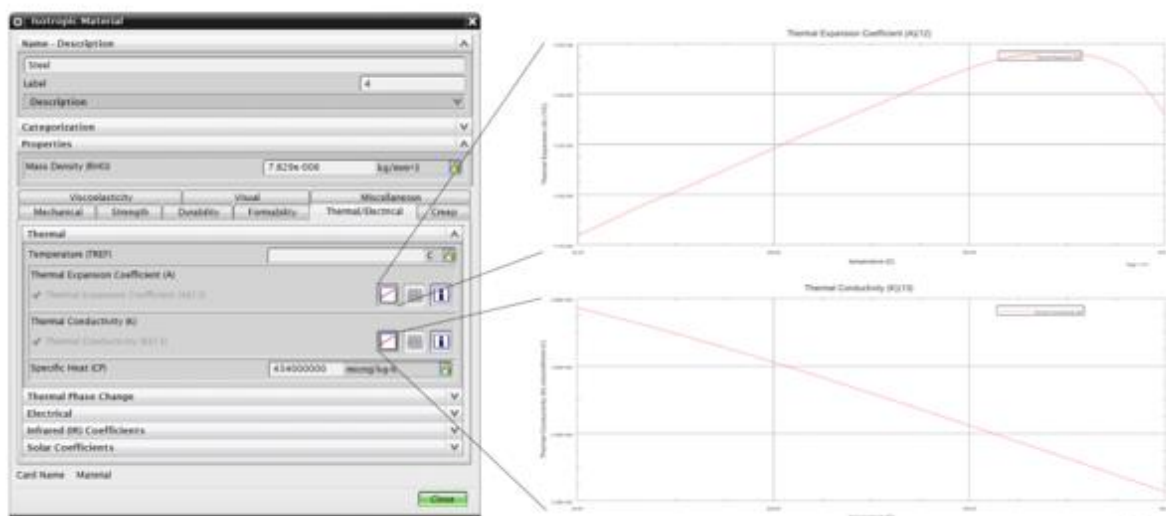


Obrázek 4 - 3D briková síť použitá na tělo šroubu

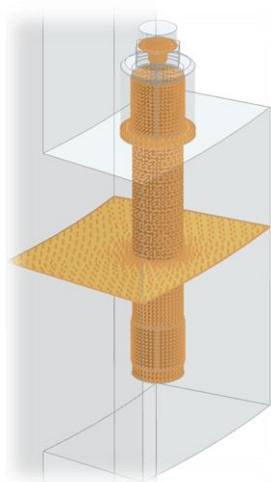


Definování materiálu :

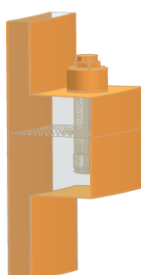
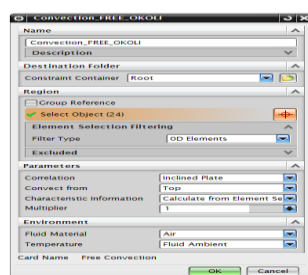
Vzhledem ke kombinované formě výpočtu je třeba zadat parametry materiálu jak pro strukturální analýzu (E, μ, ρ), tak pro teplotní analýzu (α). Pro nestacionární analýzu lze definovat i parametry materiálu měnící se s teplotou.



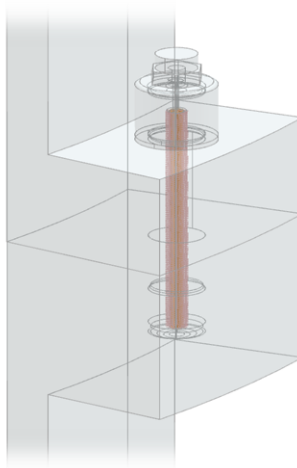
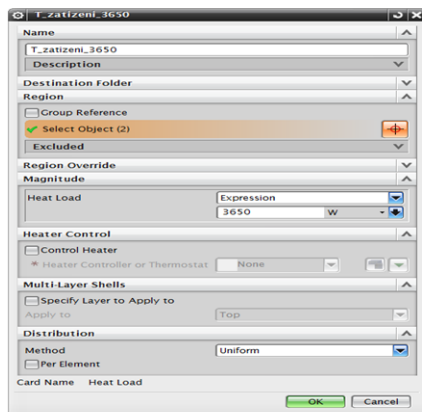
Definování teplotní kontakty – vazby definující kondukcí



