

COMPUTATIONAL MODELLING OF THERMAL FIELD AT LOCAL ANNEALING OF CASTING

F. Ficek*, J. Čech*

Summary: *Using the finite element method for computational modelling thermal field at local annealing of casting after welding repair. Results time dependent thermal field using for elastic plastic stress analyses of casting. Comparison results of computational modelling and experimental results.*

1. Úvod

Po opravách odlitků svařováním je nutno žíhat na snížení pnutí celý odlitek o hmotnosti mnoha tun bez ohledu na velikost opravného svaru a množství vad. Pokud je vada nalezena až při výstupní defektoskopické kontrole, je aplikace tohoto postupu silně neekonomická a rovněž prodlužuje dobu výroby z důvodu nutnosti kumulace vsázky žíhacích pecí. Vznikl tedy požadavek na návrh a odzkoušení technologického postupu pro lokální žíhání odlitků v okolí opravných svarů. Součástí tohoto požadavku je i provedení výpočtového modelování teplotního a napěťového pole při lokálním žíhání odlitku. Obsahem tohoto příspěvku je popis výpočtového modelování teplotního pole při lokálním žíhání odlitku včetně porovnání výsledků s výsledky experimentu.

2. Realizace lokálního žíhání odlitku

Při lokálním žíhání je nutné, aby v určité požadované oblasti bylo dosaženo zadaného časového průběhu teploty. Zadaný časový průběh teploty je dán předpisem (obr.5):

1. Ohřev na teplotu 680 °C rychlostí 50 °C/h.
2. Výdrž na teplotě 680 °C po dobu 5 h.
3. Řízené ochlazování na teplotu 300 °C rychlostí 50 °C/h.
4. Volné ochlazování odlitku.

Při návrhu technologického postupu byly prověřeny různé způsoby lokálního ohřevu odlitku. Lokální ohřev byl prováděn plynovým hořákem, plynovým infrazářičem a elektricky odporově. Pro uvažovaný typ odlitku byl jako vyhovující navržen elektrický odporový ohřev pomocí tvarovatelných keramických topných těles.

Při elektrickém odporovém ohřevu jsou v požadovaných místech na odlitku připevněna topná tělesa. Pro dosažení požadovaného časového průběhu teploty je nutné topná tělesa regulovat. Regulace je provedena přerušovaným zapínáním topných těles na základě teploty měřené termočlánekem v předem definovaných místech pod topnými tělesy.

*ing. František Ficek, ŽDAS a.s., Strojírenská 6, 591 71 Žďár nad Sázavou, frantisek.ficek@zdas.cz
ing. Jan Čech, ŽDAS a.s., Strojírenská 6, 591 71 Žďár nad Sázavou, jan.cech@zdas.cz

Aby bylo možné dosáhnout požadovaného průběhu teploty, musí být povrch odlitku izolován. Izolace byla provedena pomocí hlinitokeramických desek volně položených na odlitek. Pro účely porovnání výsledků výpočtového modelování s naměřenými časovými průběhy teplot bylo na povrchu odlitku umístěno 26 termočlánků. Umístění některých topných těles a provedení izolace je uvedeno na obr. 1 a 2.



Obr.1 Umístění topných těles



Obr.2 Izolace povrchu odlitku

3. Materiálové charakteristiky odlitku a izolace

Výsledkem výpočtu budou teploty v intervalu 20 až 700 °C. Materiálové charakteristiky je tedy nutno zadat včetně jejich závislosti na teplotě alespoň v uvedeném intervalu teplot. U materiálových vlastností odlitku byla uvažována teplotní závislost měrné tepelné kapacity a vodivosti, u izolace pouze teplotní závislost tepelné vodivosti.

Výsledky výpočtu budou dále použity pro definici časově neustáleného teplotního zatížení při pružně plastickém výpočtu, jehož výsledkem bude časová závislost deformace, složek tenzorů napjatosti a přetvoření. Z tohoto důvodu byly provedeny tahové zkoušky materiálu odlitku v intervalu teplot 20 až 700 °C. Je vhodné poznamenat, že pružně plastický výpočet byl proveden za předpokladu malých posuvů a přetvoření.

