

Experimentální **A**nalýza **N**apětí **2003**

SIMULATION AND MEASUREMENTS OF TIRE CURING PRESSES TEMPERATURE FIELD

VÝPOČTY A MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO POLE VULKANIZAČNÍHO LISU

Jiří Jankovec¹, Milan Honner², Aleš Shorný³

This paper deals with the modeling of the tire curing press mould thermal behavior. There are two types of tire curing presses considered. First, a tire curing press heated by steam acting on curing mould in steam chamber. The second one is the newer technical solution where the curing moulds are heated by a heating plate. The modeling approach utilizes experimental data obtained during the manufacturing process. The measurement was realized with thermocouples embedded in the curing mould. Data obtained were used to find a time depending heat transfer coefficients. An iterative fitting process was used to find out these coefficients. In the next steps, tire-curing presses of different sizes are modeled. Numerical simulations were performed by FEM software COSMOS/M.

Keywords

Thermomechanics, Tire Curing Press, Finite Element Method, Thermocouple

Úvod

V současnosti jsou v gumárenském průmyslu při výrobě pneumatik běžně používány vulkanizační lisy s parní komorou. Formy, ve kterých dochází k vulkanizaci a zároveň tvarování pneumatik, jsou u tohoto typu lisů vyhřívány horkou párou o daném tlaku. K výměně tepla mezi párou a formou dochází v parní komoře, která obklopuje formu. Novým trendem se stává použití vulkanizačních lisů, jejichž formy jsou vyhřívány topnou deskou, na které jsou vulkanizační formy usazeny. Výhodou lisů tohoto typu je to, že nedochází k výraznému ochlazení formy mezi jednotlivými výrobními cykly (tyto lisy jsou neustále vyhřívány během otevření lisu a vyjímání pneumatiky) a zároveň jsou tyto lisy bezpečnější pro obsluhu, která se pohybuje v jejich těsné blízkosti. Určitou nevýhodou tohoto systému vytápění je mírné rozvrstvení teplotního pole na formě ve směru od topné desky. V důsledku toho je třeba vhodně uzpůsobit vyhřívací režim topné desky.

¹ Ing. Jiří Jankovec: ŠKODA VÝZKUM s.r.o.; Tylova 57, 316 00 Plzeň, tel.: +420-378133203, e-mail: jiri.jankovec@skoda.cz

² Ing. Milan Honner, Ph.D.: Nové technologie – výzkumné centrum, ZČU Plzeň; Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, tel.: +420-377421088, e-mail: honner@ntc.zcu.cz

³ Aleš Shorný: ŠKODA VÝZKUM s.r.o.; Tylova 57, 316 00 Plzeň, tel.: +420-378132105, e-mail: ales.shorny@skoda.cz

Dosud největší lisy vyhřívané deskovým systémem a vyráběné ve Škoda TS, s.r.o. (dále jen Škoda TS) jsou 90-ti palcové. Škoda TS uvažuje o výrobě deskových lisů o velikosti 130“, protože vulkanizační lisy s parním vytápěním o velikosti 130“ jsou již ve výrobě běžně používány. Požadavkem bylo proto provedení výpočtové simulace provozu 130-ti palcového lisu s deskovým vytápěním, na jehož základě by bylo možno určit vhodnost tohoto systému vytápění i pro lisy větších rozměrů.

Vzhledem k tomu, že zákazník Škody TS provozuje vulkanizační lisy s parním i deskovým systémem vytápění o velikosti 90“, bylo možno využít těchto lisů v provozu k naměření veličin potřebných pro výpočtové simulace lisů větších rozměrů..