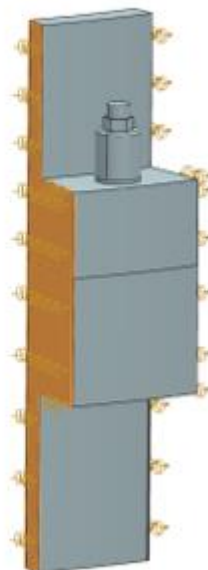
Definování plochy pro konvekci – volná konvekce



Definování teplotní zatížení – tepelný tok 3650W zadaný na válcové stopce topného tělesa.



Dále je třeba zadat podmínky periodicity, čímž se vytvoří reprezentace plného 3D modelu z jedné periodicky opakované části modelu.



Nastavení řešiče NX Thermal Advanced . Zde lze zadat, že se jedná o nestacionární typ úlohy, celkový časový interval úlohy , velikost jednotlivých časových kroků iterací a eventuální ukončení úlohy. Průběh řešení lze opět monitorovat.

Ze znalosti fyzikálního modelu lze nastavit ukončení úlohy podle reality – pokud např. víme, že prodloužení šroubu má dosáhnout takové hodnoty, aby s maticí bylo možné volně pootočit ve směru dotažení o 66°, tzn. pro šroub M120 se stoupáním závitu 6mm se jedná o vzdálenost 1,1mm po odečtení vůle potřebné pro měrku 0,05mm je potřebná délka prodloužení 1,05mm. Díky tomuto

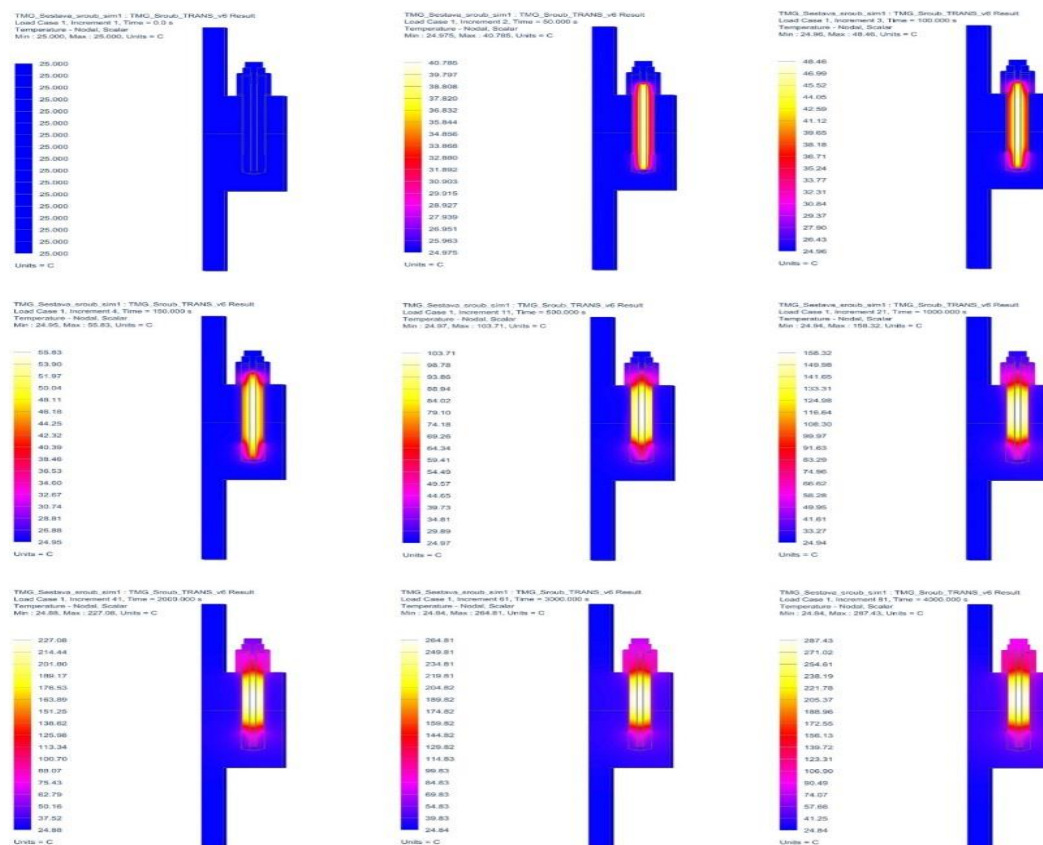
faktu lze odhadnout přibližnou hodnotu potřebné teploty dříku šroubu pomocí tepelné délkové roztažnosti materiálu, při znalosti součinitele tepelné délkové roztažnosti pro ocel $\alpha = 0,0121 \cdot 10^{-3} \text{ (K}^{-1}\text{)}$.