4. Výpočtový model elektrického odporového ohřevu a izolace odlitku

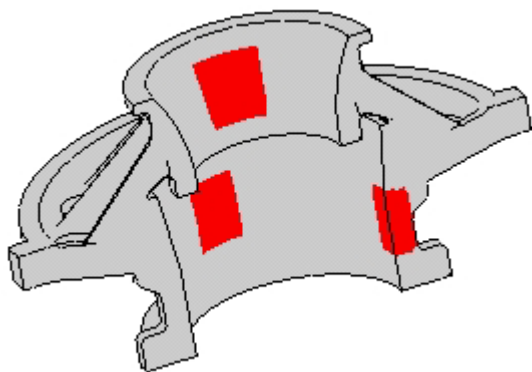
Jak již bylo uvedeno, je elektrický odporový ohřev realizován pomocí keramických topných těles o známém příkonu. Každé z těchto topných těles je regulováno na základě teploty měřené termočlánkem v předem definované poloze. Regulace je prováděna střídavým zapínáním a vypínáním topného tělesa. Příkon topného tělesa se skokově mění z nulové na jmenovitou hodnotu.

Pro výpočtové modelování je použit programový systém metody konečných prvků MSC.MARC. Ve výpočtovém modelu lze elektrický odporový ohřev modelovat pomocí měrného tepelného toku [Wm^{-2}] vztaheného na plochu topného tělesa. Hodnota celkového měrného toku [W] je rovna jmenovitému příkonu topného tělesa. Dále musí být zajištěna výše uvedená regulace všech topných těles tak, aby byla dodržena předepsaná časová závislost teploty. Tuto regulaci nelze modelovat s využitím základních možností uvedeného programového systému, ale je nutné využít uživatelem definovaných procedur v programovacím jazyce FORTRAN, připojených k programovému systému MSC.MARC.

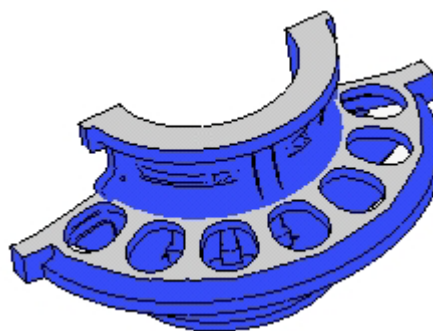
Izolace odlitku je provedena volně položenými hlinitokřemičitými deskami známé tloušťky na povrchu odlitku. Přestup tepla mezi povrchem odlitku a izolací je stanoven na základě výpočtového experimentu. V testovaném rozsahu je časová závislost teploty odlitku vzhledem k velmi nízké tepelné vodivosti izolace prakticky nezávislá na velikosti součinitele přestupu tepla mezi povrchem odlitku a izolací. S velmi dobrou přesností lze uvažovat ideální přestup tepla mezi povrchem odlitku a izolace.

Izolace odlitku byla ve výpočtovém modelu uvažována jako teplotní závislost součinitele přestupu tepla α_o mezi povrchem odlitku a okolím. Součinitel přestupu tepla α_o zahrnuje ideální přestup tepla mezi odlitkem a izolací, tepelnou vodivost izolace a přestup tepla mezi izolací a okolím. Tepelná kapacita [J K^{-1}] izolace není ve výpočtovém modelu izolace odlitku uvažována. Teplota okolí je konstantní 20 °C.

Neizolované plochy odlitku jsou ochlazovány do volného prostoru. Umístění některých **topných těles** (ploch na kterých je zadána hodnota měrného tepelného toku) a **izolace** je uvedeno na obr. 3 a 4.



Obr.3 Plochy topných těles



Obr.4 Izolované plochy odlitku

5. Výpočtový model odlitku

Síť konečných prvků výpočtového modelu pro tepelný a pružně plastický výpočet musí být shodná. Vzhledem k požadavkům pružně plastického výpočtu je kladen důraz na kvalitu sítě konečných prvků. Síť obsahuje celkem 33230 prvků tvaru šesti a pětistěnu a 44653 uzlů. Počáteční teplota odlitku je uvažována konstantní 20 °C v celém objemu odlitku.

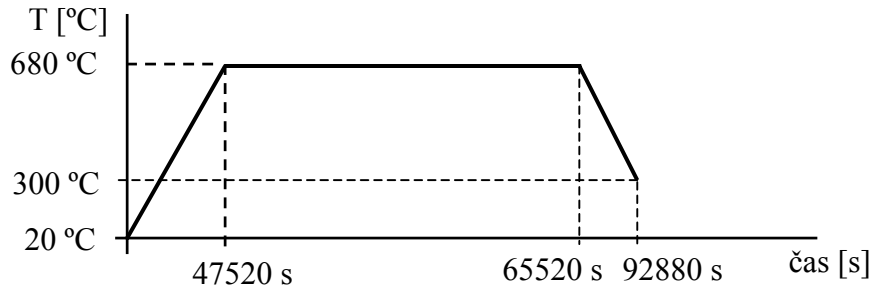
Pro řešení byl uvažován časový interval 224553 s (62 h 23min), který zahrnuje ohřev odlitku, výdrž na požadované teplotě, řízené ochlazování, volné ochlazování izolovaného odlitku a volné ochlazování neizolovaného odlitku. Vzhledem k regulaci topných těles je použití pevného časového přírůstku při výpočtu nereálné. Je použito automatické řízení s nastavením maximální změny teploty v jednom kroku na 5 °C. Výpočet obsahuje 1375 kroků a celková doba výpočtu činí cca 16h.