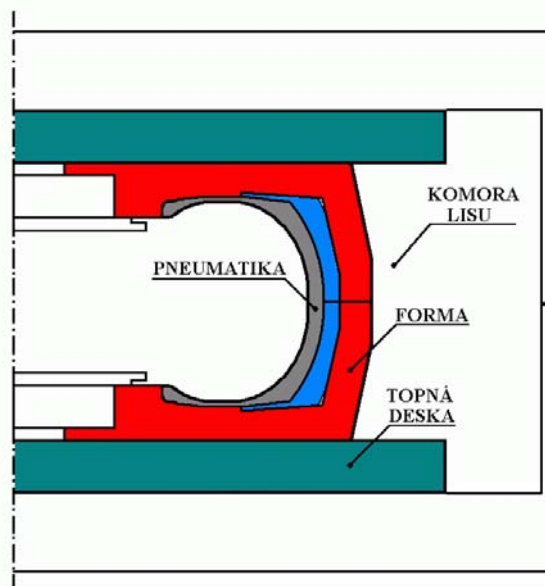
Modelování provozu vulkanizačních lisů bylo prováděno pomocí systému COSMOS/M, který pracuje na bázi metody konečných prvků a umožňuje řešit teplotní úlohy stacionárního i nestacionárního charakteru.

Realizace měření

Pro tvorbu vhodného matematického modelu tepelného procesu bylo třeba upřesnit okrajové podmínky a seznámit se blíže s technologií ohřevu vulkanizační formy topnými médii. Pro identifikaci okrajových podmínek bylo tedy navrženo měření teploty v několika vytipovaných místech na povrchu i uvnitř formy. Byly použity plášťované termočlánky NiCr-Ni (K) připojené do měřicí ústředny AMR-THERM 3280-8M. Měření bylo provedeno na deskovém i na parním vulkanizačním lisu a trvalo vždy po dobu jednoho cyklu vulkanizace pneumatiky.

Na obr. 1. je schématicky znázorněna komora vulkanizačního lisu s topnou deskou. Lis s parním vytápěním se liší pouze tím, že na místě desky (topné) má žebra, na kterých je usazena forma. Obr. 2 znázorňuje polohu měřicích míst termočlánků T1 až T9 a polohu T10 virtuálního termočlánku, který existuje jen v MKP modelu pro účely porovnávání průběhů teplot.

Během otevírání a zavírání komory lisu bylo provedeno termovizní měření povrchového teplotního pole formy, které umožnilo pozdější určení teplot na povrchu formy v místech, kde nebyly umístěny termočlánky (viz [2]). Bylo zjištěno, že povrch formy v případě deskového lisu díky neustálému vytápění zchladne během výměny pneumatik o pouhé 2 °C, kdežto v případě parního způsobu vytápění dojde k zchladnutí o téměř 10 °C.

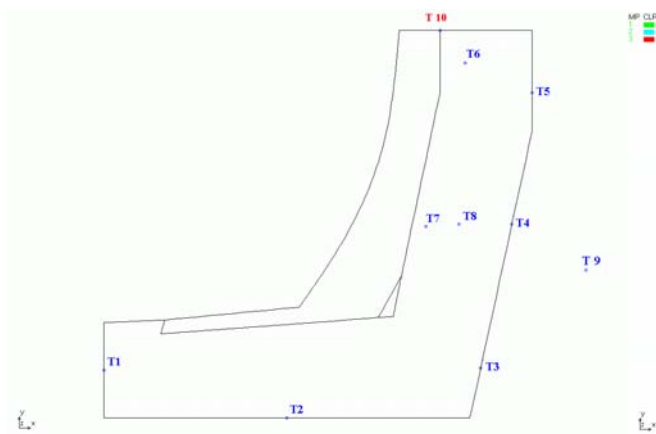


Obr. 1. Schéma vulkanizačního lisu

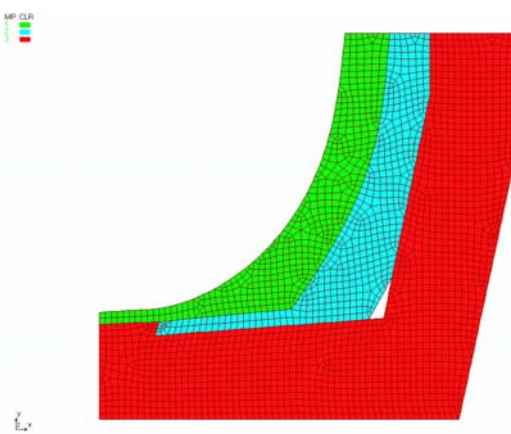
Realizace MKP výpočtů

Naměřené teploty byly použity k určení časových průběhů přestupů tepla – okrajových podmínek a k zadání počátečních podmínek pro počítačovou simulaci ohřevu formy během vulkanizace. Po získání těchto parametrů bylo možno namodelovat teplotní chování formy větších rozměrů (pro lisy velikosti 130 palců).