Pro výpočet postačí zjednodušený vzorec $\Delta t = \Delta l / (\alpha \cdot l_0)$. Odtud potřebné zahřátí dříku šroubu Δt je $218,5^\circ\text{C}$, jelikož je uvažována globální počáteční teplota 25°C , potřebná finální teplota dříku šroubu by měla dosahovat $243,5^\circ\text{C}$. Díky tomuto odhadu je možné značně snížit potřebný počet iterací a to nastavením ukončení nestacionární analýzy při dosažení maximální teploty definované v oblasti středu dříku s dostatečnou rezervou výše teploty.

Úloha se rovněž ukončí po dosažení maximálního času (5000 s). Doporučuje se rovněž využít automatické změny integrační časové kontroly k nastavení hodnoty časového kroku (automatické prodloužování kroku při málo se měnících výsledcích, automatické zkrácení kroku při vysokém gradientu).

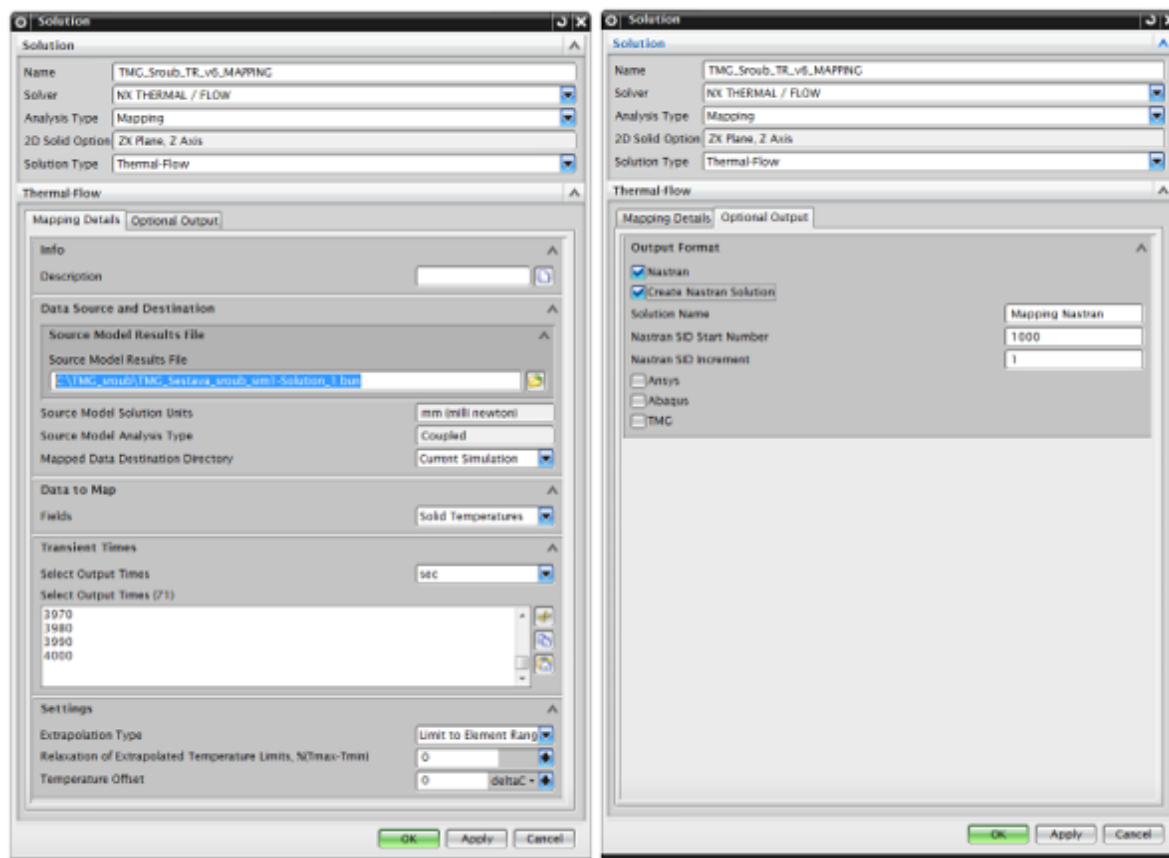
U velkých úloh je vhodné nastavit si ukládání jen některých výsledků, např. každý desátý krok apod.