6. Výsledky experimentálního určení časových závislostí teploty

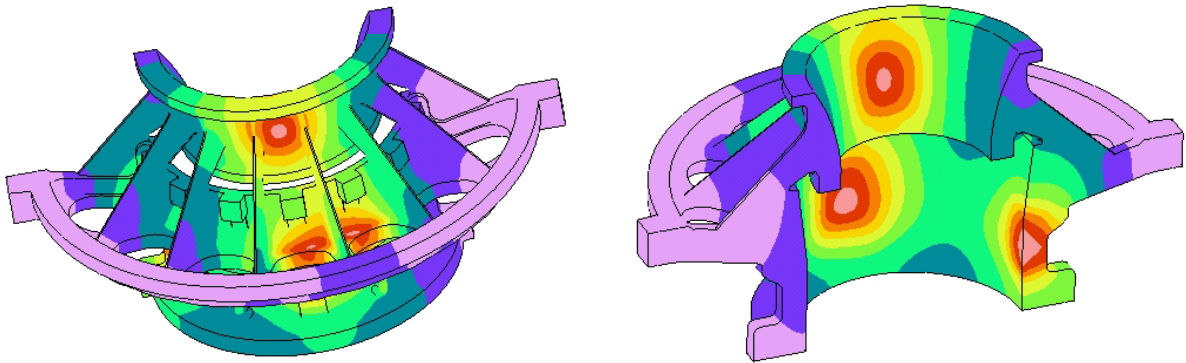
Teplota byla měřena pomocí termočlánků v 26 předem definovaných místech odlitku v celém časovém intervalu řízeného ohřevu, výdrže na teplotě a řízeného ochlazování odlitku. Naměřené hodnoty teploty byly zaznamenávány po 120 s v celkovém časovém intervalu 25 h 48 min.

7. Výsledky výpočtového modelování

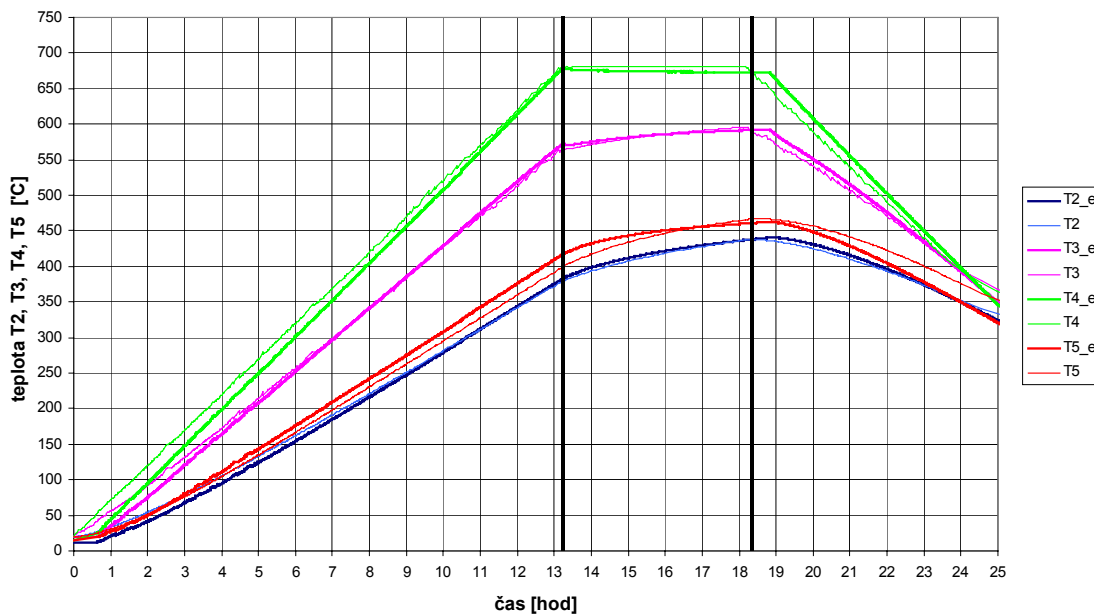
Výsledkem je rozložení teploty v tělese odlitku v jednotlivých časových intervalech. Příklad rozložení teploty v čase 65520s, který odpovídá konci výdrže na požadované teplotě (obr.5) je uveden na obr. 6. V uzlech sítě konečných prvků, jejichž poloha odpovídá poloze termočlánků, byla určena časová závislost teploty pro následné porovnání s výsledky experimentu.