MKP model (viz. obr. 3) byl sestaven na základě dodané výkresové dokumentace. Modelována byla jen spodní část formy od místa nejmenší tloušťky formy až po vnější poloměr. Úloha byla řešena jako rotačně-symetrická, při použití 2600 prvků typu PLANE2D. Na obr. 3 je patrné rozlišení jednotlivých skupin prvků podle materiálových vlastností. Ve směru zleva doprava se jedná o pneumatiku, hliníkovou vložku formy a ocelolitinovou formu. V rotačně symetrické geometrii bylo členité rozhraní mezi pneumatikou a formou nahrazeno hladkou plochou procházející středem zubů vzorku pneumatiky. Model pro deskový systém vytápění a model pro parní systém vytápění se liší pouze v okrajových a počátečních podmínkách, síť konečných prvků je shodná.



Obr. 2. Rozmístění termočláneků

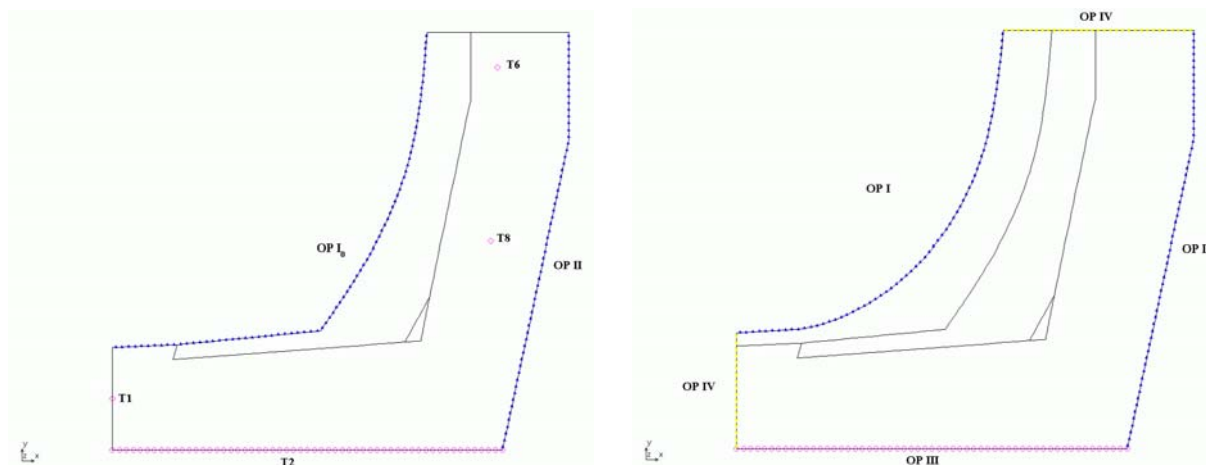


Obr. 3. MKP model a rozdělení materiálů

Deskový systém vytápění

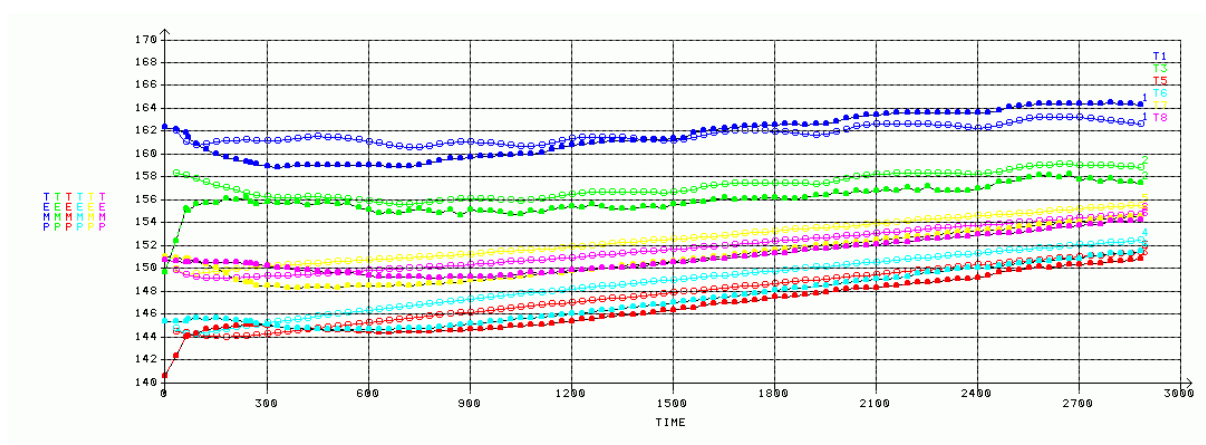
Dle průběhů teplot naměřených na deskovém lisu bylo zřejmé, že teploty na začátku vulkanizačního procesu se po výšce podstatně liší. Prvním krokem řešení bylo určení výchozího teplotního pole na začátku procesu. V druhém kroku byl pak simulován vývoj teplotního pole v čase, kdy hranice řešené oblasti byly ovlivňovány okrajovými podmínkami (i časově proměnnými).

V programu COSMOS/M byla nejdříve řešičem modulu THERMAL určena podoba stacionárního pole, která měla simulovat úvodní ohřev formy „naprázdno“. Řešena byla oblast hliníku a ocelolitiny (bez gumy) s následujícími okrajovými podmínkami (vše zobrazeno na obr. 4 vlevo). Hledány byly hodnoty přestupů tepla, pro které je v ustáleném stavu shoda s teplotami naměřenými