Výsledky nárůstu teploty v čase :

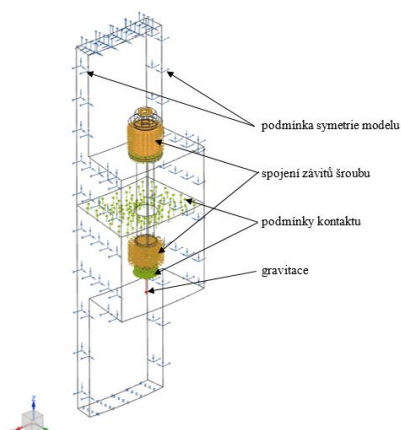


Převod na strukturální model

U stacionárních i nestacionárních úloh lze z teplotního pole získat posunutí, přetvoření a napětí způsobené teplotním gradientem. Vytvoří se nové řešení pro řešič NX Thermal/Flow s typem analýzy Mapping. V nastavení je provedeno načtení výsledků teplotní analýzy s požadovanými časy. Dále v nastavení výstupních dat byl použit formát „Nastran Solution“.

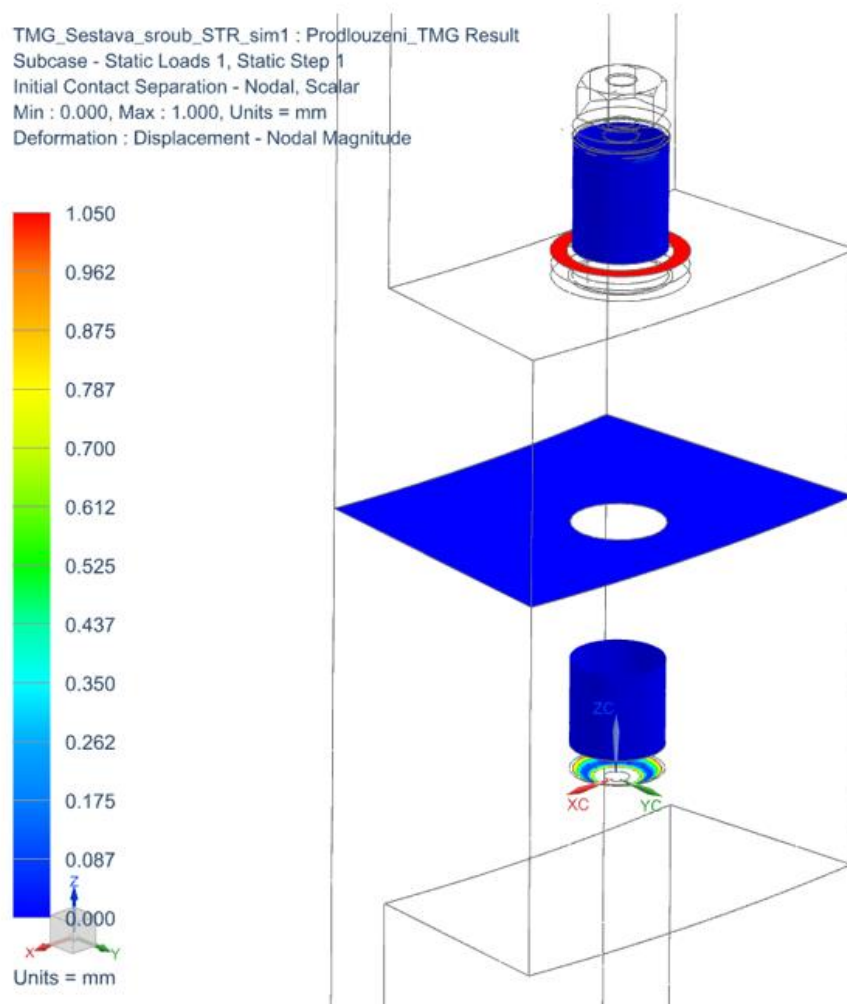


Výsledky mapování z teplotní analýzy nyní slouží jako vstupní data pro zatížení modelu a jsou aplikovány do „Subcase“ úlohy. Celý model je ustálen v prostoru s využitím podmínek symetrie a uživatelsky definovaných podmínek upevnění. Samozřejmostí je definice materiálu (E a μ). Dále jsou na modelu aplikovány podmínky kontaktu ploch a spojení oblastí závitu šroubu s přírubou a maticí.



Postprocessing