Obr.5 Časová závislost teploty použitá pro regulaci topných těles



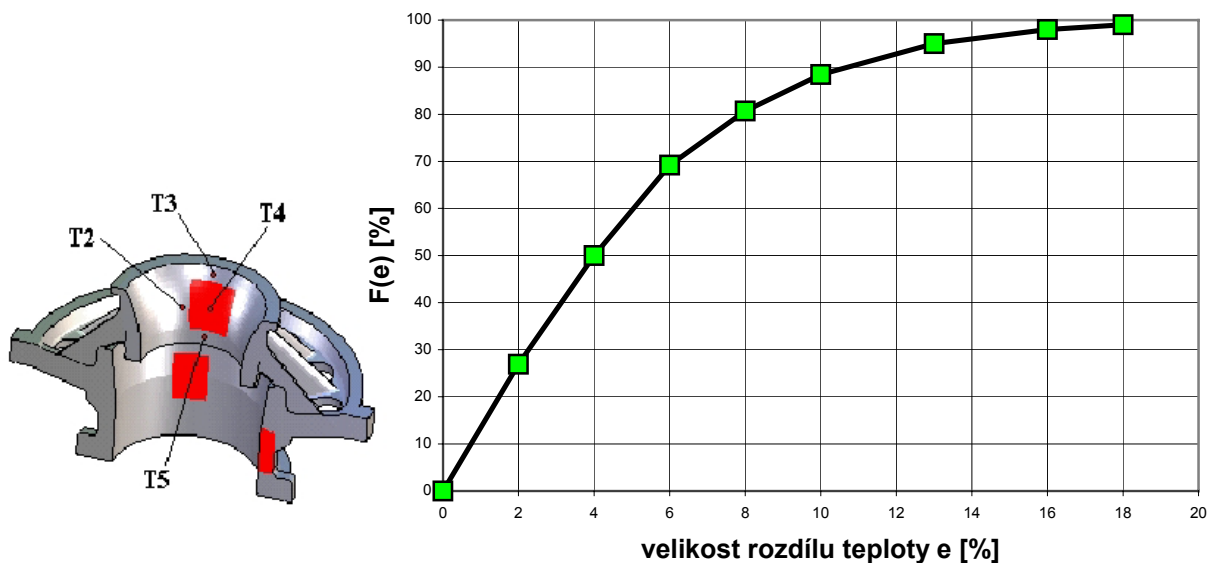
Obr.6 Příklad rozložení teploty v tělese odlitku v čase 65520 s



Obr.7 Příklad časové závislosti teploty určené výpočtem a experimentálně

Z důvodu velkého množství výsledků, je na obr. 7 uveden pouze příklad časové závislosti teploty v místě termočlánků T2, T3, T4, T5. Jednotlivé časové závislosti teploty jsou označeny shodně s příslušnými termočlánky a to pro spočtené hodnoty (T2 až T5), pro hodnoty určené experimentálně (T2_e až T5_e). Umístění uvedených termočlánků je zřejmé z obr. 8.

Výsledky výpočtového modelování a experimentu ve všech sledovaných místech byly zpracovány statisticky tak, aby bylo možno stanovit distribuční funkci $F(e)$ výskytu velikosti rozdílu teploty určené výpočtem a experimentálně. Zmíněná distribuční funkce velikosti rozdílu teploty e [%] je uvedena na obr. 8.



Obr.8 Poloha termočlánků T2 až T5, distribuční funkce $F(e)$ velikosti rozdílu teploty

S pravděpodobností 96% lze konstatovat, že velikost rozdílu teploty určené výpočtovým modelováním a experimentálně je maximálně 15%. Z praktického hlediska lze výsledky výpočtového modelování teplotního pole v tělese odlitku považovat za dostatečně přesné a lze je použít pro účely modelování napjatosti v tělese odlitku při lokálním žihání.

8. Závěr

Po provedení výpočtového modelování napjatosti v tělese odlitku byla zjištěna úroveň zbytkových pnutí po provedení lokálního žihání odlitku. Výpočtové modelování a praktická realizace lokálního žihání odlitku byly prováděny pro účely certifikace výrobního postupu. Protože v době provádění praktické realizace nebyl tento postup lokálního žihání certifikovaným výrobním postupem, byl následně celý odlitek žihán v peci dle standardního výrobního postupu.

9. Literatura

MSC.Software, Dokumentace programu MSC.MARC a MSC.MENTAT
 ŽĐAS a.s., divize metalurgie, Katalog výrobků