termočládky uvnitř formy. Na oblasti OP I₀ byl nalezen přestup tepla o velikosti 50 [W/m²K], při naměřené teplotě okolí 120 °C, na oblasti OP II pak přestup tepla 100 [W/m²K]. V uzlech na spodní hraně byla zadána teplota T2 = 167 °C. V uzlu, který se nacházel v místě termočládku číslo 1., teplota T1 = 164 °C. V uzlu v místě termočládku číslo 8 teplota T8 = 151 °C a v uzlu na místě termočládku číslo 6 teplota T6 = 146 °C.



Obr. 4. Okrajové podmínky pro výpočet stacionárního (vlevo) a nestacionárního (vpravo) pole u **deskového** lisu

Při použití výsledného stacionárního teplotního pole jako výchozího pro ocelolitinu a hliníkovou vložku, při zadání výchozí teploty 40 °C pro oblast pneumatiky a pro okrajové podmínky (viz. obr. 4 vpravo), jejichž parametry se hledaly, byl proveden nestacionární výpočet. Hledány byly součinitele přestupu tepla na oblastech OP I a OP II, přičemž teplota okolí na OP I byla dána z technologického režimu teploty média ve vyhřívací membráně (ta vyplňuje vnitřek pneumatiky) a teplota okolí na oblasti OP II byla dána teplotou naměřenou termočlánkem T9. Na oblasti OP III byla zadána časově proměnná teplota naměřená termočlánkem T2 a na oblasti OP IV byl zadán nulový tok. Po provedení výpočtu byly vykresleny průběhy teplot na termočláncích T1, T3, T5, T6, T7 a T8 a bylo snahou jejich průběhy pomocí změn parametrů přestupu tepla co nejvíce přiblížit průběhům naměřených teplot. Naladění parametrů přestupu tepla je patrné z obr. 5, kde jsou znázorněny průběhy teplot v místech, která si odpovídají na modelu a na reálné formě. Plnými značkami jsou znázorněny hodnoty naměřené na formě a prázdnými hodnoty vypočtené.

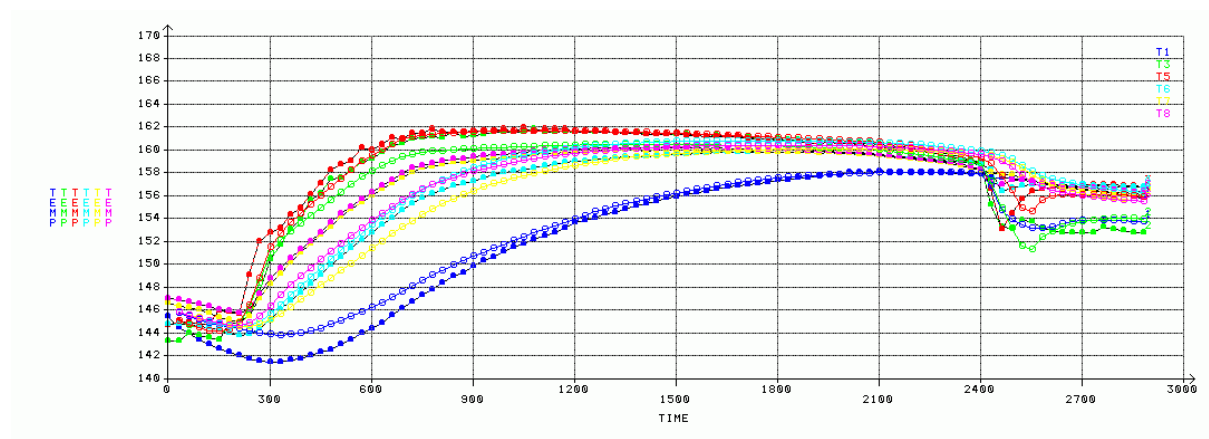


Obr. 5. Porovnání měřených a vypočtených průběhů teplot [°C] u 90° **deskového** lisu

Parní systém vytápění

Měření ukázalo, že rozdíly teplot na termočláncích na formě v případě parního lisu jsou na začátku vulkanizačního procesu (po vložení pneumatiky) velmi malé. Nebylo proto řešeno počáteční rozložení teploty, ale jako výchozí teplotní pole pro nestacionární výpočet byla zadána konstantní teplota na oblasti ocelolitině a hliníku, $T = 146\text{ °C}$. Počáteční teplota na oblasti pneumatiky byla zadána 40 °C .

Také v tomto případě byly hledány parametry okrajových podmínek tak, aby vypočtené průběhy teplot v místech termočlánců co nejvíce odpovídaly průběhům naměřených teplot (viz. obr. 7 – stejně i zde jsou plnými značkami naměřené hodnoty a prázdnými vypočtené).

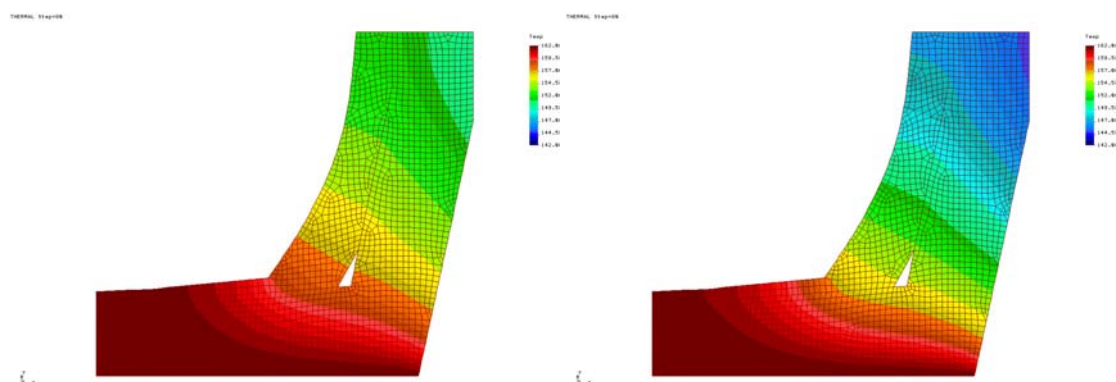


Obr. 7. Porovnání měřených a vypočtených průběhů teplot [°C] u 90° parního lisu

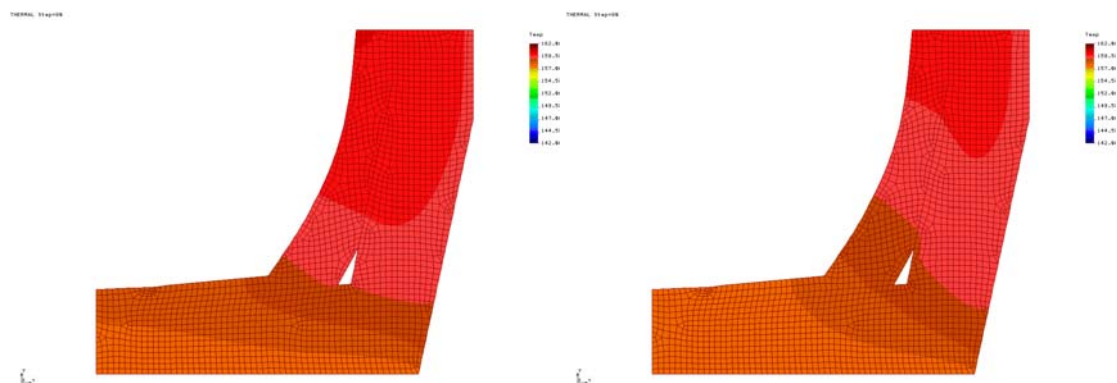
Výsledky simulací

Nalezené součinitele přestupu tepla a stejné teplotní režimy byly použity i pro simulace provozu lisů o velikosti 130°. Z technologických důvodů je pro hodnocení podstatné teplotní pole dosažené ve 40. minutě od začátku vulkanizace. Na obr. 8 jsou teplotní pole formy obou velikostí lisů s deskovým vytápěním. Na obr. 9 jsou teplotní pole formy obou velikostí lisů s parním vytápěním.

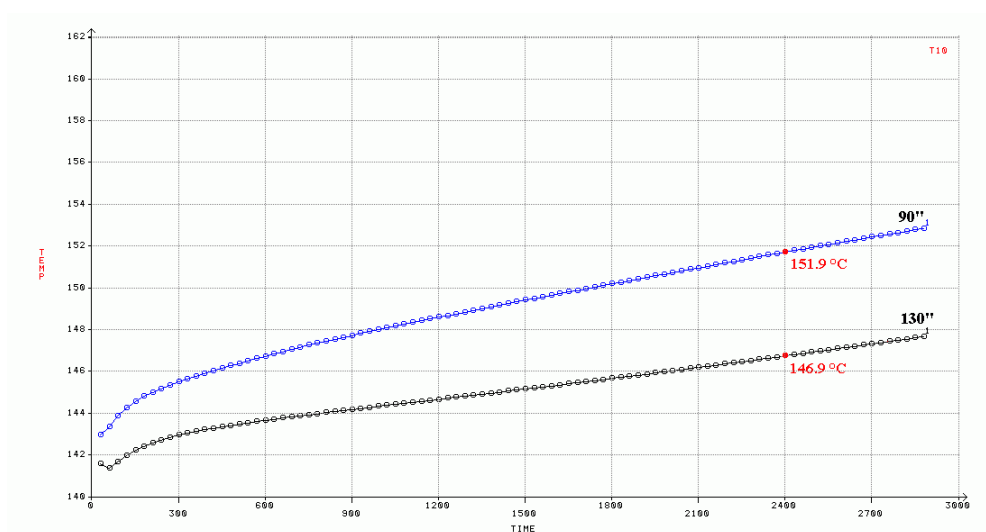
Pro porovnání různých typů lisů jsou vykresleny na obr. 10 a obr. 11 průběhy teploty ve virtuálním termočláncu T10 s vyznačenou hodnotou teploty ve 40. minutě.



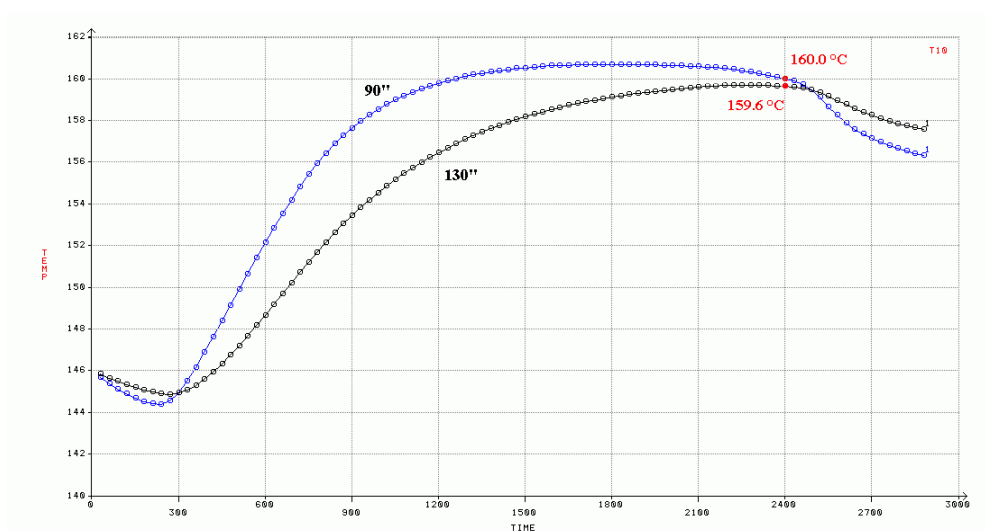
Obr. 8. Teplotní pole [°C] formy 90° (vlevo) , resp. 130° (vpravo) deskového lisu ve 40. minutě



Obr. 9. Teplotní pole [°C] formy 90° (vlevo) , resp. 130° (vpravo) **parního** lisu ve 40. minutě



Obr. 10. Průběh teploty [°C] v místě T10 na 90° , resp. 130° **deskovém** lisu



Obr. 11. Průběh teploty [°C] v místě T10 na 90° , resp. 130° **parním** lisu

Závěr

Provedená měření a na ně navazující výpočty prokázaly, že vulkanizační lisy vyhřívané pomocí parní komory dosahují rovnoměrnějšího prohřátí vulkanizační formy než lisy vytápěné topnými deskami.

Z provedených výpočtů je, na rozdíl od naměřených teplot pouze v místech termočlánků, možno určit průběh teplot v celé formě pro různé rozměry formy a různé způsoby vytápění.

V případě parního lisu byla v porovnávacím místě (místo T10 virtuálního termočlánku) ve 40. minutě vypočtena teplota $T_{10} = 160.0\text{ °C}$ pro případ 90-ti palcového lisu, v případě 130-ti palcového lisu teplota $T_{10} = 159.6\text{ °C}$. Bylo tedy dosaženo přibližně stejné teploty, i když po mírně odlišném časovém průběhu (viz. obr. 11).

V případě deskového lisu byla v porovnávacím místě (místo T10 virtuálního termočlánku) ve 40. minutě vypočtena teplota $T_{10} = 151.9\text{ °C}$ v případě 90-ti palcového lisu, v případě 130-ti palcového lisu teplota $T_{10} = 146.9\text{ °C}$ (viz. obr. 10). To znamená, že v oblasti běhounu pneumatiky je teplota na formě o 5 °C nižší. Pro posouzení vhodnosti lisu s vytápěnou deskou je potřeba zodpovědět otázku, zda i o 5 °C nižší teplota na formě v místě běhounu pneumatiky je dostatečná pro řádný průběh vulkanizace. V případě, že by tato teplota, resp. průběh teploty v tomto místě byl nedostačující, je zapotřebí na deskovém lisu pozměnit režim vytápění topné desky nebo přidat další topnou desku např. do míst OP II (viz. obr. 4). V současnosti se pracuje na simulacích různých režimů vytápění deskového lisu, které by umožnily zrovnoměnění průběhů teplot.

Literatura

- [1] Jankovec, J.: *Modelování ohřevu forem vulkanizačních lisů* – výzkumná zpráva ŠKODA VÝZKUM s.r.o. VYZ 0618/2002,, Plzeň, 2002, 23 str.
- [2] Honner, M., Litoš, P.: *Termovizní měření formy vulkanizačního lisu* – výzkumná zpráva NTC 04-02/11, ZČU Plzeň, 2002, 11 str.
- [3] *COSMOS/M, Finite Element Analysis System, User Guide, Version 2.7*, SRAC, Los Angeles, 2001