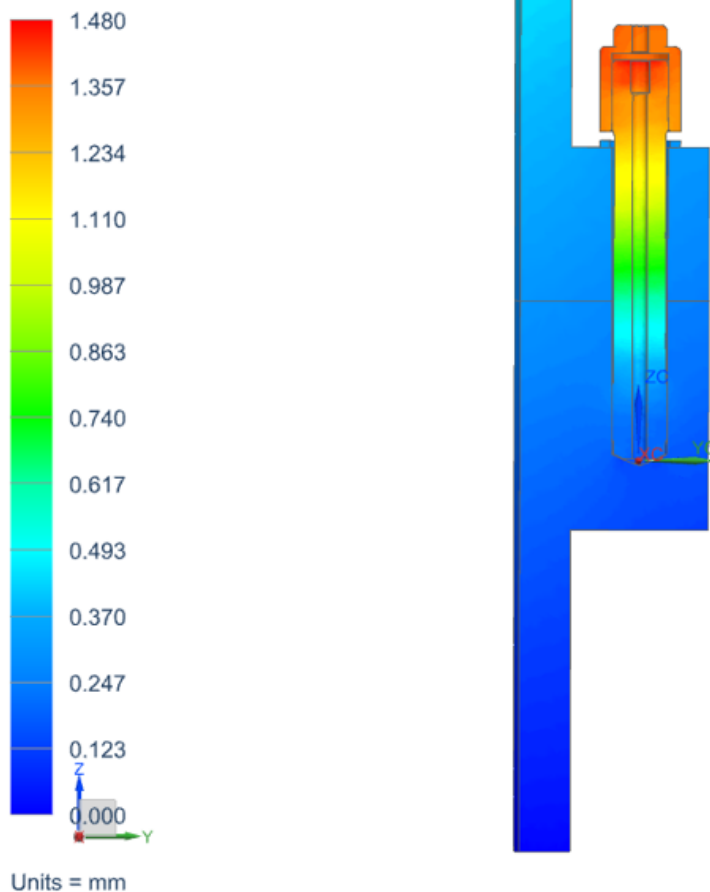
Z výsledků jednotlivých časů teplotní analýzy pře-mapovaných do strukturální analýzy, byl nalezen časový krok v čase 3450s, který odpovídá hodnotě odtržení kontaktu (Contact Separation) dosedací plochy matice šroubu o požadované vzdálenost 1,05mm



Obrázek 24 - Zobrazení odtržení kontaktu dosedací plochy matice šroubu v čase 3450s

Dále je možno vyjádřit deformace, ev. Napětí vzniklé v sestavě :

TMG_Sestava_sroub_STR_sim1 : Prodlouzeni_TMG Result
 Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
 Initial Contact Separation - Nodal, Scalar
 Min : 0.000, Max : 1.000, Units = mm
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Z jednotlivých výsledů vyplývá, že pro zajištění potřebného prodloužení dříku šroubu (1,05mm) je nutné šroub topným tělesem zahřívat po dobu 3450s. Za tuto dobu dojde k ohřátí dříku šroubu v rozmezí 138 až 272°C.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY